Centro de Investigaciones Ópticas
Más de 40 años de Investigación en Ciencia y Tecnología

Interacción de pulsos ultracortos y materia: De la fabricación de guías de onda a la generación de pulsos de attosegundos y otras aplicaciones en ONL

Prof. Dr. Gustavo A Torchia

Centro de Investigaciones Ópticas

Universidad Nacional de Quilmes

Índice de la charla

Parte 1

1-Conceptos sobre interacción laser-materia con pulsos ultracortos

Micro-maquinado de materiales ópticos-Guía de onda.
Generación de Altos armónicos (HHG)-Pulsos de Attosegundos.

2-Fotónica Integrada-circuitos ópticos

Escritura con pulsos ultracortos. Set-up experimental del CIOp.
Exploración de la interacción láser-materia con Micro-Raman y micro-Luminiscencia.
Distintos dispositivos fotónicos integrados -Fotónica de Silicio

Parte 2

3-Aplicaciones de efectos no lineales en volumen y en guías de onda

Generación de Segundo Armónico en un cristal de KDP micro estructurado con fs (NCPM).
SHG en cavidad láser en guías de onda
Quasi ajuste de fase en cristales PPLN (Niobato de Litio con estructuras aperiódicas).

4-Lineas actuales del Grupo de Fotónica Integrada del CIOp

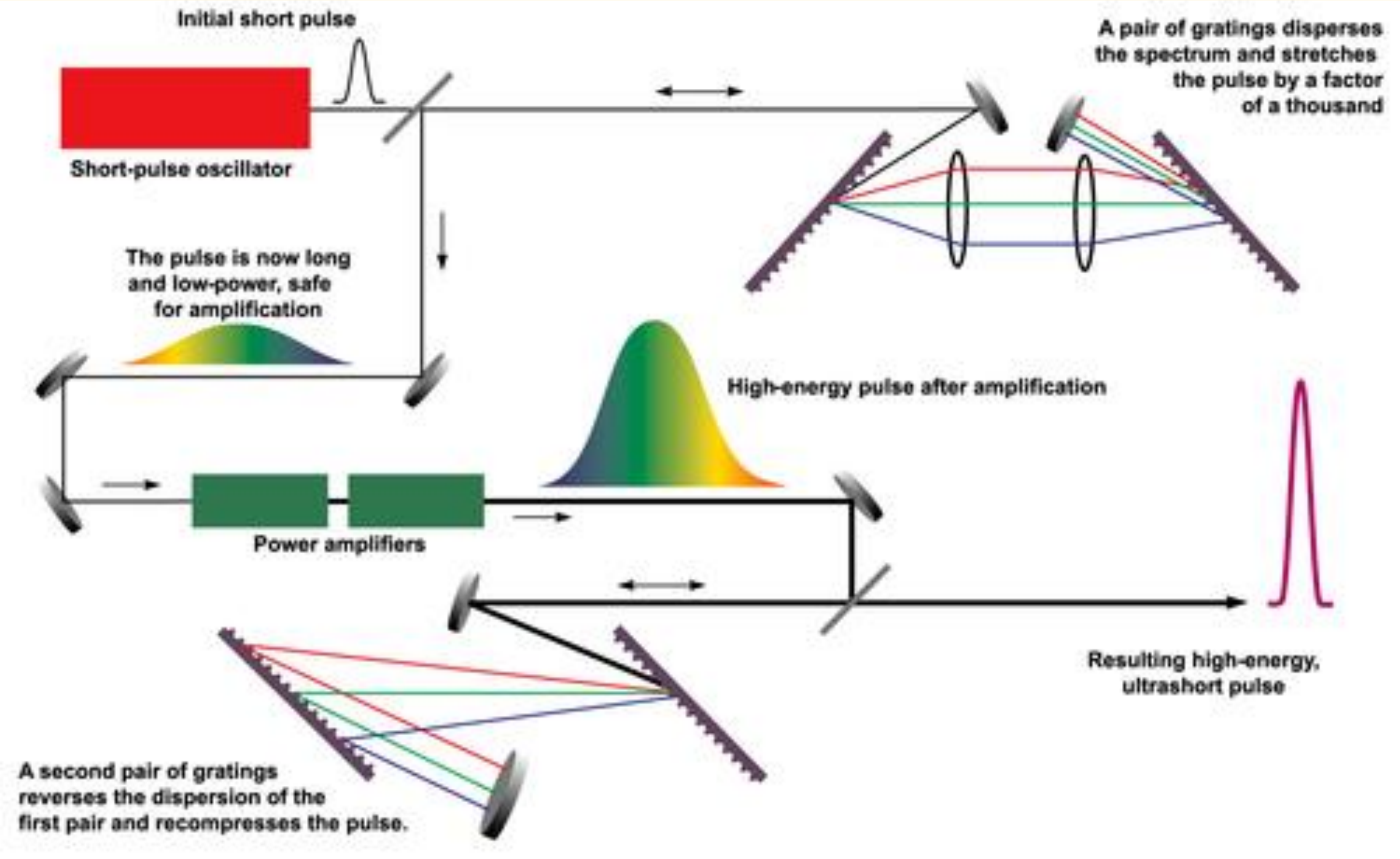
Óptica cuántica en FI-Conformación de pulsos de pocos ciclos en una celda de Herriot.

Parte 1

1-Conceptos sobre interacción laser-materia con pulsos ultracortos

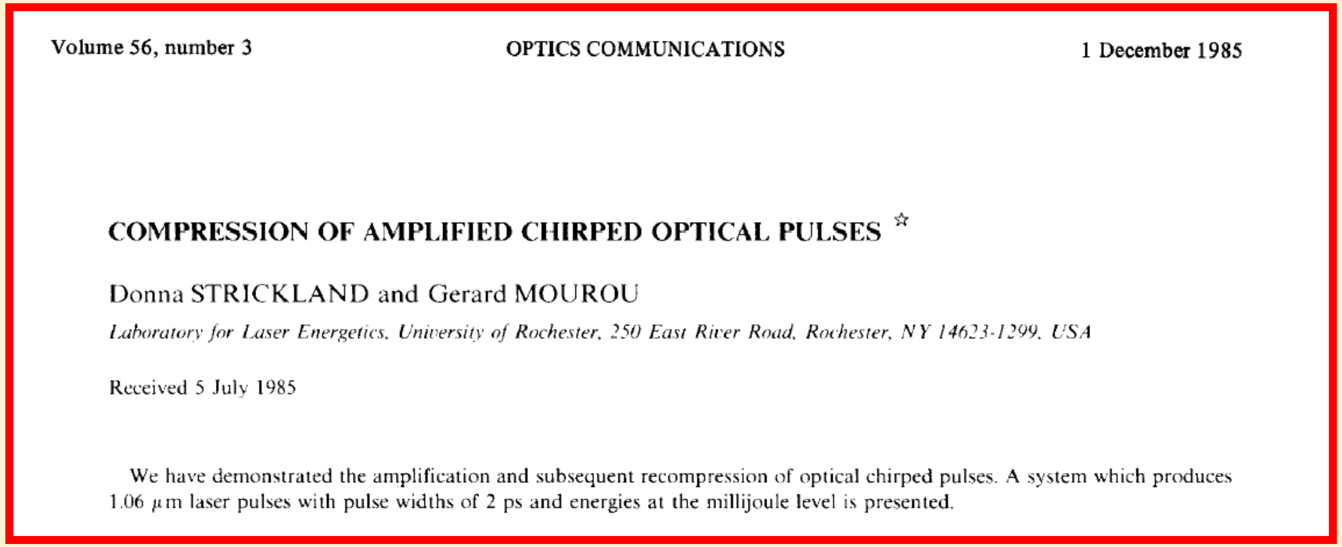
2-Fotónica Integrada-circuitos ópticos

Premio Nobel de Física 2018
Donna Strickland y Gérard Mourou



Chirped Pulsed
Amplification
(CPA)

Sistemas comerciales de 1 mJ por pulso a 1KHz y sistemas desarrollados con esta tecnología de hasta 1 PW (10^{15} W), con energías de 100 J (1Hz) por pulso.


Volume 56, number 3 OPTICS COMMUNICATIONS 1 December 1985

COMPRESSION OF AMPLIFIED CHIRPED OPTICAL PULSES ☆

Donna STRICKLAND and Gerard MOUROU

Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, 250 East River Road, Rochester, NY 14623-1299, USA

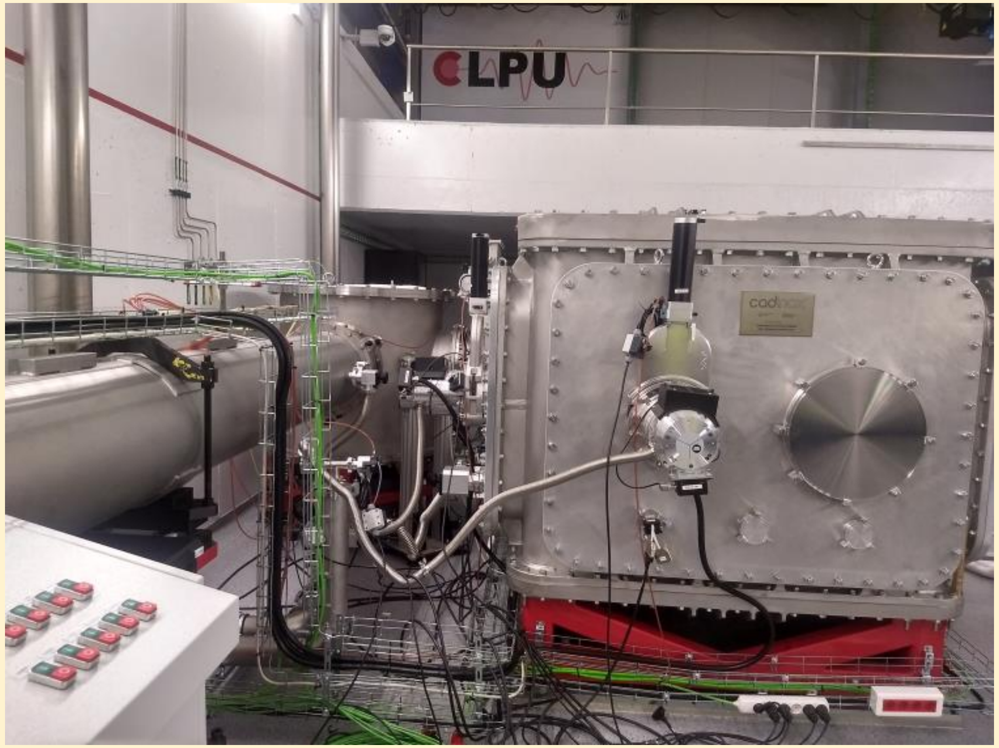
Received 5 July 1985

We have demonstrated the amplification and subsequent recompression of optical chirped pulses. A system which produces 1.06 μm laser pulses with pulse widths of 2 ps and energies at the millijoule level is presented.

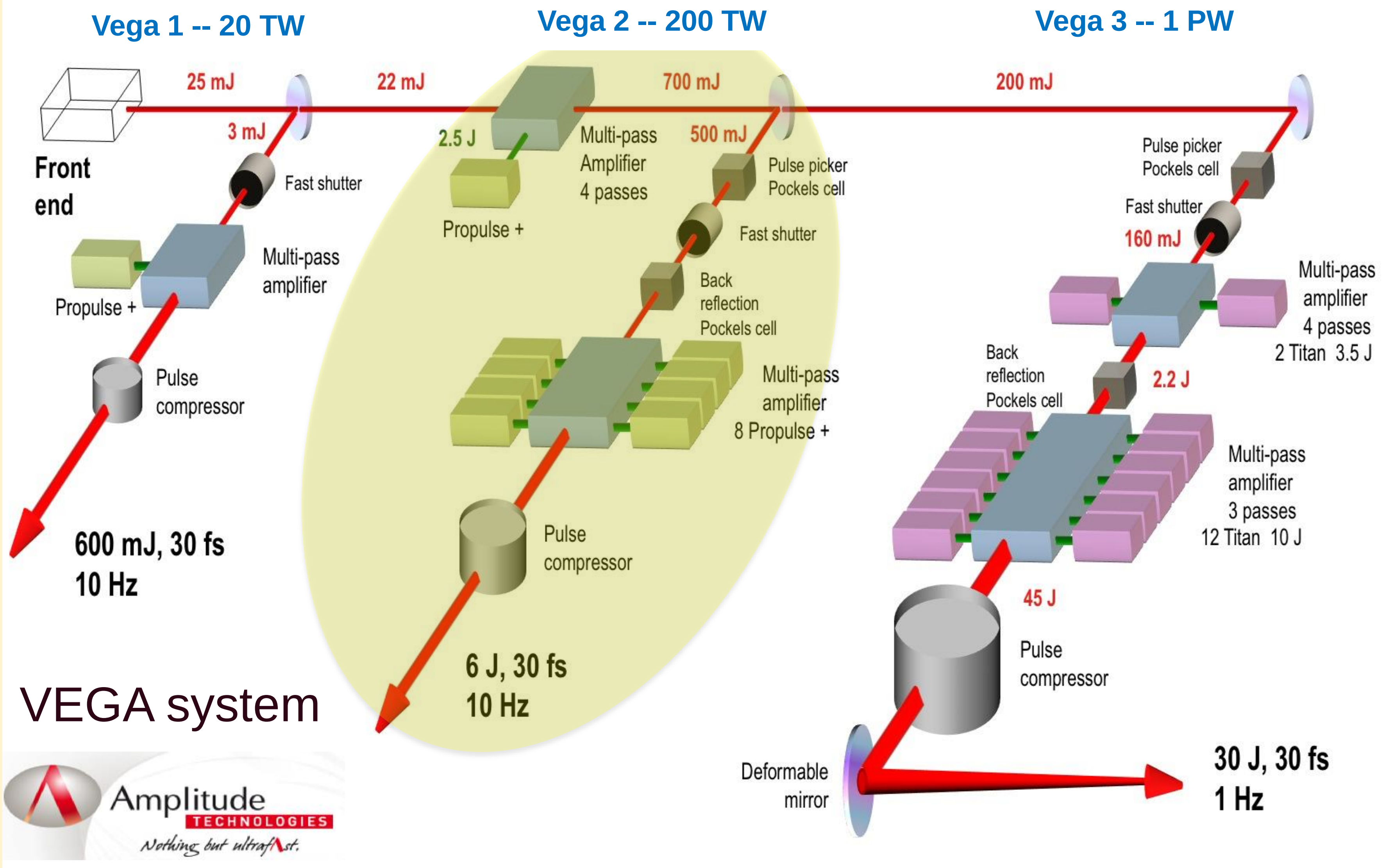
Centro de Investigaciones Ópticas
Más de 35 Años de Investigación en Ciencia y Tecnología
CONICET LA PLATA
COMISION DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS

Centro de Láser Pulsados Ultracortos (CLPU)
http://www.clpu.es/

Escalado de la técnica CPA para conseguir láseres de multi-TW (10^{12} W) y PW (10^{15} W)



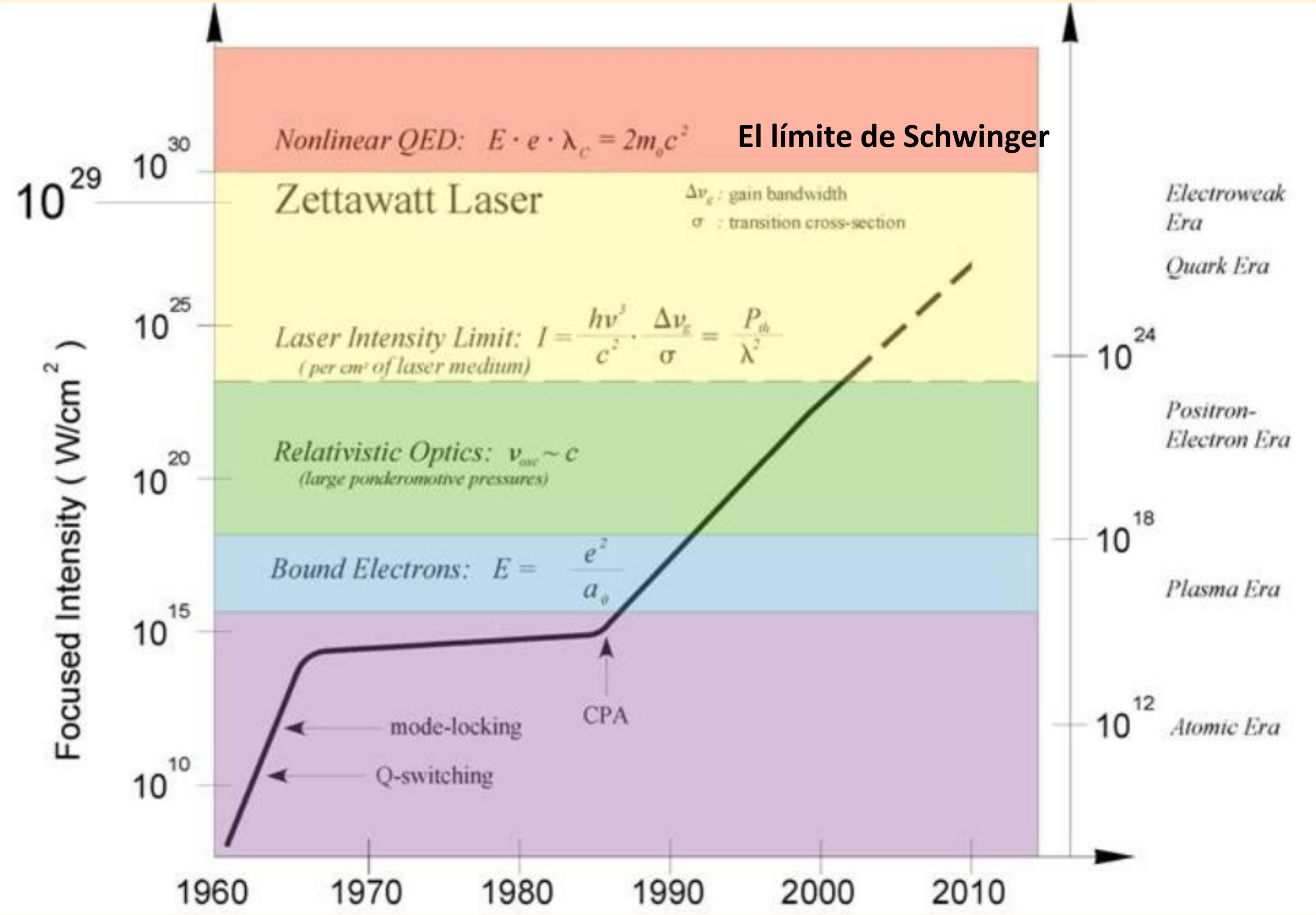
VEGA system



Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares

CLPU CENTRO DE LÁSERES PULSADOS

Progress in the Laser technology

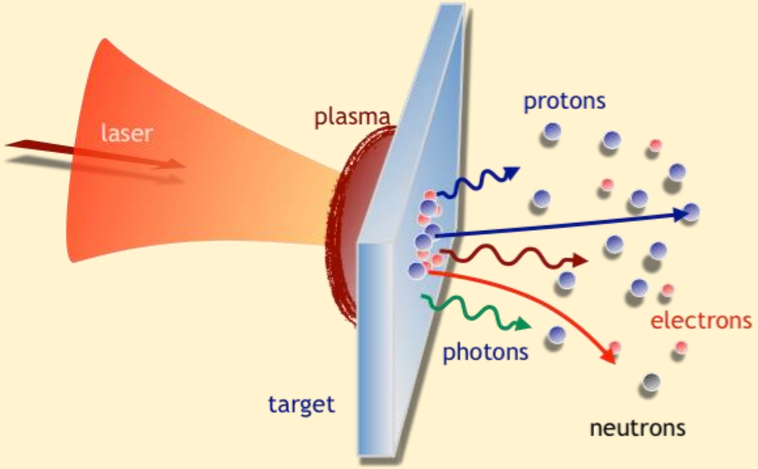


El límite de Schwinger

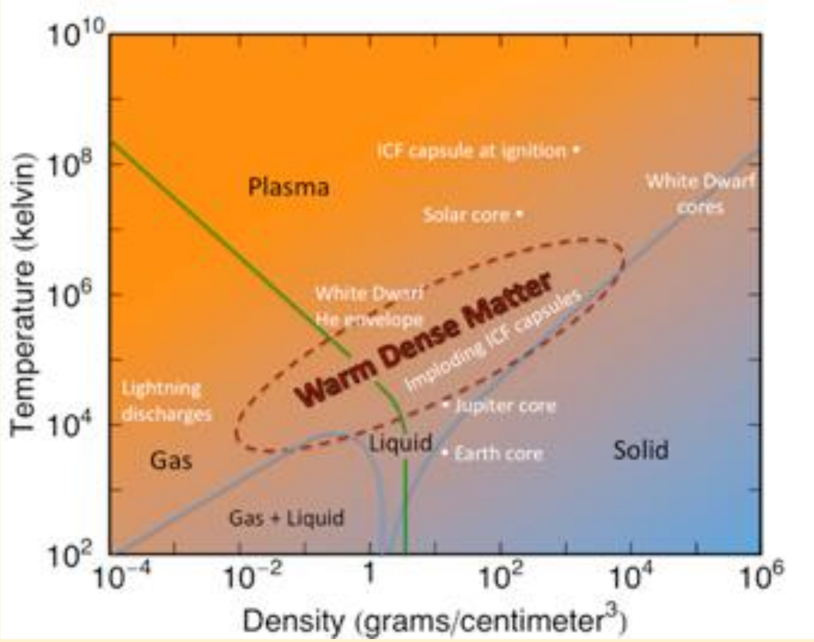
Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares

CLPU CENTRO DE LÁSERES PULSADOS

CLPU



Basic proton acceleration scheme



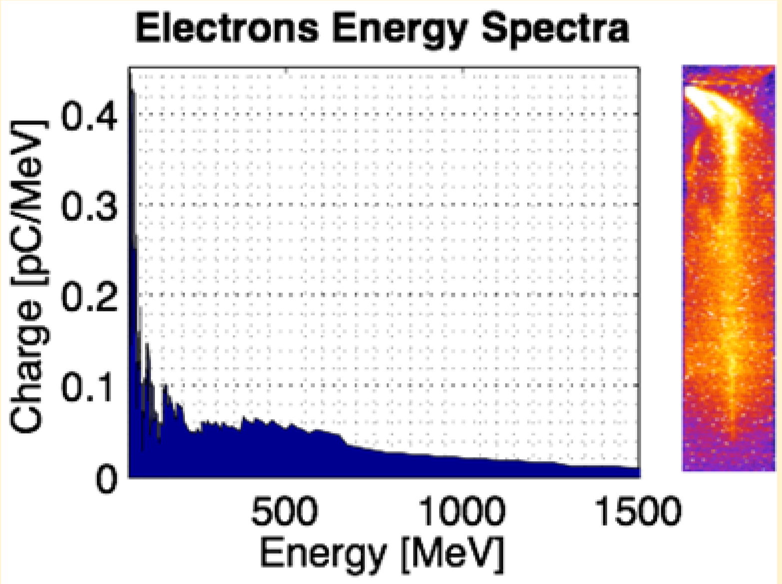
Two Main Lines

Under-Dense

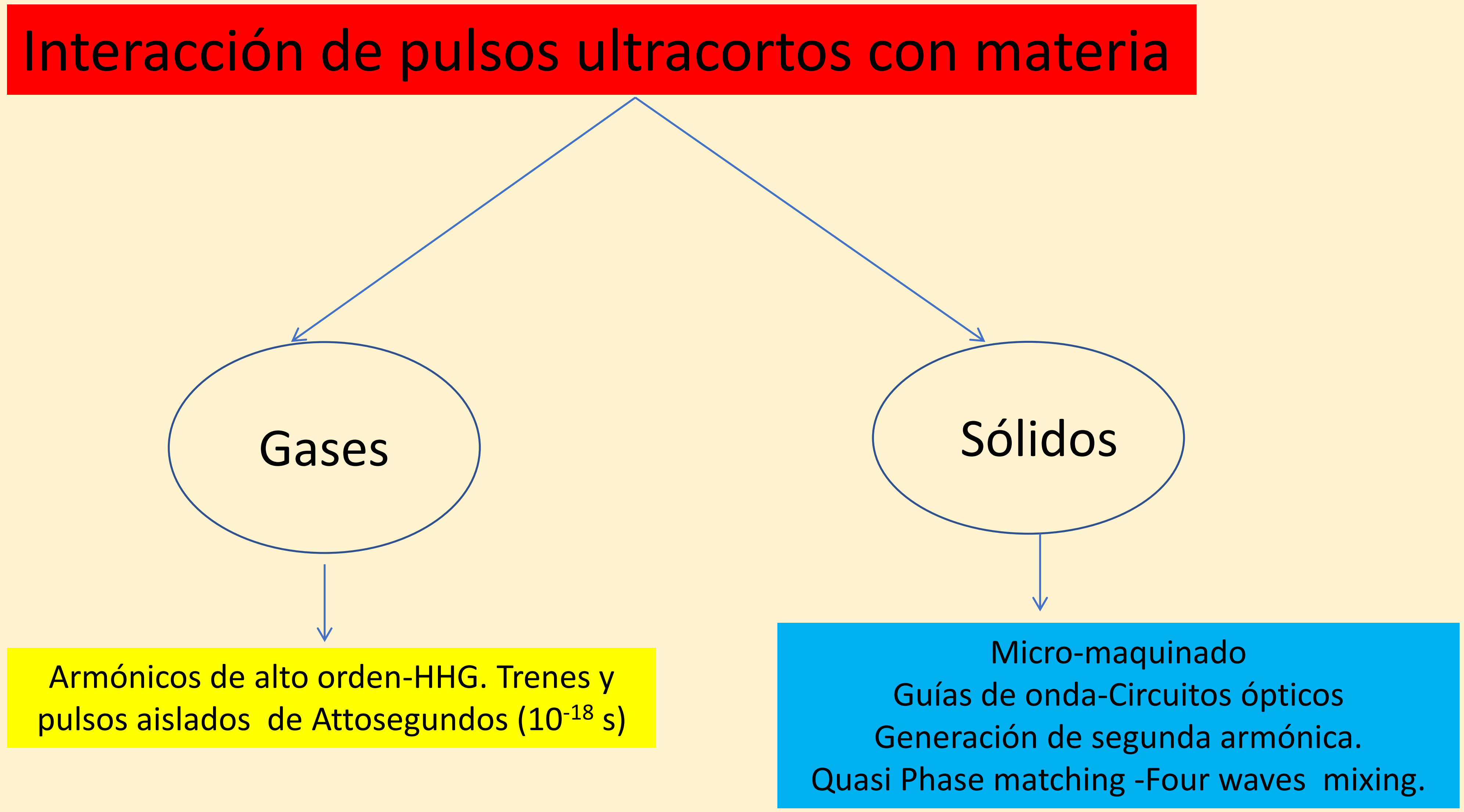
Electron/Betatron source for near edge spectroscopy of WDM

Over-Dense

Thin Al-foils for proton generation



Interacción de pulsos ultracortos con materia



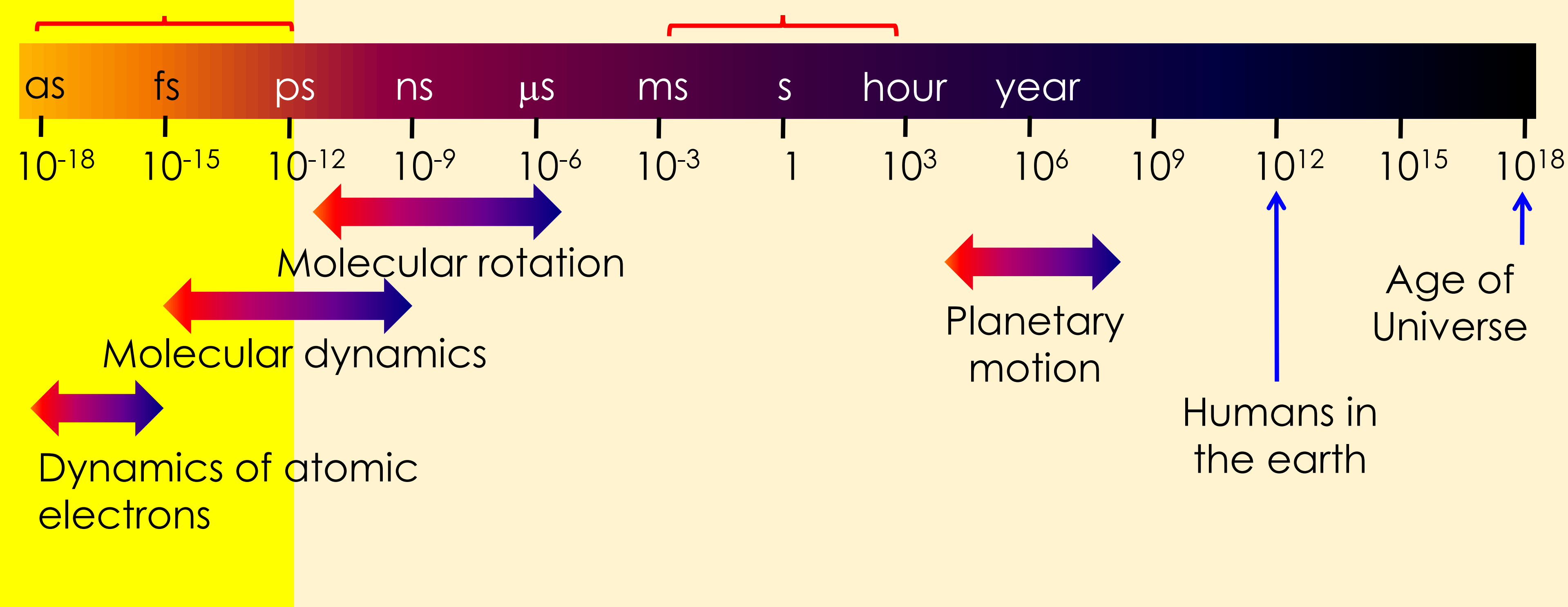
Gases

Armónicos de alto orden-HHG. Trenes y pulsos aislados de Attosegundos (10^{-18} s)

Sólidos

Micro-maquinado
Guías de onda-Circuitos ópticos
Generación de segunda armónica.
Quasi Phase matching -Four waves mixing.

Pulsos ultra-cortos....las escalas temporales



Ultrafast electronics

Flash lamp

ULTRASHORT PULSES

Human eye scale

Molecular rotation

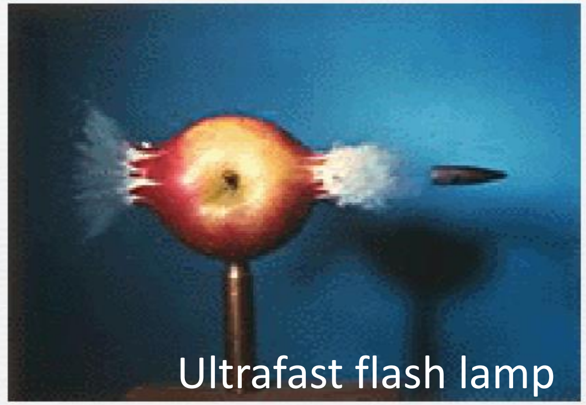
Molecular dynamics

Dynamics of atomic electrons

Planetary motion

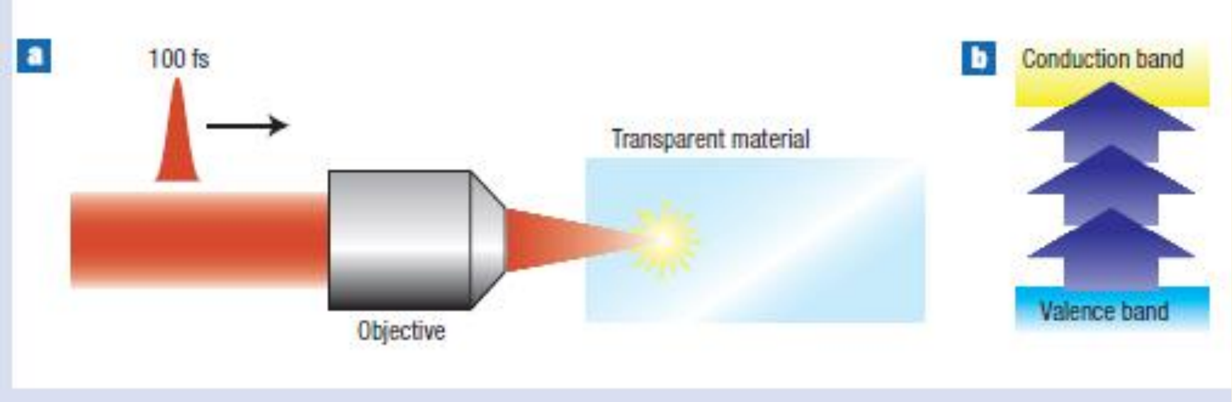
Humans in the earth

Age of Universe



Ultrafast flash lamp

2.Fundamentos del micro-mecanizado con pulsos ultracortos en dieléctricos



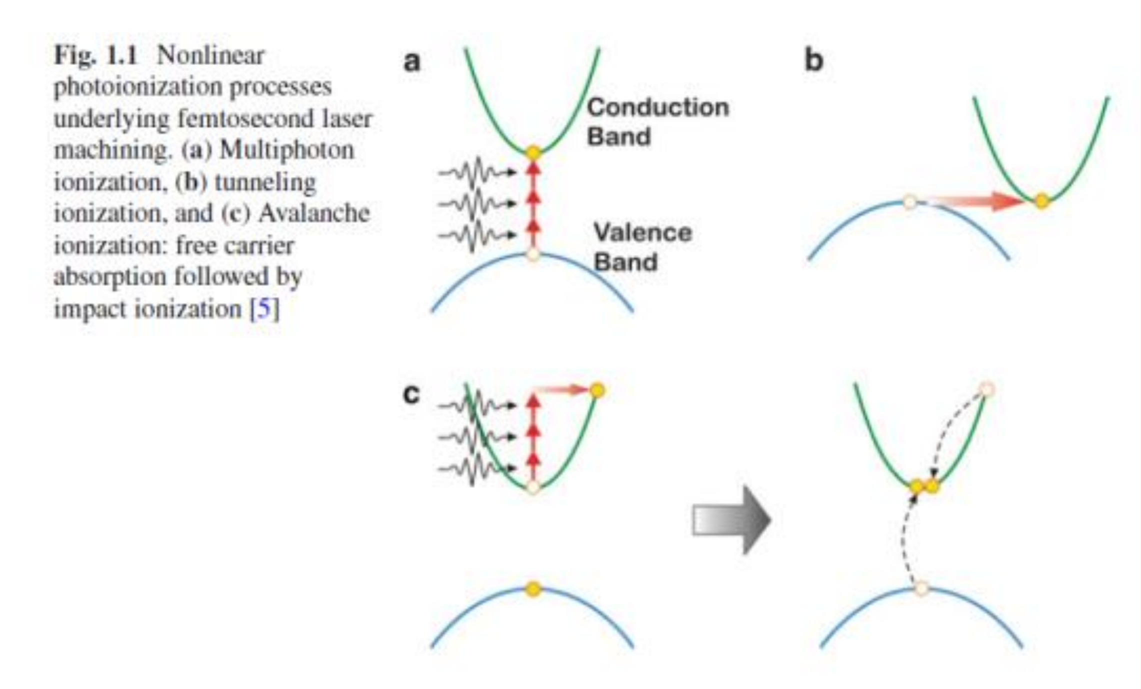


Fig. 1.1 Nonlinear photoionization processes underlying femtosecond laser machining. (a) Multiphoton ionization, (b) tunneling ionization, and (c) Avalanche ionization: free carrier absorption followed by impact ionization [5]

Intensidades de radiación para el tipo de ionización

Parámetro de Keldish (γ) > >>1 ⟶ regimen multi-fotónico
Parámétro de Keldish (γ) <<< 1 ⟶ regimen de túnel

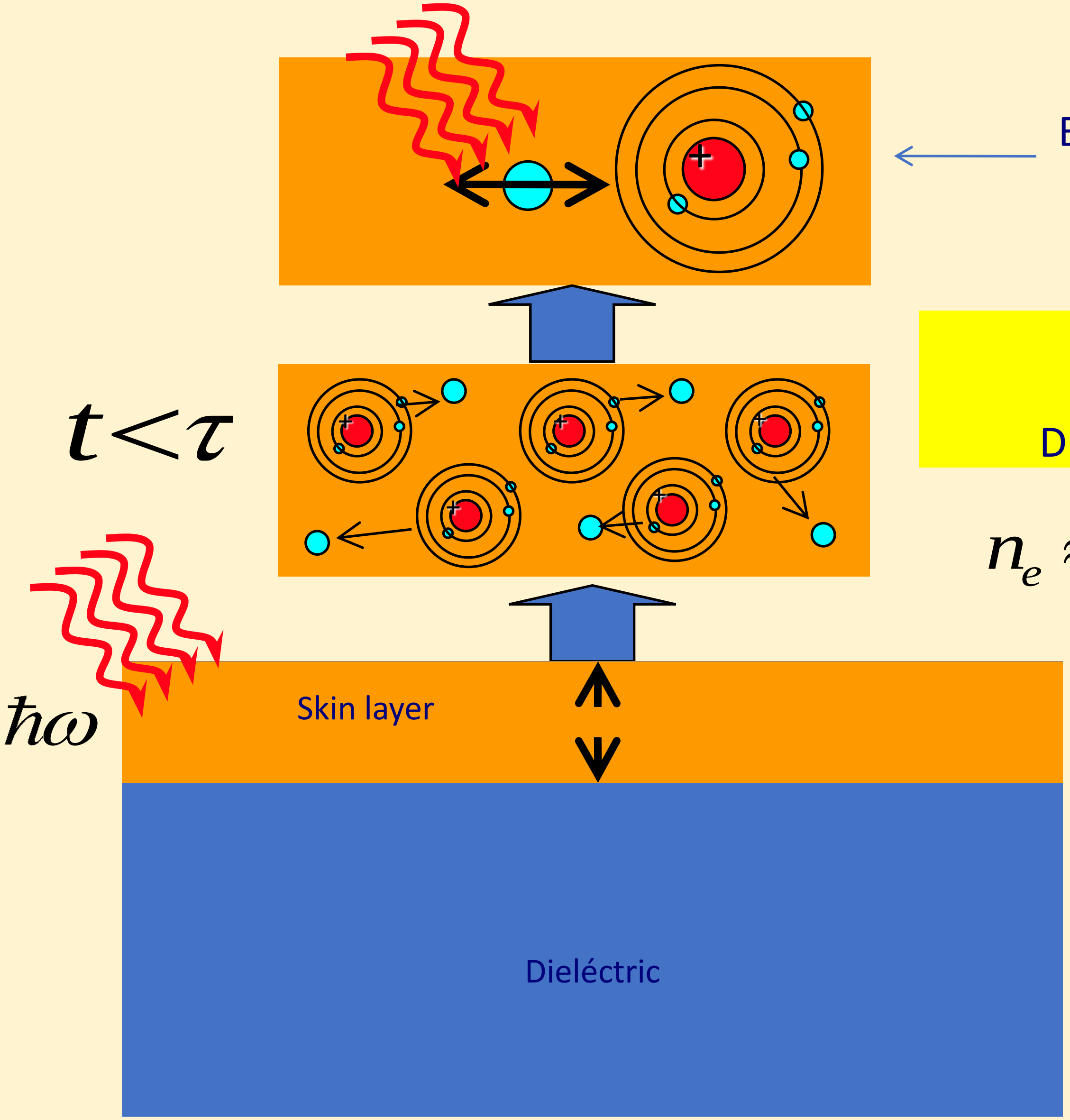
$$\gamma = \frac{\omega}{e}\sqrt{\frac{m_e c n \epsilon_0 E_g}{I}}$$

Para un laser de 800 nm, esto corresponde :

Ionización Multi-fotónica , I < 10^{12} W/cm^2

Ionización Túnel , I > 10^{14} W/cm^2

Pictorical representation of ablation under fs regime



Bremsstrahlung

inverse

$t<\tau$

Full Ionización

Dielectrics ~ Metal

$$n_e \approx n_{ion} \sim 10^{23}\,\mathrm{cm}^{-3}$$

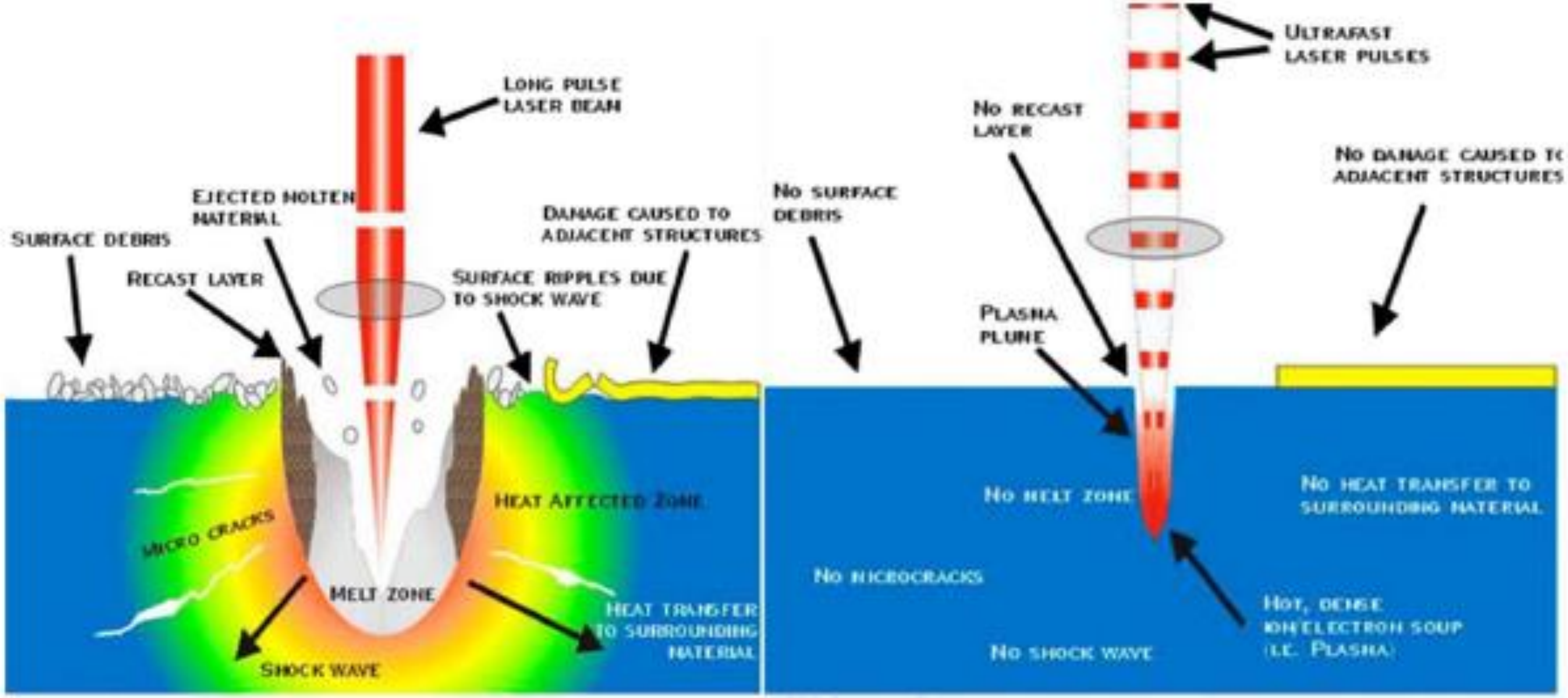
$\hbar\omega$

Skin layer

$c/\omega k$

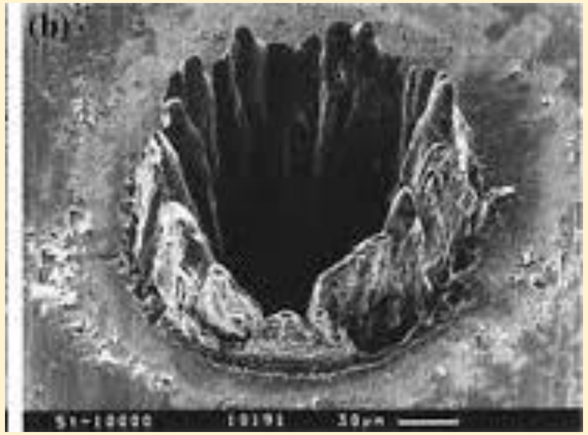
Dieléctric

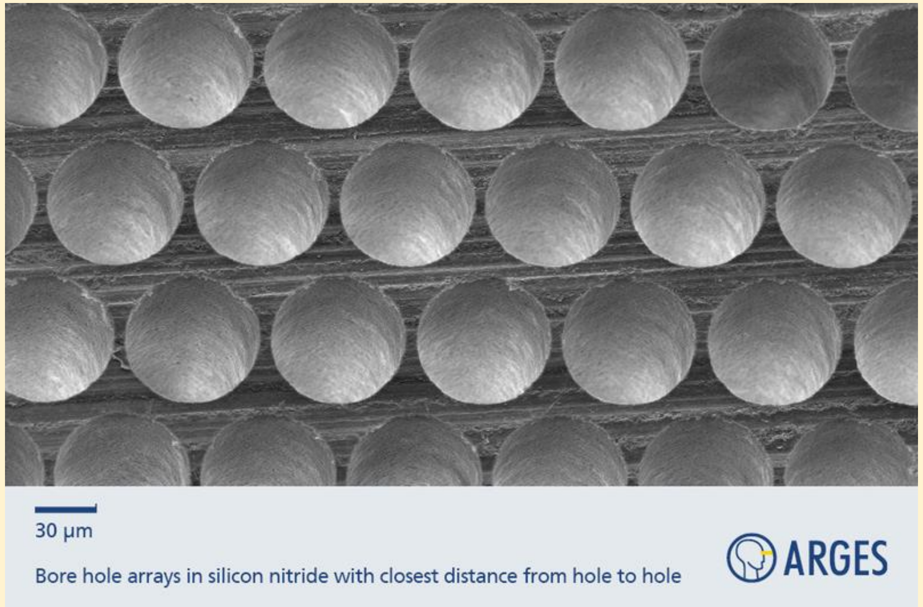
$n = n + i\,k$



Comparison of the ns-ablation (left) [37] and the fs-ablation (right) [35] processes. In machining or surgery applications, the thermal effects in ns ablation can lead to a larger heat-affected zone, more collateral damage, and less precise machining compared to fs ablation. Each figure used with permission from Clark-MXR, Inc.

Ablación con nanosegundos

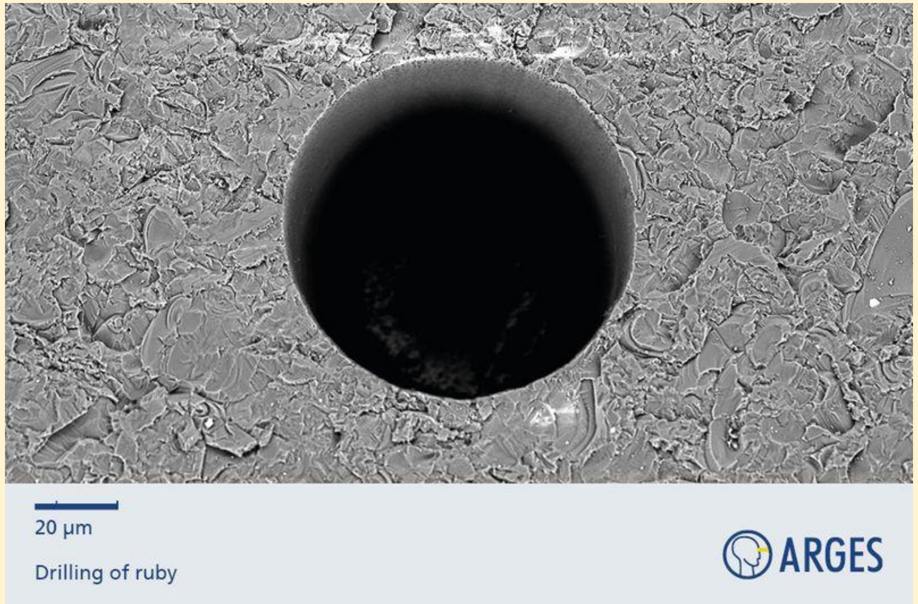




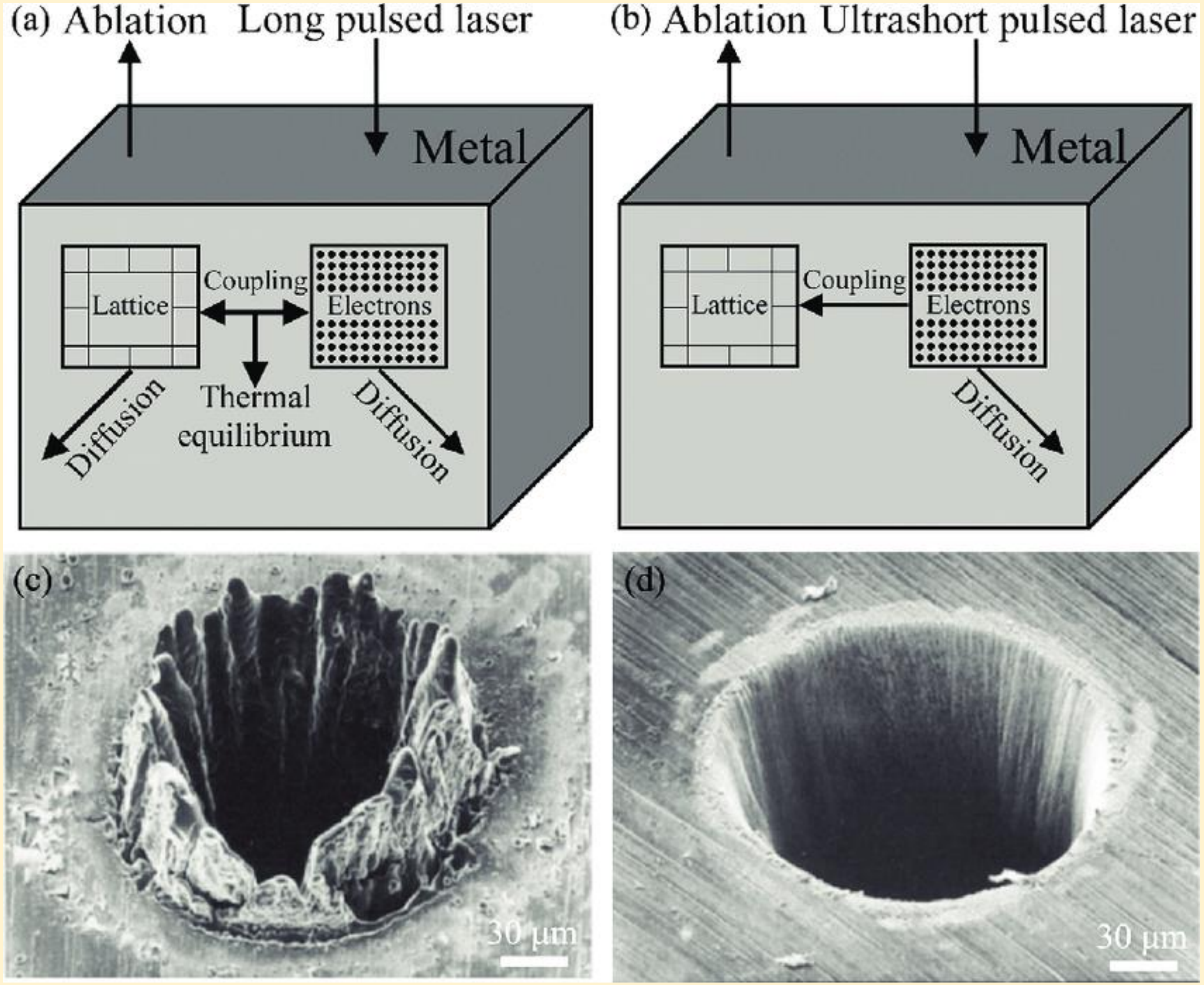
Bore hole arrays in silicon nitride with closest distance from hole to hole

Micro perforaciones en Silicio con fs

Micro perforación en Rubí con fs



Drilling of ruby



•Manipulation of Tribological Properties of Metals by Ultrashort Pulsed Laser Micro-/Nanostructuring, Quanzhong Zhao, Zhuo Wang. 2016,DOI: 10.5772/64764

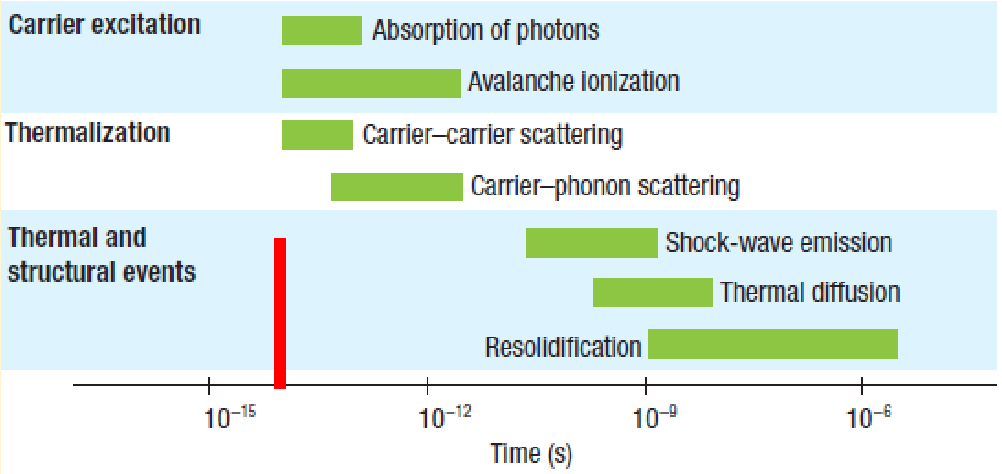
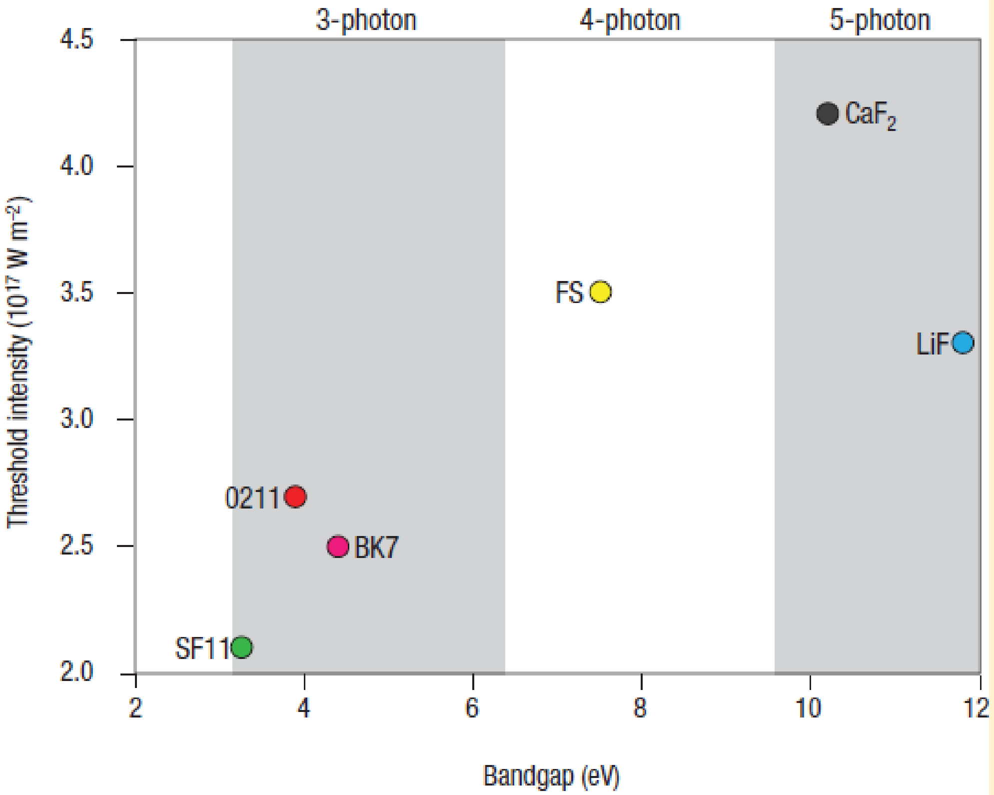
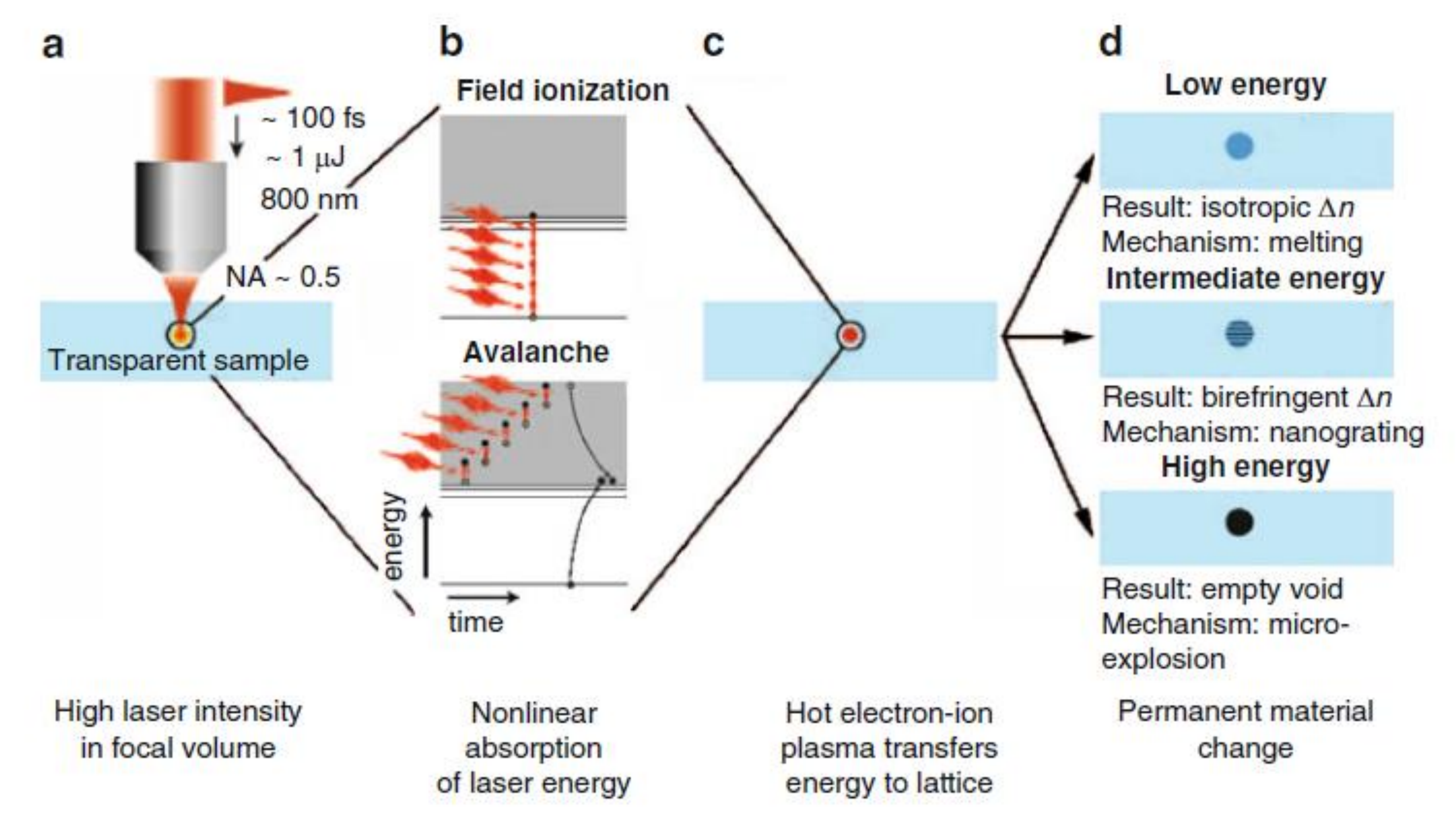


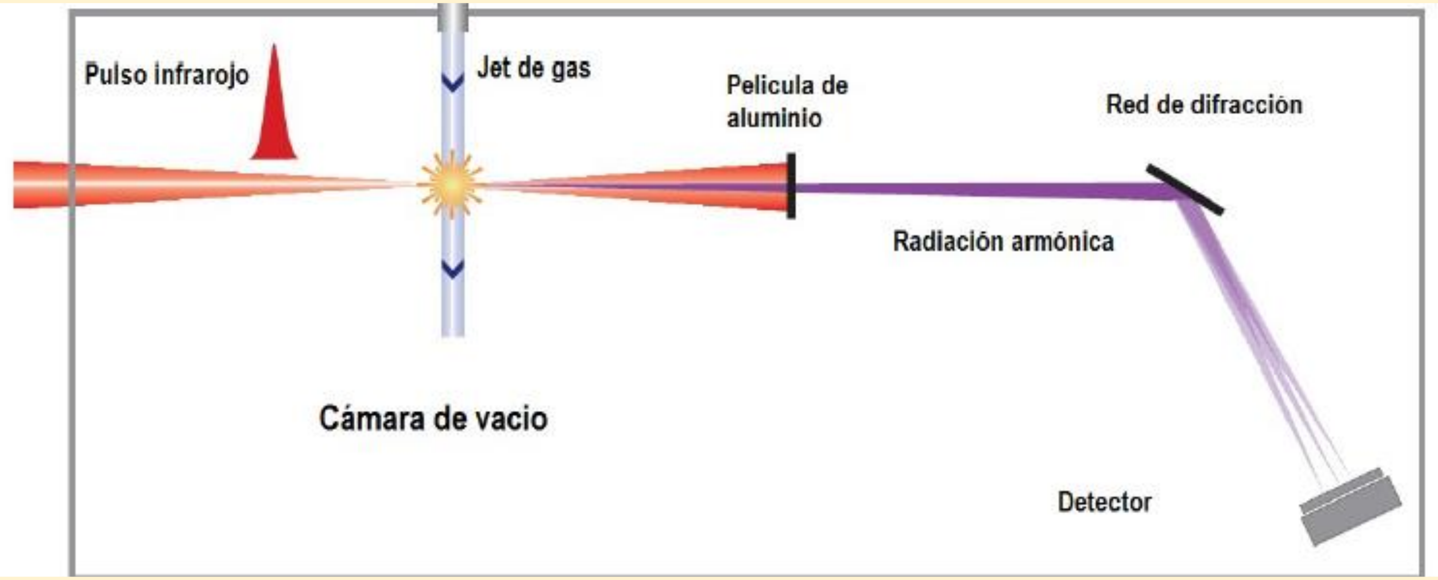
Figure 1 Timescale of the physical phenomena associated with the interaction of a femtosecond laser pulse with transparent materials. The green bars represent typical timescales for the relevant process. Note that although the absorption of light occurs at the femtosecond timescale, the material can continue to undergo changes microseconds later.

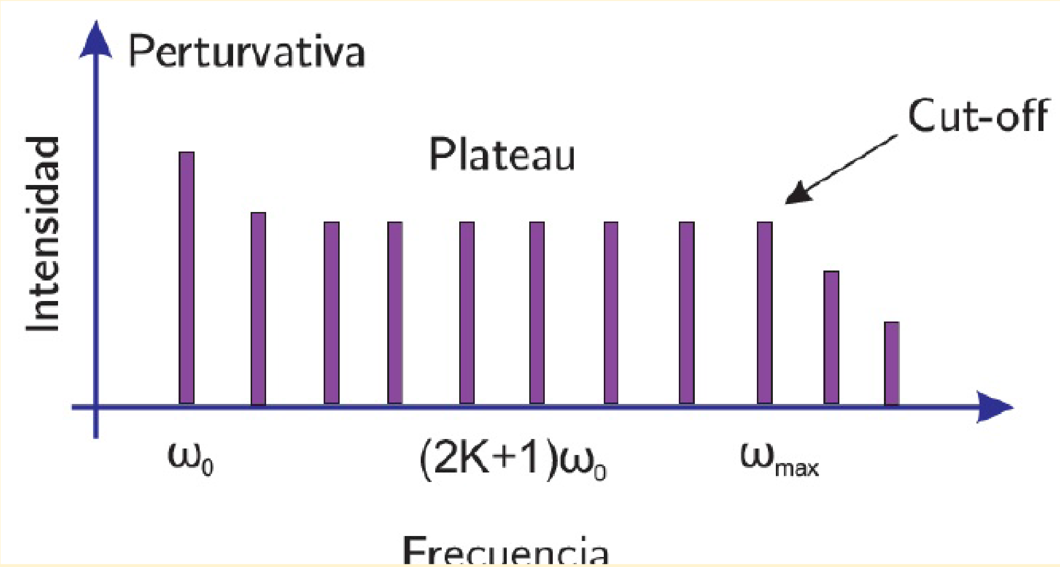


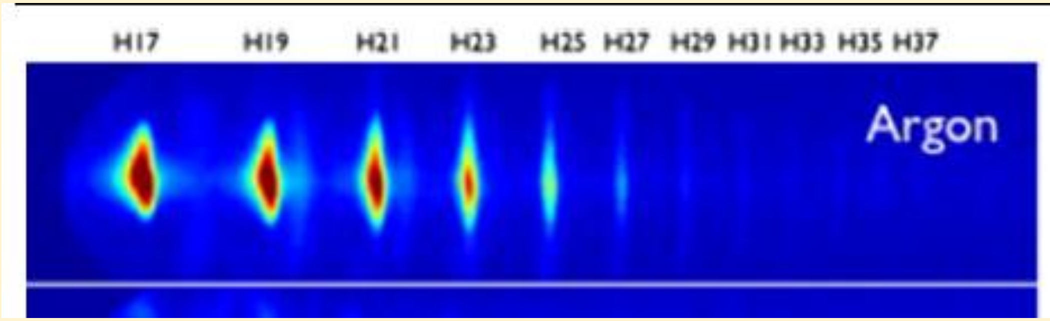
El proceso de ionización accionado por pulsos ultracortos es indistinto del material utilizado, ya que por un lado existen una gran cantidad de fotones disponibles para la absorción multi-fotónica y por otro lado el campo eléctrico del láser es intenso para modificar el potencial de los átomos


a
~ 100 fs
~ 1 μJ
800 nm
NA ~ 0.5
Transparent sample
b
Field ionization
Avalanche
energy
time
c
d
Low energy
Result: isotropic Δn
Mechanism: melting
Intermediate energy
Result: birefringent Δn
Mechanism: nanograting
High energy
Result: empty void
Mechanism: micro-explosion
High laser intensity in focal volume
Nonlinear absorption of laser energy
Hot electron-ion plasma transfers energy to lattice
Permanent material change

Gases nobles-Armónicos de alto orden (HHG)



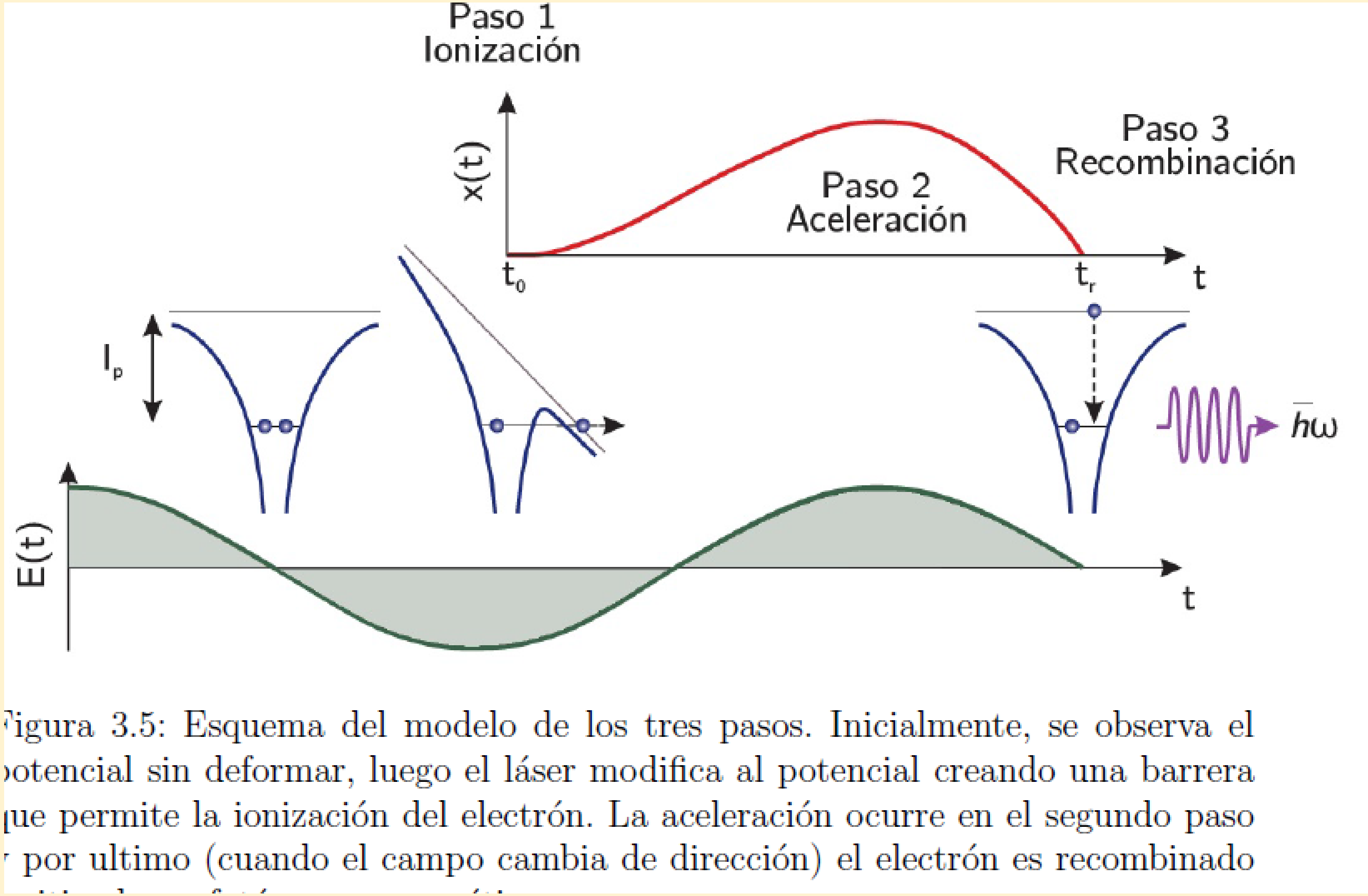




Eficiencia del proceso escala con λ^{-5}
Cut-off escala con λ^{2}

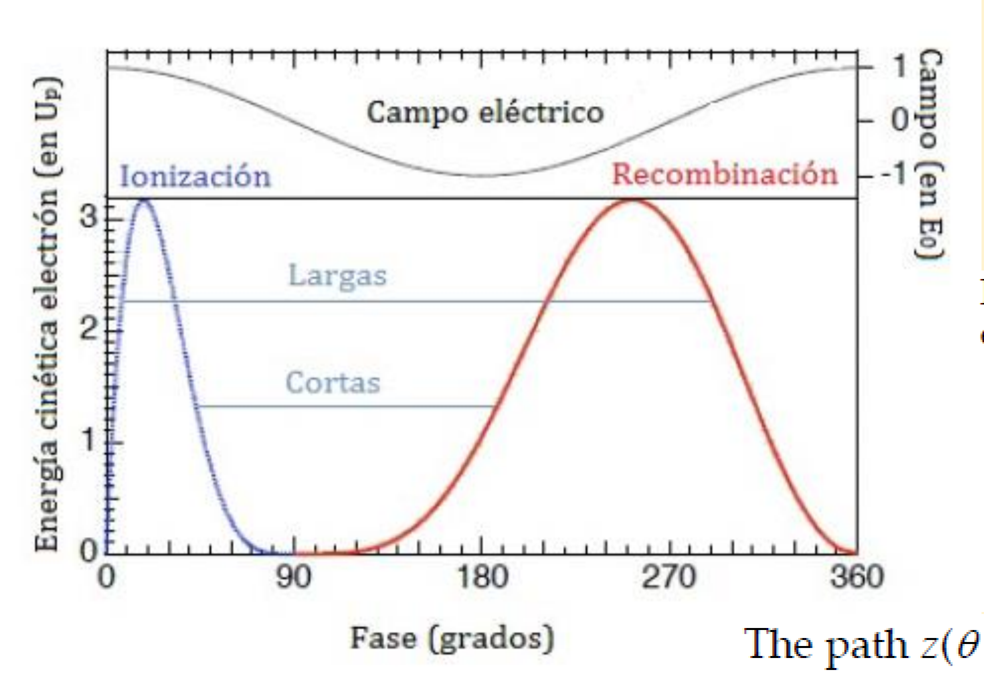
Modelo de los tres pasos-semiclásico

En 1993, Corkum y por otro lado Kulander y Schafer



igura 3.5: Esquema del modelo de los tres pasos. Inicialmente, se observa el otencial sin deformar, luego el láser modifica al potencial creando una barrera ue permite la ionización del electrón. La aceleración ocurre en el segundo paso por ultimo (cuando el campo cambia de dirección) el electrón es recombinado

Trayectorias de los electrones



$$U_P = \frac{E_0^2}{4\omega_0^2}$$

$$E(t) = E_0 cos(\omega_0 t)$$

$$\ddot{z}(t) = -\frac{eE_0}{m} cos(\omega_0 t)$$

For a given value of E_{kin}, we can view θ_i and θ_r as the solutions of the following coupled equations:

$$(\cos\theta_r - \cos\theta_i) + (\theta_r - \theta_i)\sin\theta_i = 0, \qquad (8)$$

$$(\sin\theta_r - \sin\theta_i)^2 = \frac{E_{kin}}{2U_p} \qquad (9)$$

The path $z(\theta)$ that the electron takes from $\theta = \theta_i$ to θ_r is called *trajectory*. We notice that there are two trajectories for a given kinetic energy below $3.17U_p$, $17° < \theta_i < 90°$, $90° < \theta_r < 255°$ for the one trajectory, and $0° < \theta_i < 17°$, $255° < \theta_r < 360°$ for the other. The former is called *short* trajectory, and the latter *long* trajectory.

If (θ_i, θ_r) is a pair of solutions of Equations 8 and 9, $(\theta_i + m\pi, \theta_r + m\pi)$ are also solutions, where m is an integer. If we denote $z(\theta)$ associated with m as $z_m(\theta)$, we find that $z_m(\theta) = (-1)^m z_{m=0}(\theta - m\pi)$. This implies that the harmonics are emitted each half cycle with an alternating phase, i.e., field direction in such a way that the harmonic field $E_h(t)$ can be expressed in the following form:

$$E_h(t) = \cdots + F_h(t + 2\pi/\omega_0) - F_h(t + \pi/\omega_0) + F_h(t) - F_h(t - \pi/\omega_0) + F_h(t - 2\pi/\omega_0) - \cdots. \qquad (10)$$

One can show that the Fourier transform of Equation 10 takes nonzero values only at odd multiples of ω_0. This observation explains why the harmonic spectrum is composed of odd-order components.

Generación de pulsos de Attosegundos

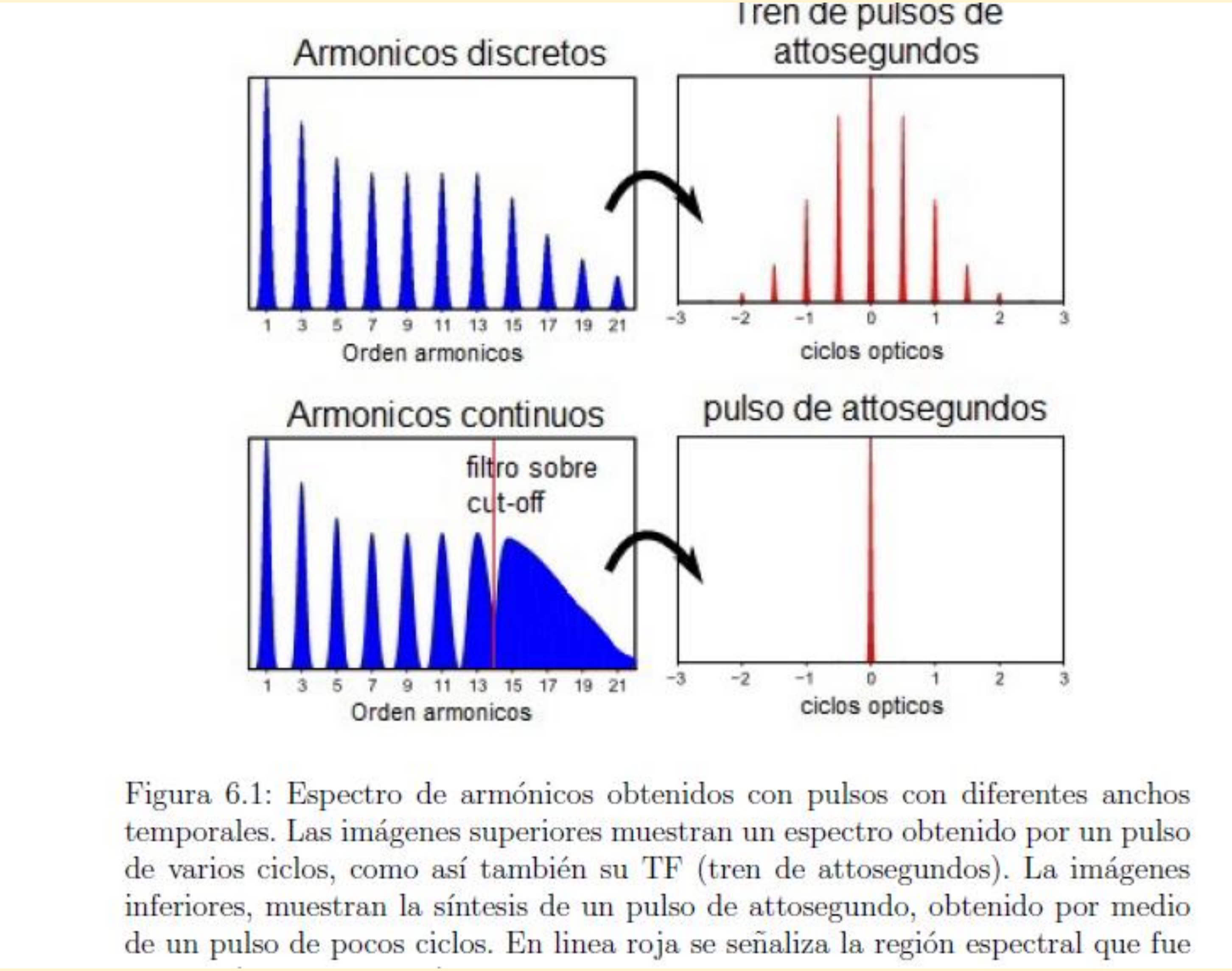
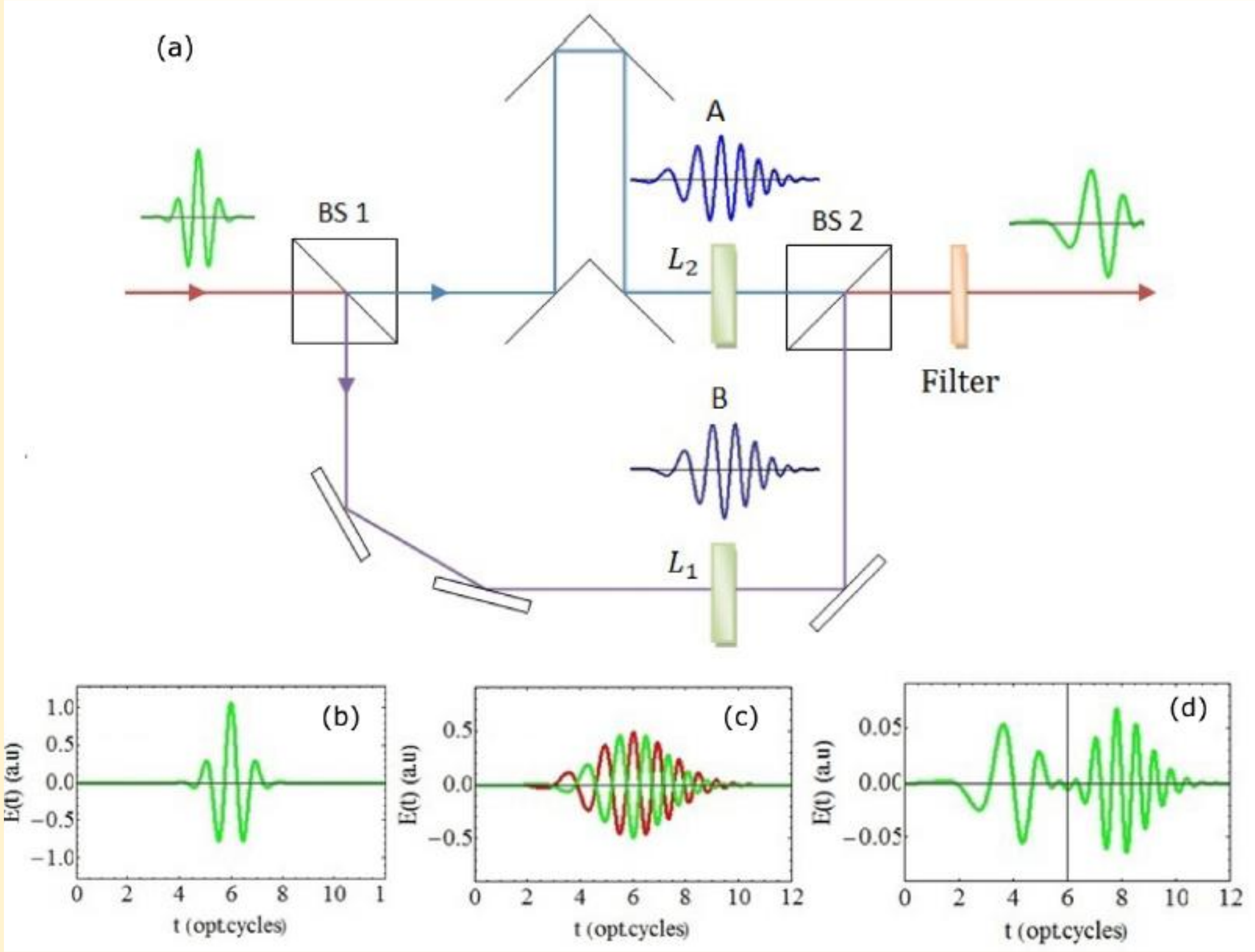
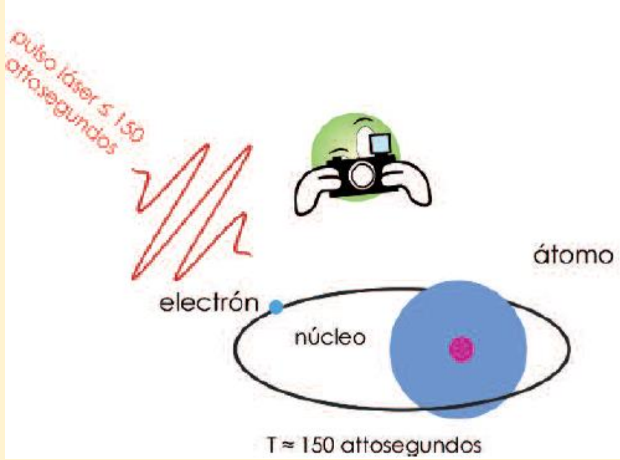


Figura 6.1: Espectro de armónicos obtenidos con pulsos con diferentes anchos temporales. Las imágenes superiores muestran un espectro obtenido por un pulso de varios ciclos, como así también su TF (tren de attosegundos). La imágenes inferiores, muestran la síntesis de un pulso de attosegundo, obtenido por medio de un pulso de pocos ciclos. En linea roja se señaliza la región espectral que fue

"Armónicos de alto orden generados por interacción de pulsos ultracortos con sistemas gaseosos", Enrique Neyra, Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, 2017.

Generación de Pulsos de Attosegundos



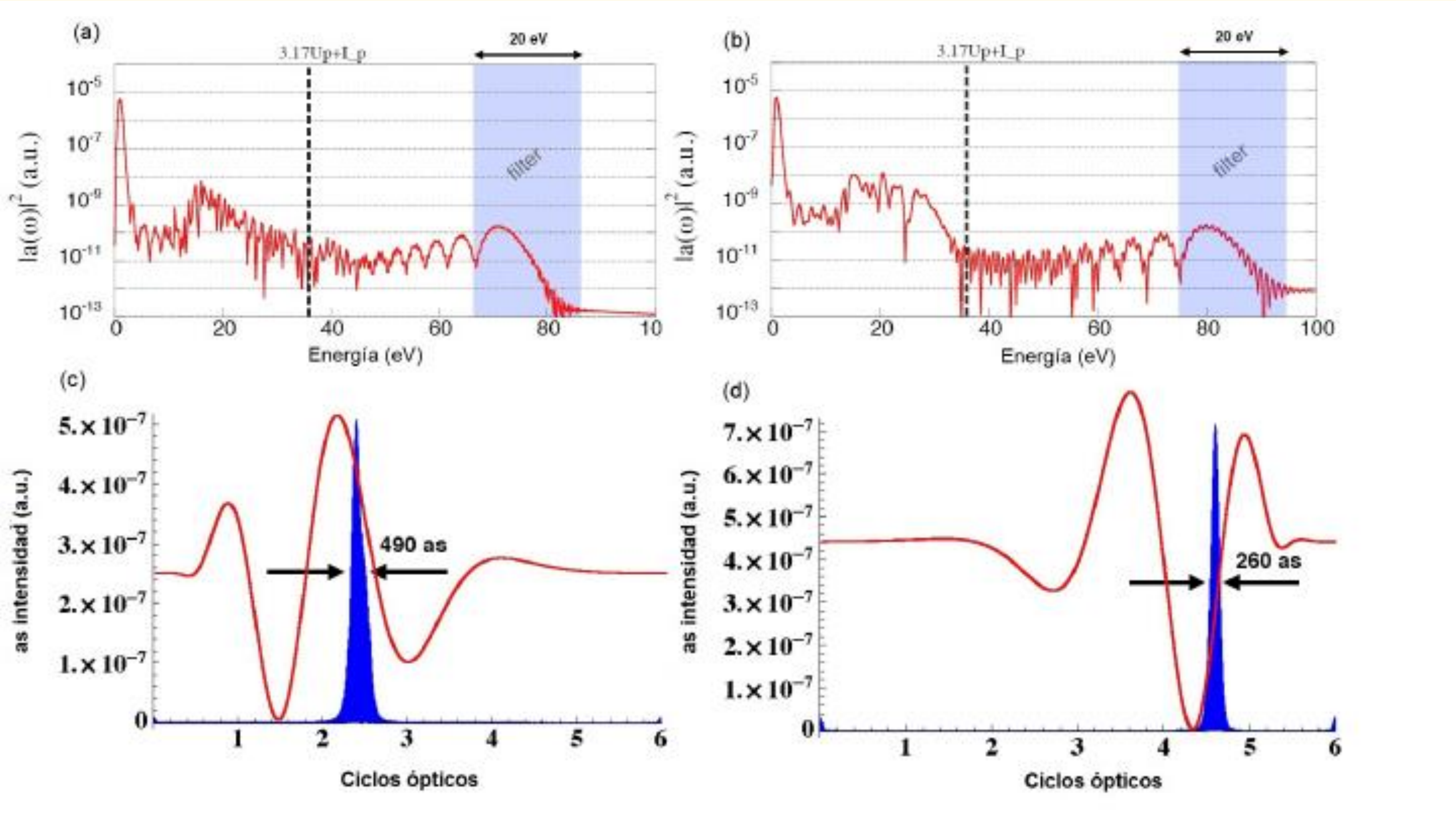


Synthesis of ultrashort laser pulses for high-order harmonic generation, E. Neyra, F. Videla, M. F. Ciappina, J. A. Pérez-Hernández, L. Roso, and G. A. Torchia, Phys. Rev. A **98**, 013403 – 2018

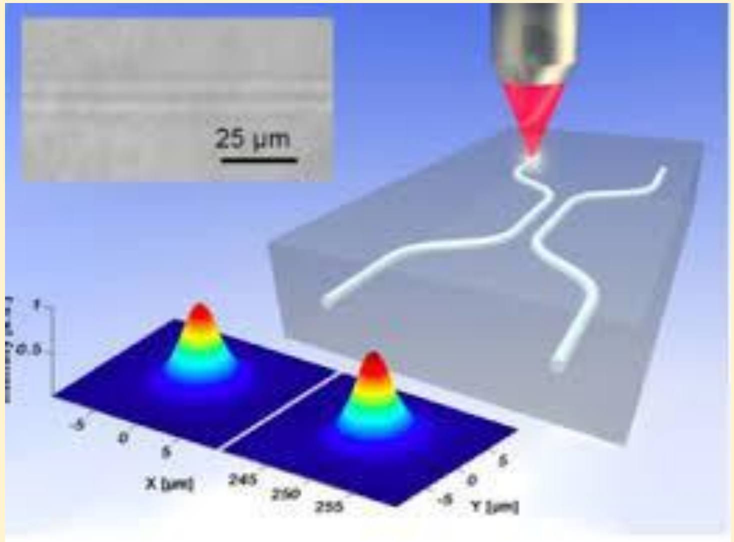
Pulsos de Attosegundos

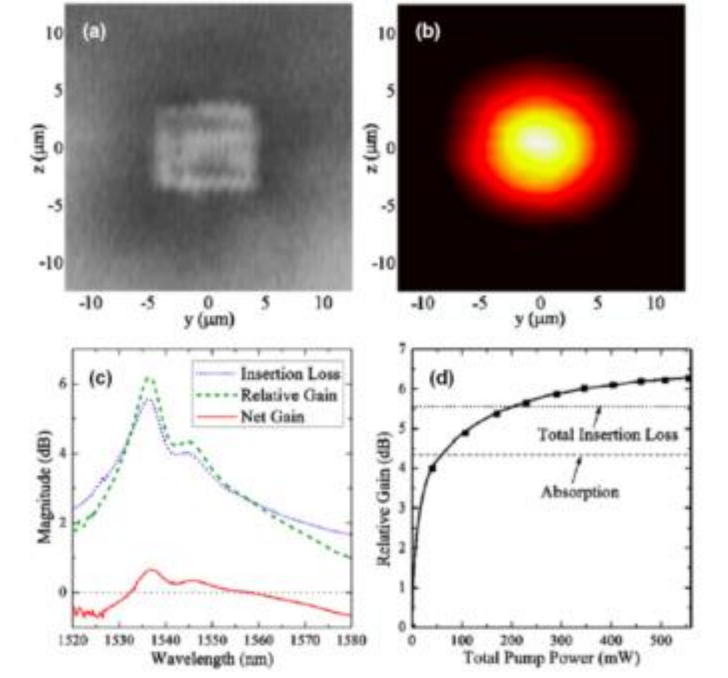
Temporal Dependence Schrodinger Equation (TDSE-3D)

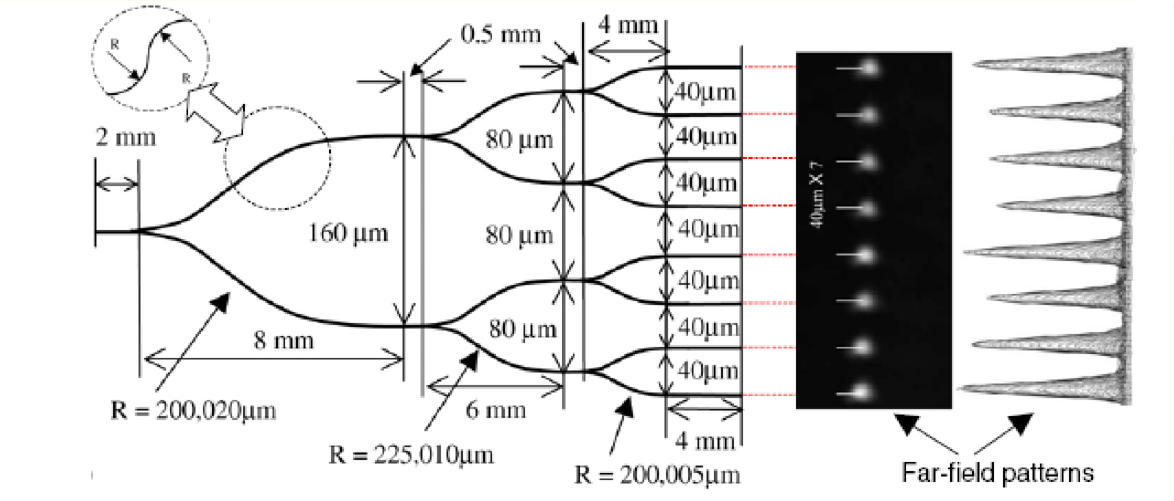
Single-Active-Electron Approximation (SAE).

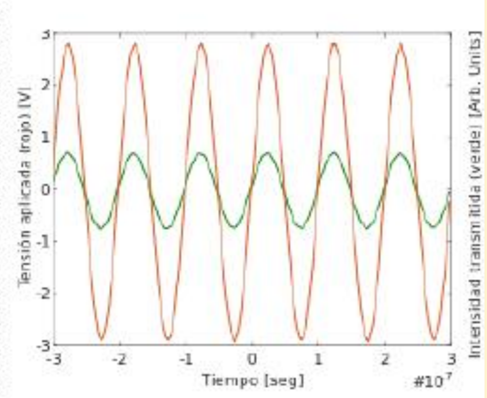


Sólidos- Modificación del índice de refracción en materiales dieléctricos-Guías de onda-Circuitos ópticos.

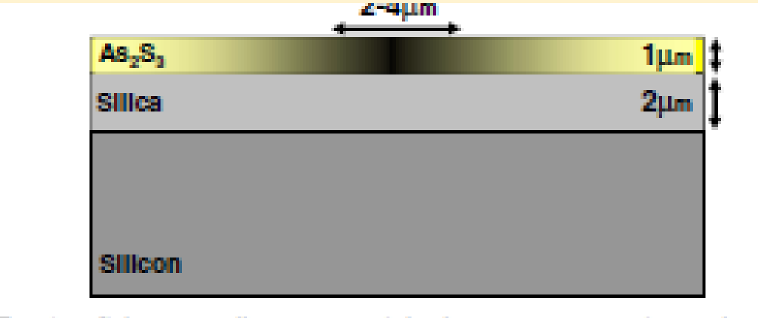


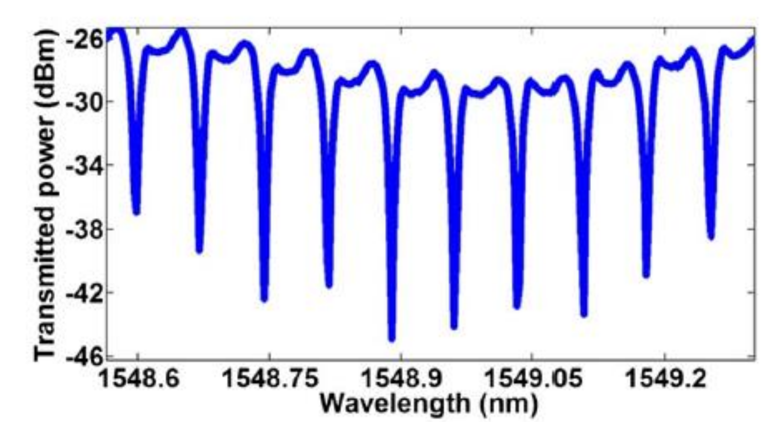




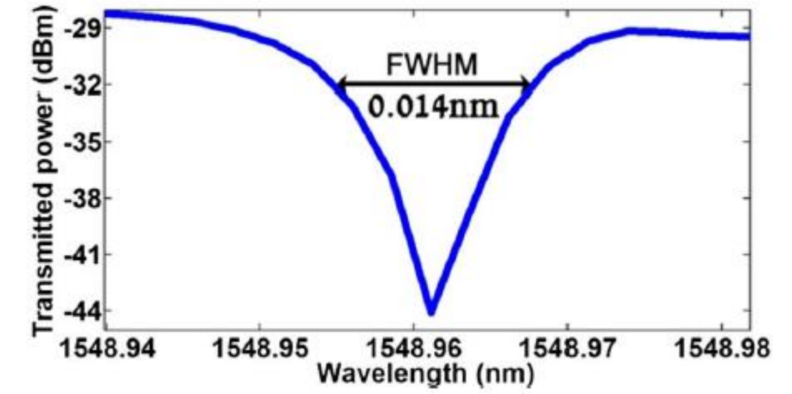


Anillo resonador en As_2S_3

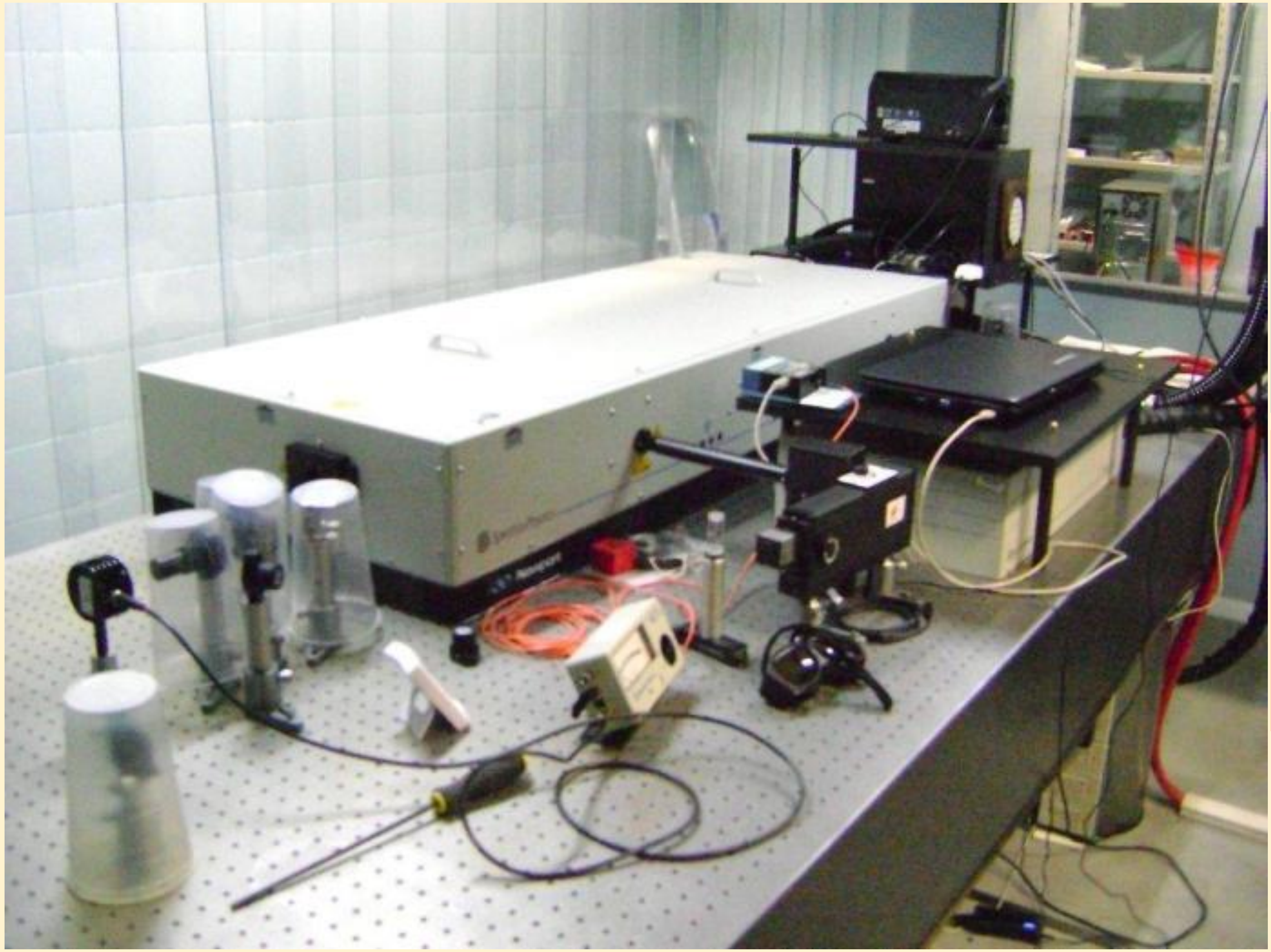




5. Top-view microscope image of parts of bus and ring wa
les, directly written in a thin layer of As_2S_3.



3. Sistema experimental. Láser CPA del CIOp.



MAITAI+
Spitfire
Spectra
Physics

-120 fs
-1 kHz
- Hasta 1 mJ de energía por pulso

Esquema experimental utilizado para fabricar los circuitos ópticos con pulsos laser de femtosegundos

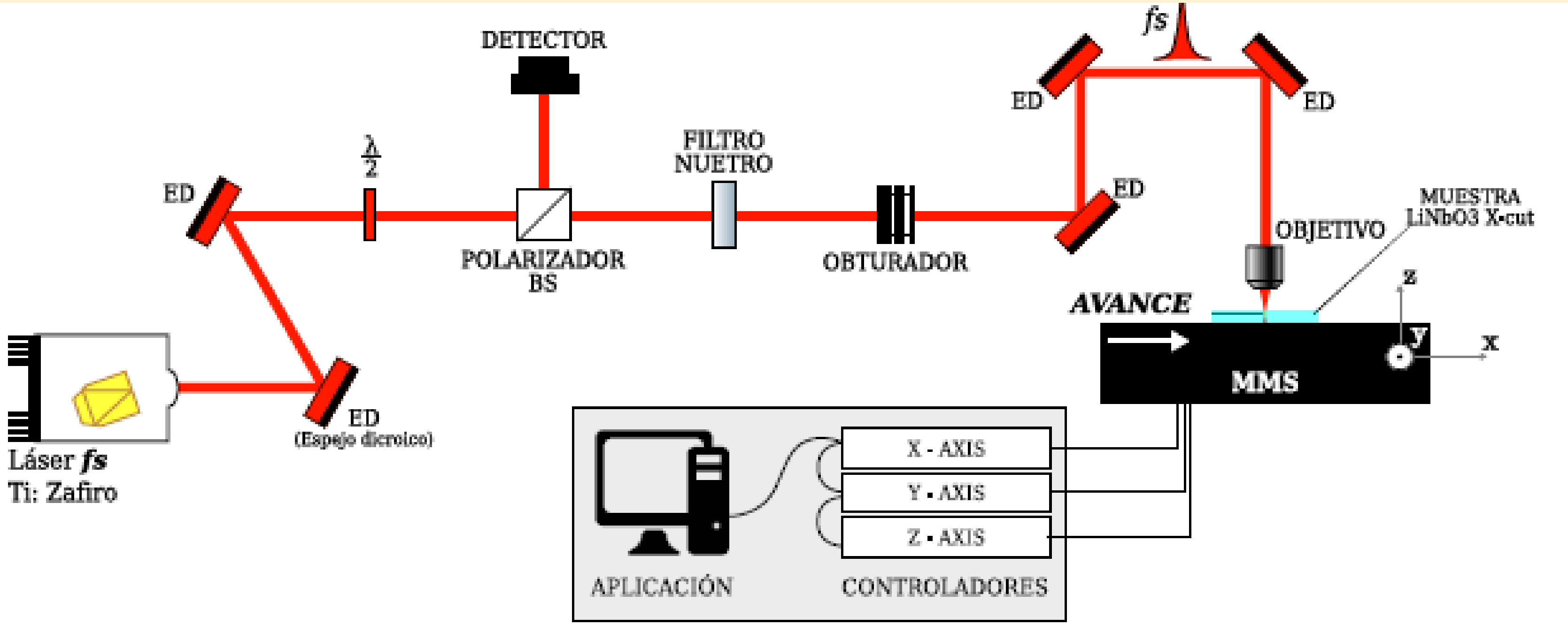
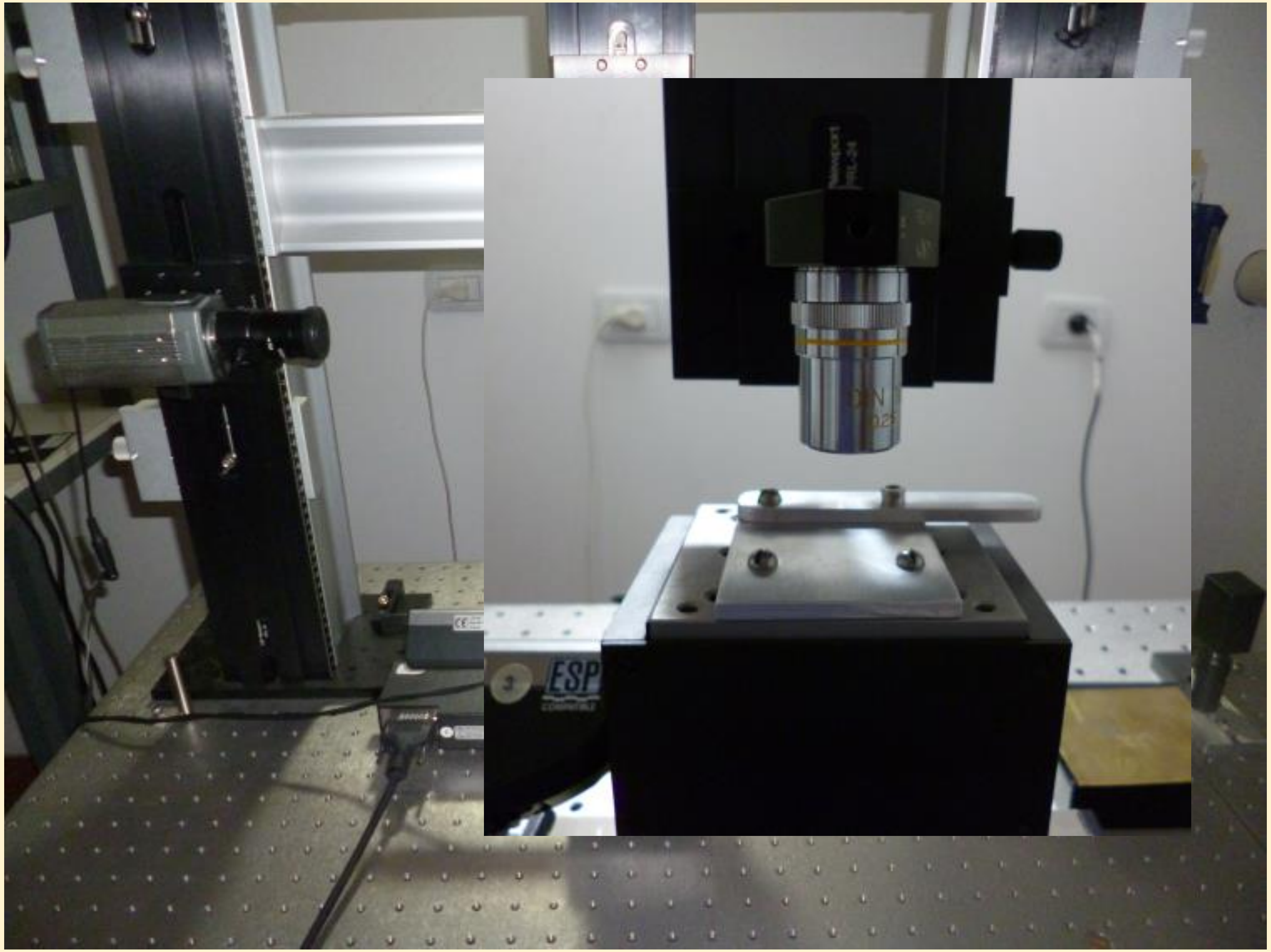
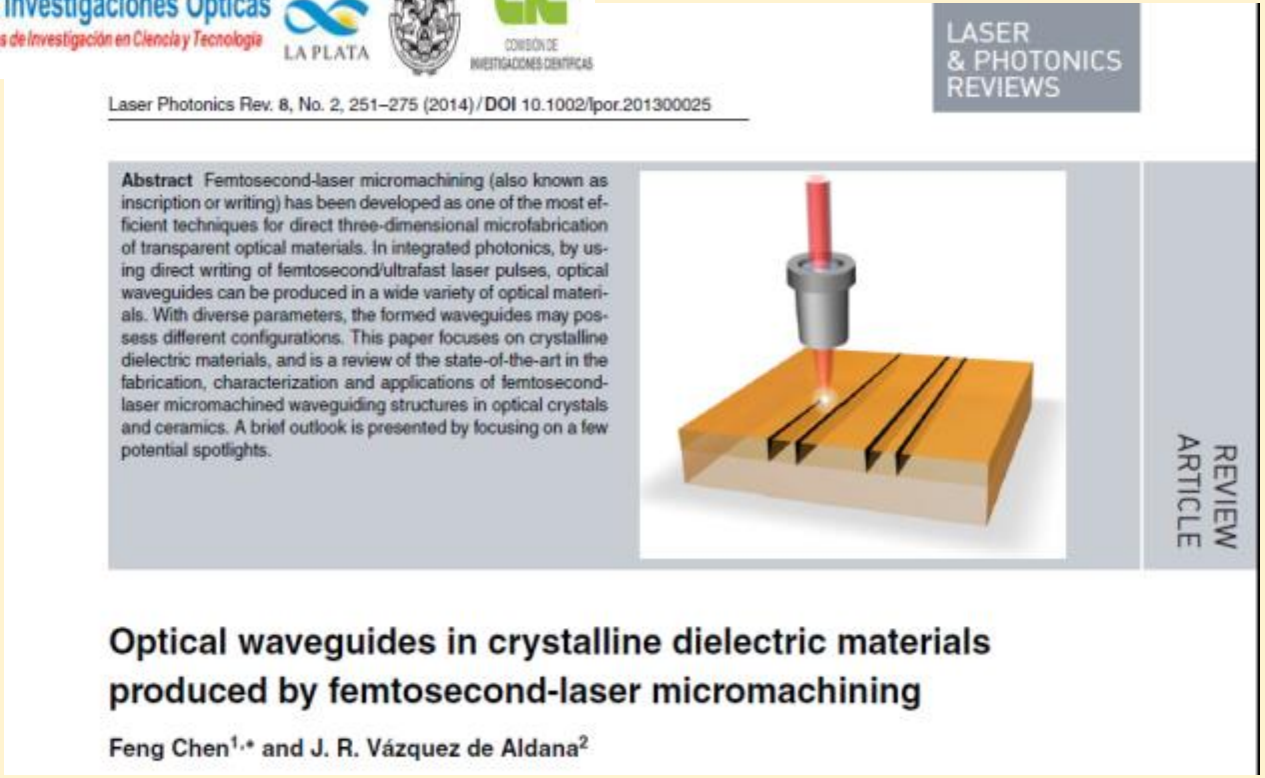


Figura 1: Sistema de escritura directa con pulsos láser de femtoseundos

Estación de micromecanizado





LASER & PHOTONICS REVIEWS

Laser Photonics Rev. 8, No. 2, 251–275 (2014) / **DOI** 10.1002/lpor.201300025

Abstract Femtosecond-laser micromachining (also known as inscription or writing) has been developed as one of the most efficient techniques for direct three-dimensional microfabrication of transparent optical materials. In integrated photonics, by using direct writing of femtosecond/ultrafast laser pulses, optical waveguides can be produced in a wide variety of optical materials. With diverse parameters, the formed waveguides may possess different configurations. This paper focuses on crystalline dielectric materials, and is a review of the state-of-the-art in the fabrication, characterization and applications of femtosecond-laser micromachined waveguiding structures in optical crystals and ceramics. A brief outlook is presented by focusing on a few potential spotlights.

REVIEW ARTICLE

Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining

Feng Chen[1,*] and J. R. Vázquez de Aldana[2]

Tipos de guías de onda obtenidas con escritura con fs

Tipo I, energías de pulso del orden de decenas de nJ

Tipo II, energías de pulso del orden del μJ

aci

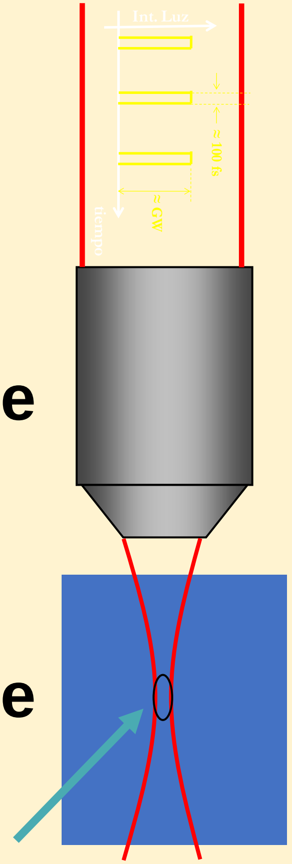
Tipo III una estructura cilíndrica construida con guías tipo II

Tipo IV, definición de guías de onda rectas a partir de la ablación con pulsos fs en guias de onda planas

Interacción de pulsos ultracortos y materiales. Análisis y simulaciónes de deformación en la escala microscópica.

Interacción de pulsos de fs intensos en el interior de dieléctricos

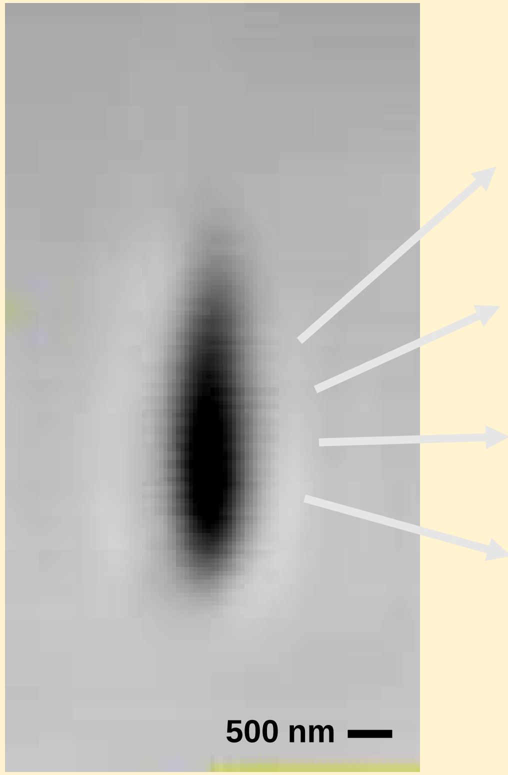
Guías tipo II



Objective

sample

focal volume



Optical breakdown

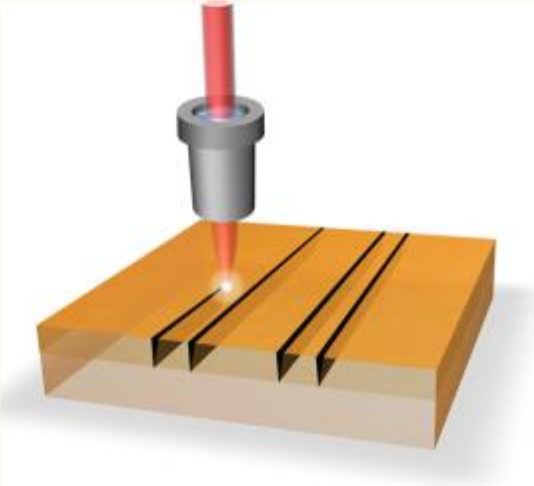
Defects

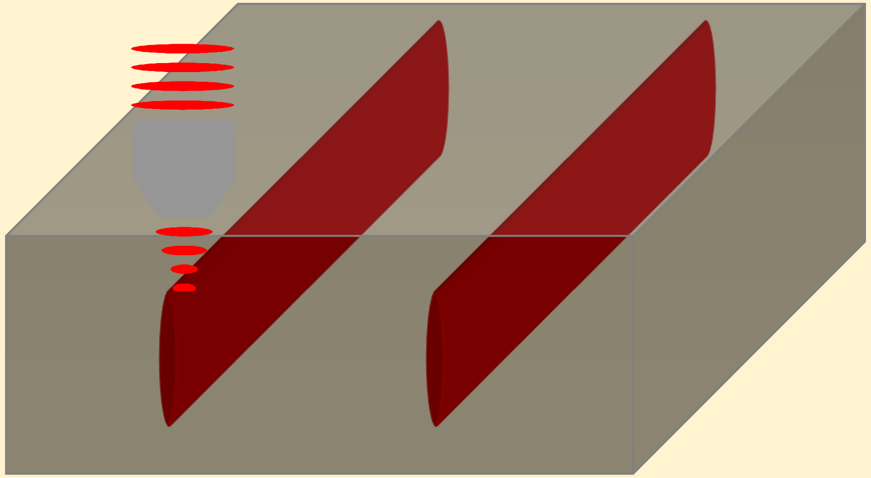
Shock induced stress

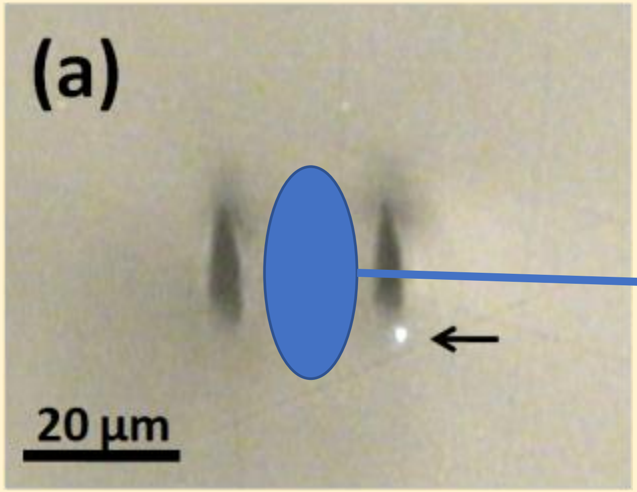
Amorphization

Optical transmission image of the focal volume after irradiation

Estructuras *doble-track* (Tipo II)



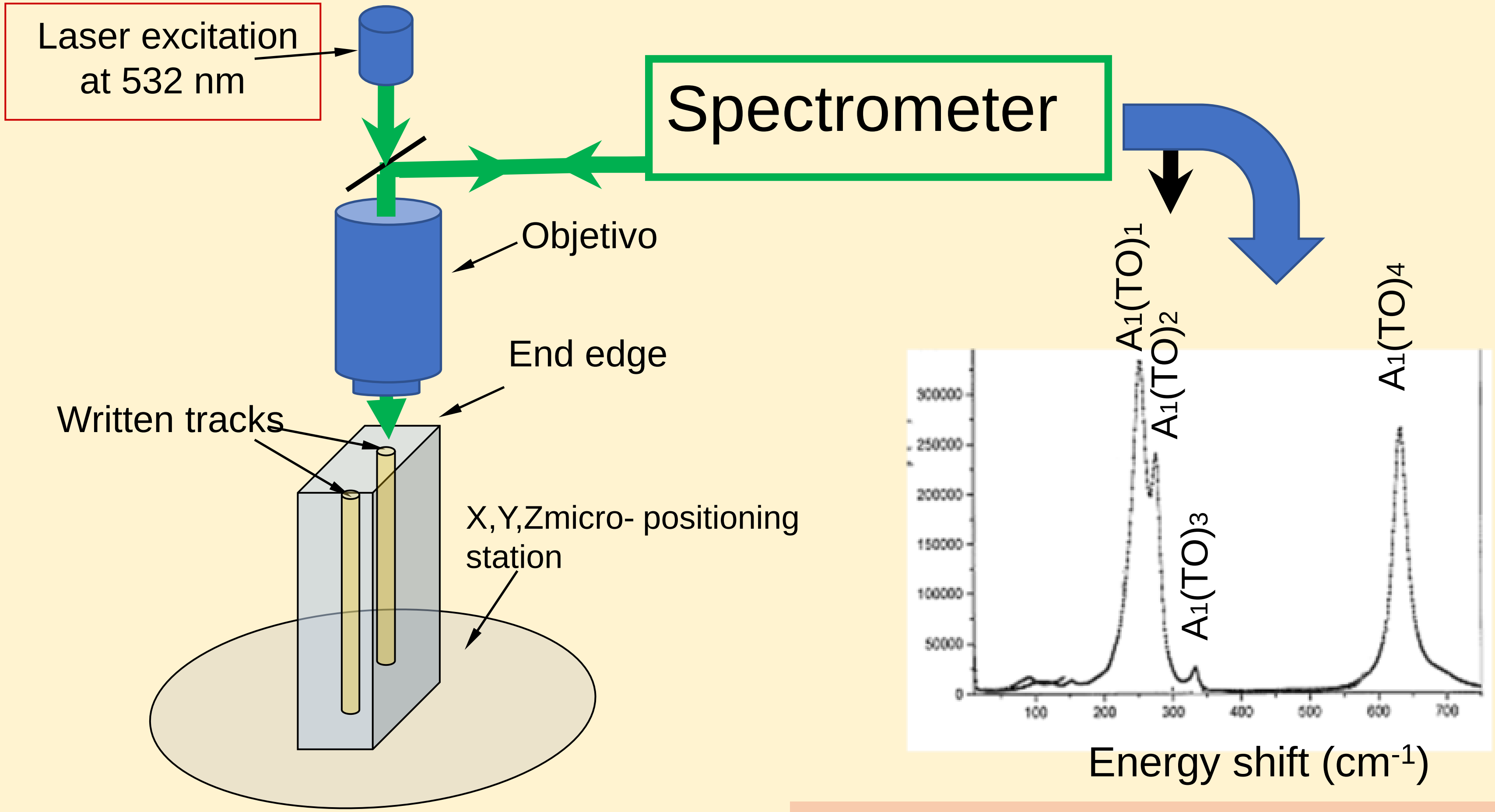




Guía de onda

Origin of waveguides formation by ultra-short laser pulses in optical materials

Micro-Raman spectroscopy

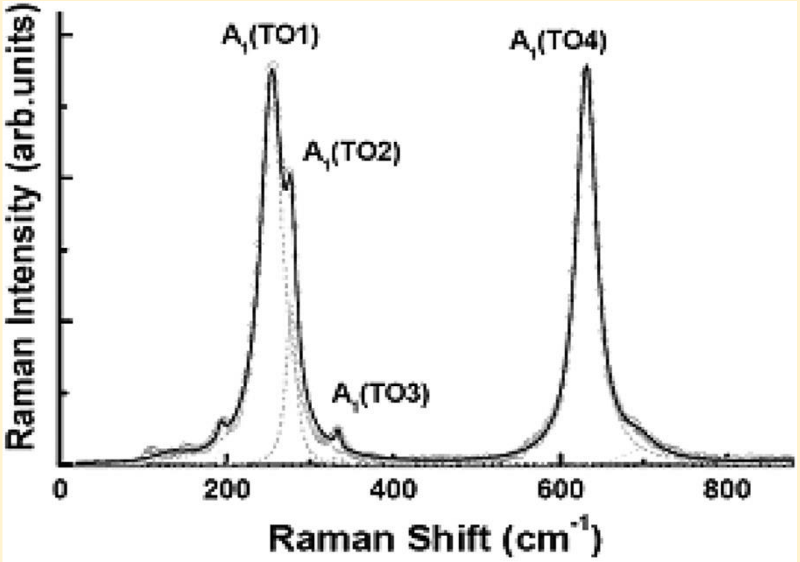


Scheme of micro-Raman scan experiment

Caracterización de guías de onda ópticas generadas con láser de femtosegundos en niobato de litio, Tesis Doctoral de Matías Tejerina, Facultad de Ingeniería, UNLP (2014).

Potential Deformación Theory

- **Raman** configuración Y(ZZ)Y.
- La luz “acopla” modos de vibración de la estructura cristalina. →
- Dependencia lineal del corrimiento de fonones (“picos”) con el estado de deformación del cristal



$$\boxed{\Delta\omega_{A1} = e(\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}) + f(\varepsilon_{zz}).}$$

- bajo presión hidrostática

$$\boxed{d\omega / dp_i = 2\times e_i{'} + f_i{'}}$$

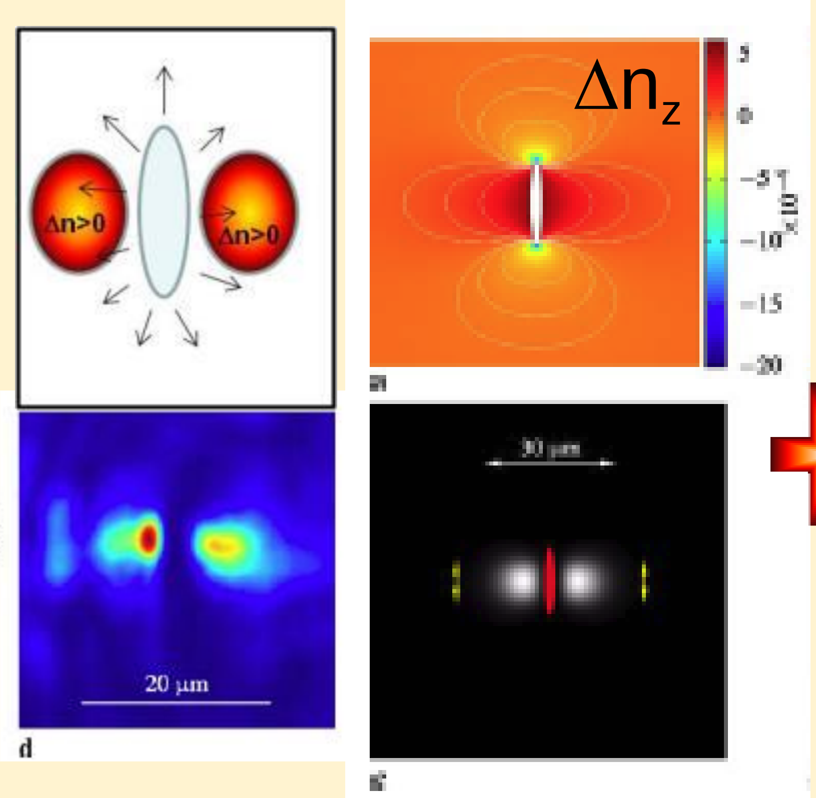
$$\boxed{e' = g(e, f)}$$

$$\boxed{f' = g_2(e, f)}$$

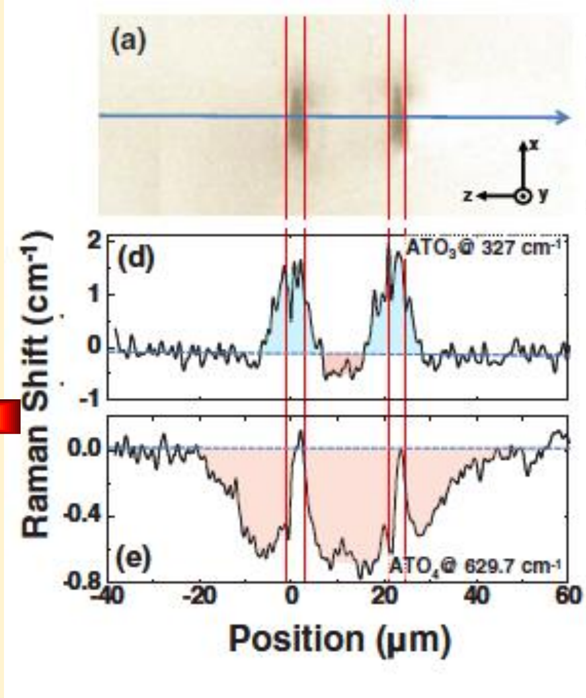
e y *f* are unknown constants but dω/dp is reported for LINbO$_3$.

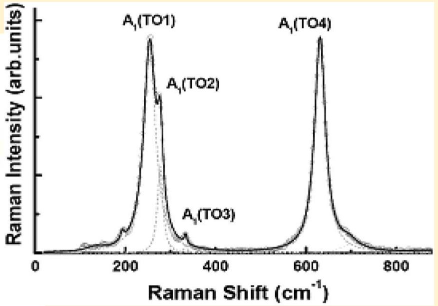
Previous work about the origin of femto-waveguides

Numerical model including a mechanical expansion in the crystal

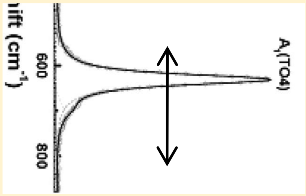


Micro-Raman qualitative description along the waveguides cross section





$\Delta\omega$



$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{bmatrix} = \left[S_{ij}\right] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix}$$

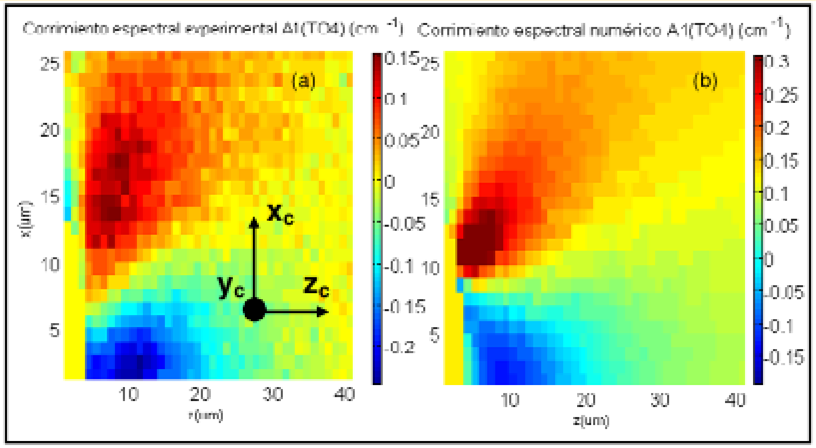


Figura 59. Mapa de corrimiento espectral del fonón $A_1(TO)_4$ **(a)** medida experimental (promedio de cuadrantes), **(b)** ajuste del modelo numérico

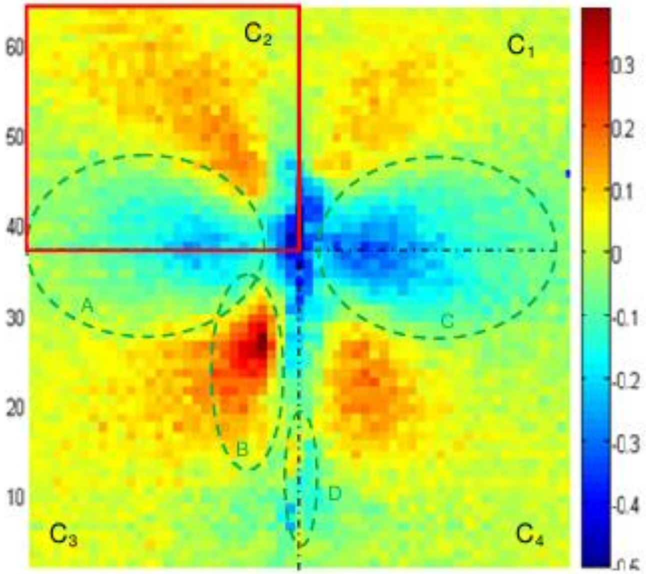
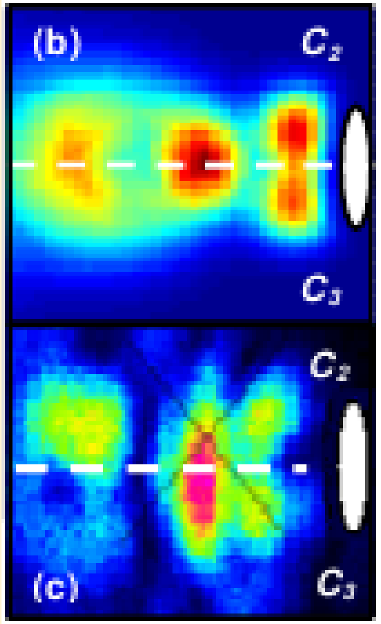


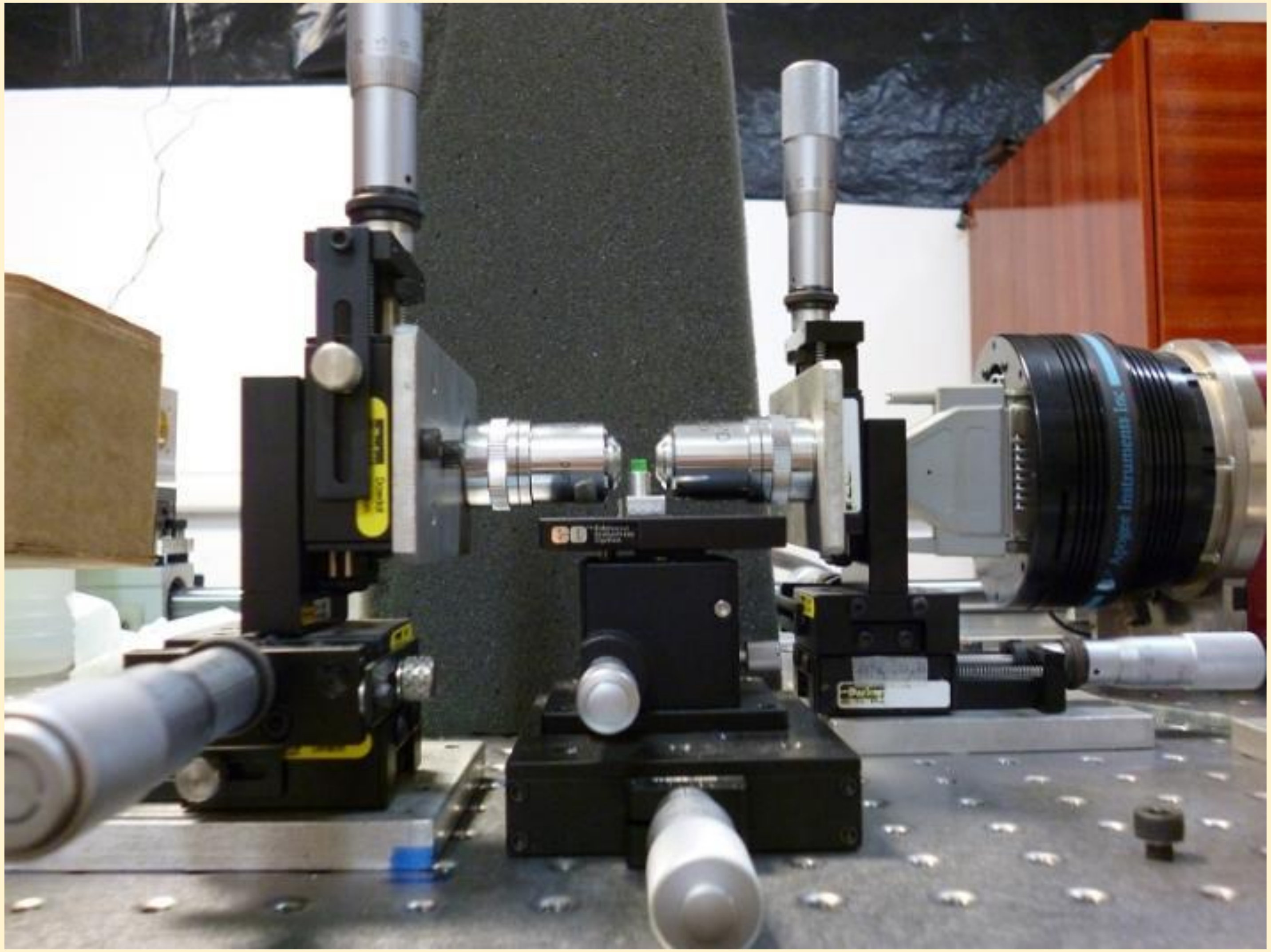
Figura 60. Medida experimental de corrimiento Raman en modificación B

Efecto piezo-óptico

$$\Delta n_i = -\frac{1}{2}(n_i)^3 \cdot \sum_j p_{ij}\varepsilon_j$$



Sistema de caracterización de propagación



Set-up para caracterización de guías de onda luminiscentes

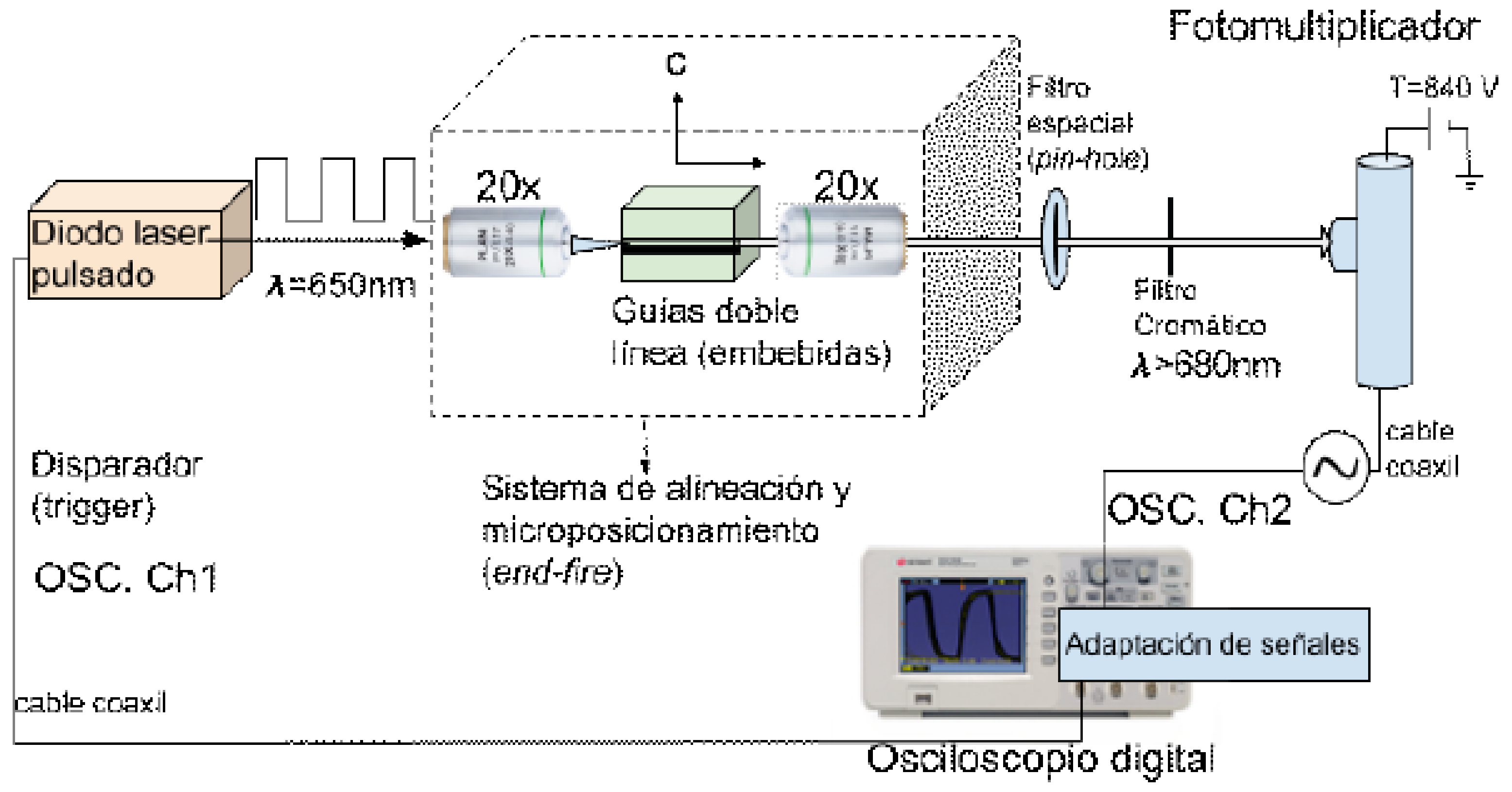
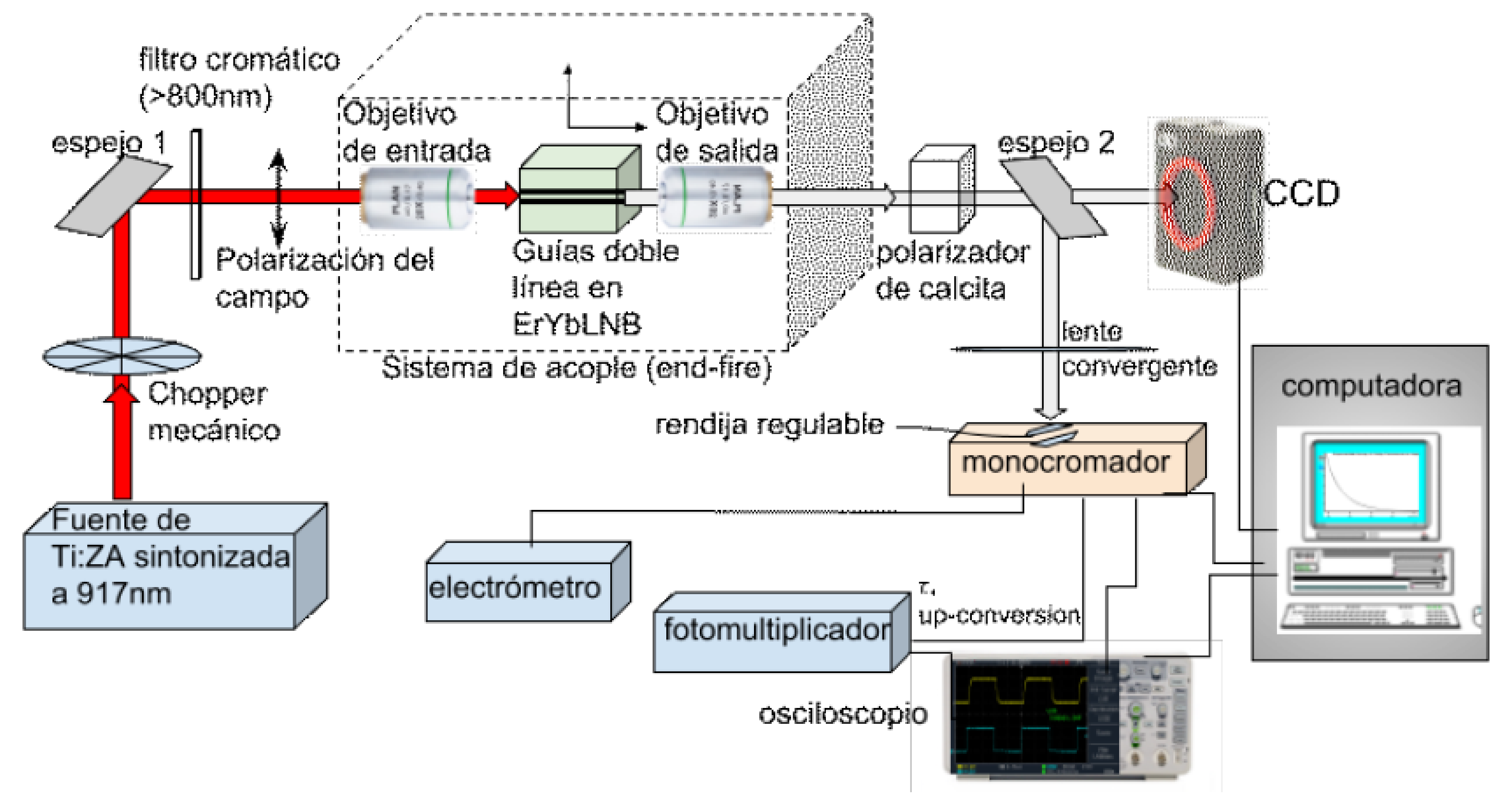


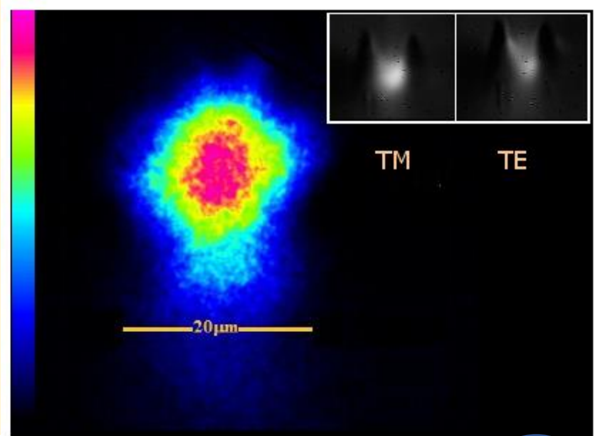
Figura 8.2: Esquema experimental para la medición de vida media en volumen y en guias doble linea fabricadas en CrLiSAF

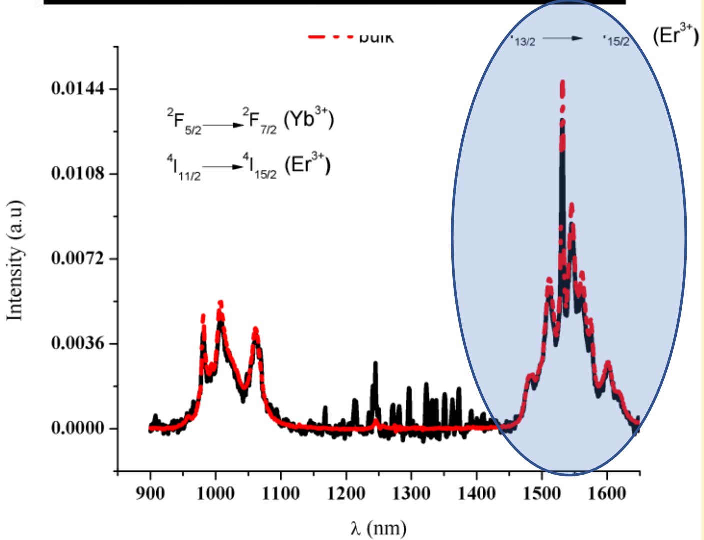
Guías ópticas fabricadas con pulsos ultracortos en materiales luminiscentes: estudios fundamentales para aplicaciones en fotónica, *Biasetti, Demian Arístide, Tesis de la Facultad de Ciencias Exactas, UNLP. 2019.*

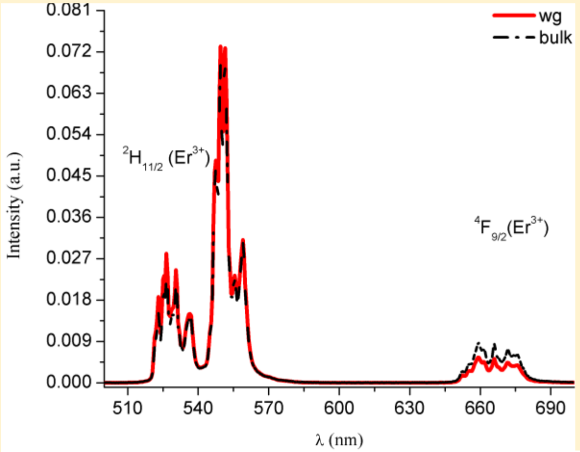
Set-up para analizar guías de Er/Yb: en Niobato de Litio

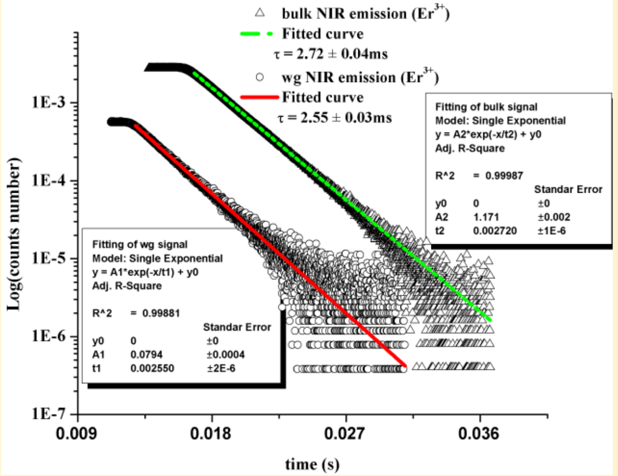


Fuentes de luz integradas. Guías ópticas en Er/YB: $LiNbO_3$



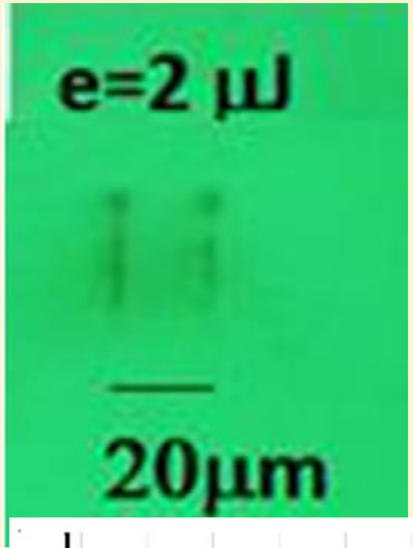


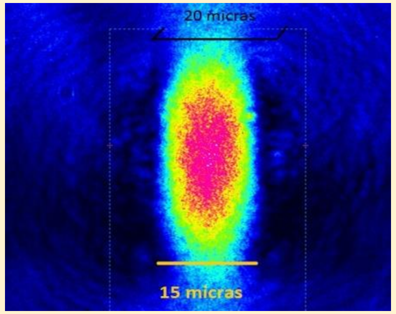




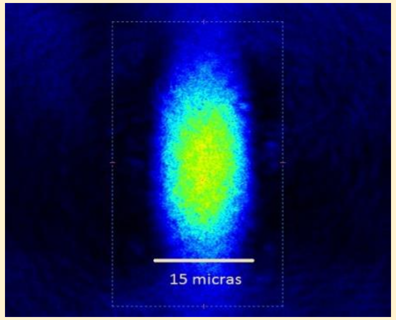
Luminescent features in double-track type II waveguides made in Er/Yb:LiNbO3 by Ultrafast Laser Inscription, Demian A. Biasetti, Gustavo A. Torchia, and Eugenio Cantelar, enviado a ***Journal Ligthwave Technology*, 2018**.

Fuentes de luz integradas. Guías ópticas en Cr:LiSAF

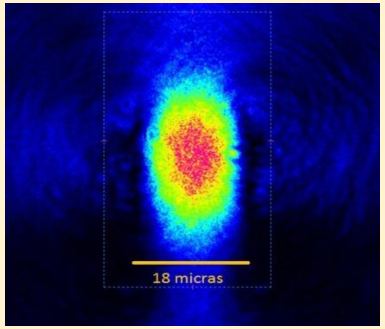




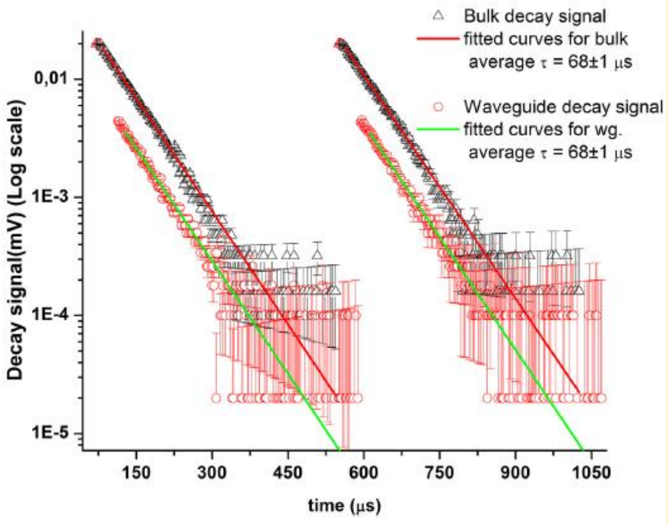
Sin polarizar

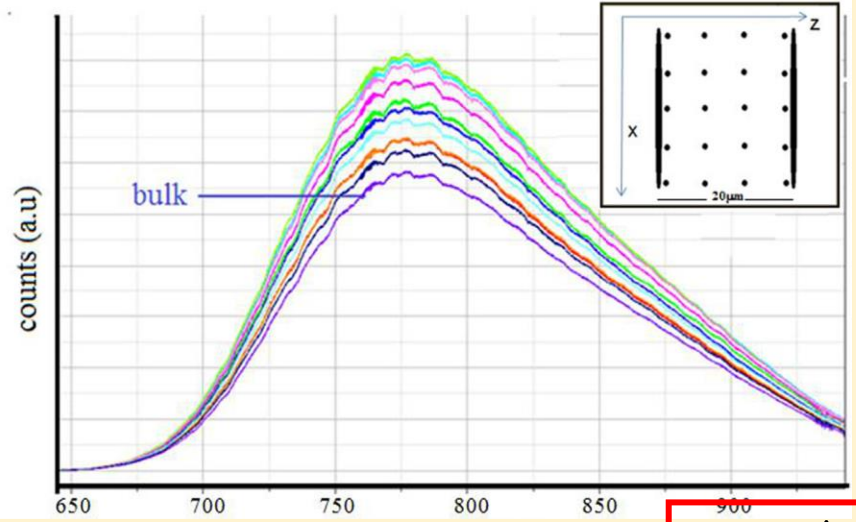


TE



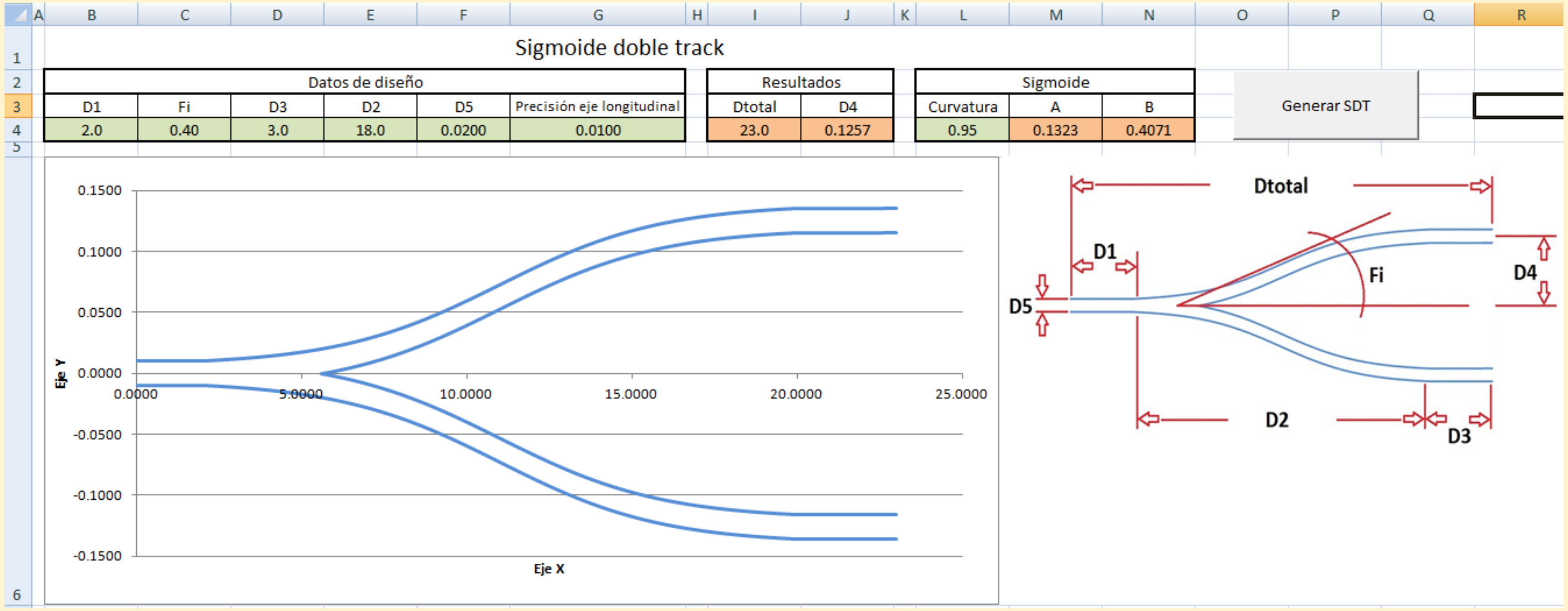
TM





Optical waveguides fabricated in Cr: LiSAF by femtosecond laser micromachining, DA Biasetti, EJ Di Liscia, GA Torchia, ***Optical Materials* 73, 25-32 (2017)**

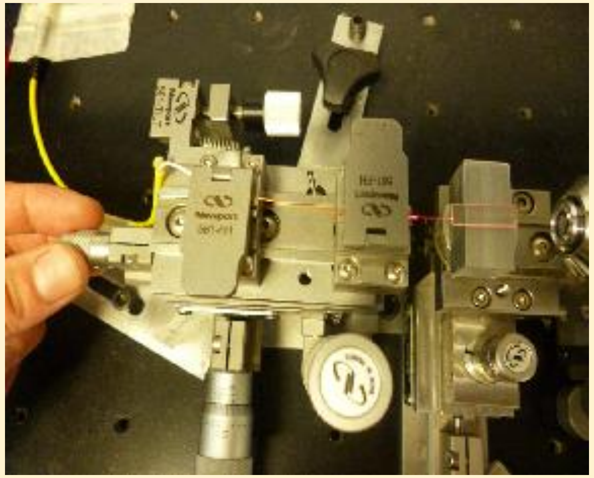
Fabricación de los circuitos ópticos.
Generación de datos para Software de la estaciona motorizada

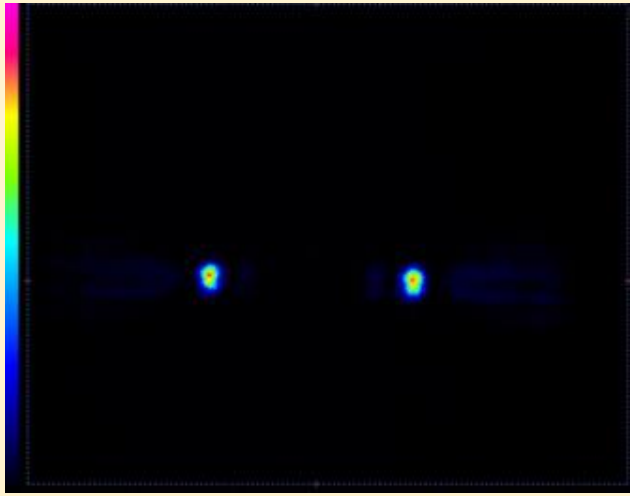


Sigmoide doble track

Datos de diseño						Resultados		Sigmoide		
D1	Fi	D3	D2	D5	Precisión eje longitudinal	Dtotal	D4	Curvatura	A	B
2.0	0.40	3.0	18.0	0.0200	0.0100	23.0	0.1257	0.95	0.1323	0.4071

Generar SDT

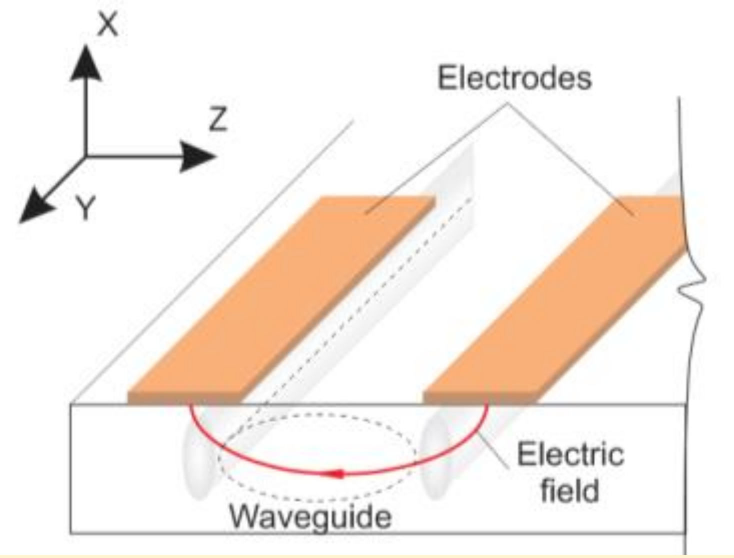




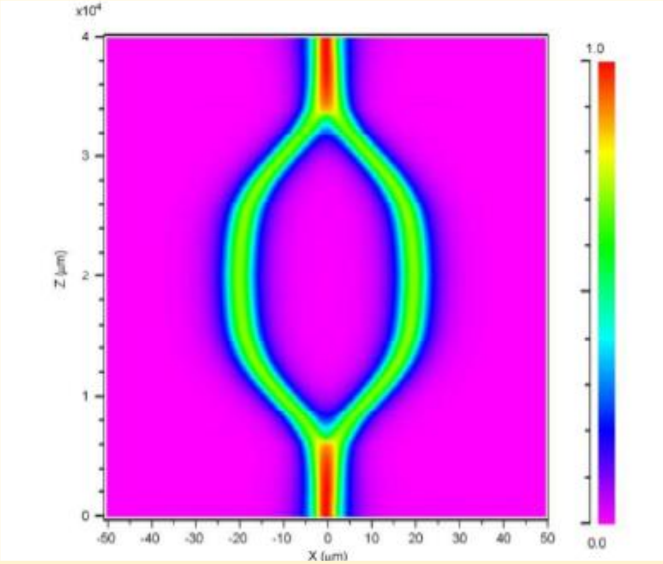
Bending waveguides made in x-cut lithium niobate crystals for technological applicationsV Guarepi, C Perrone, M Aveni, F Videla, GA Torchia, Journal of Micromechanics and Microengineering 25 (12), 12502 (2015)

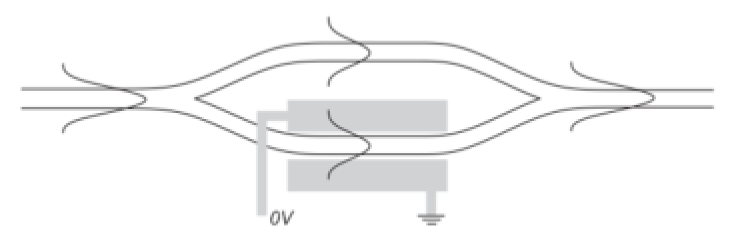
Key kinematic parameters in a low-loss power splitter written by femtosecond laser micromachining, R Peyton, V Guarepi, F Videla, GA Torchia, Journal of Micromechanics and Microengineering 28 (5), 055011 (2018).

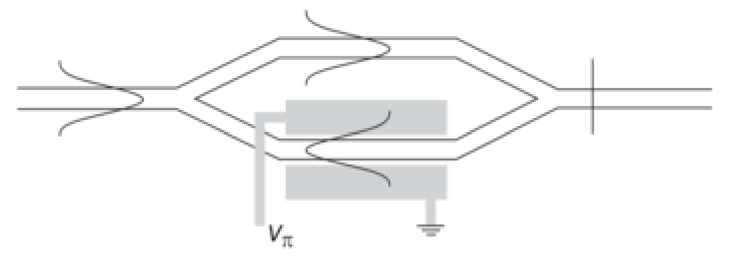
Interferómetro MZ
Modulador electro-óptico



LNB corte X







“Modulador electro-óptico integrado en cristales de Niobato de Litio”, Damian Presti, Tesis de Doctorado en Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Quilmes, 2020.

Efecto electro-Óptico en el Niobato de Litio

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^{3} r_{ij}\, E_j$$

(Efecto Pockels)

$$\Delta n_e \approx \frac{n_e\, r_{33}}{2} E_z$$

$$r_{13} = 8.6$$

$$\Delta n_o \approx \frac{n_o\, r_{13}}{2} E_z$$

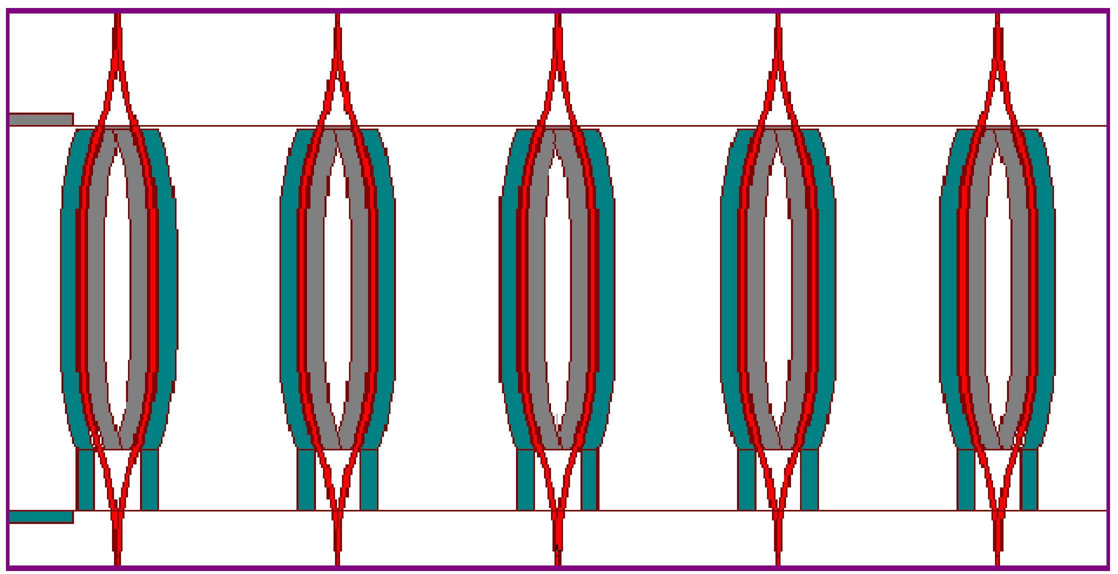
$$r_{33} = 30.8$$

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n$$

$$\Delta\phi = \Delta\beta\, L = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n\, L$$

$$\Delta n = -\frac{n^3 r}{2}\cdot\frac{V}{g}\cdot\Gamma$$

Diseño y Máscara del MZI



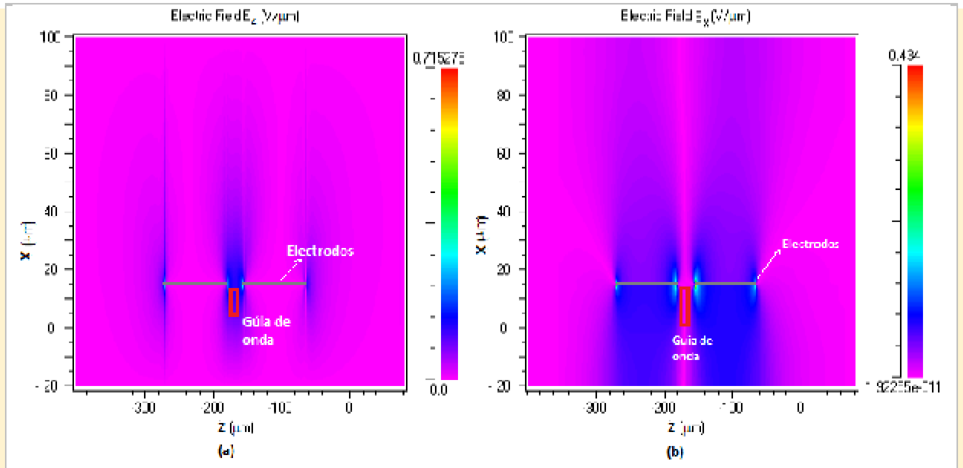
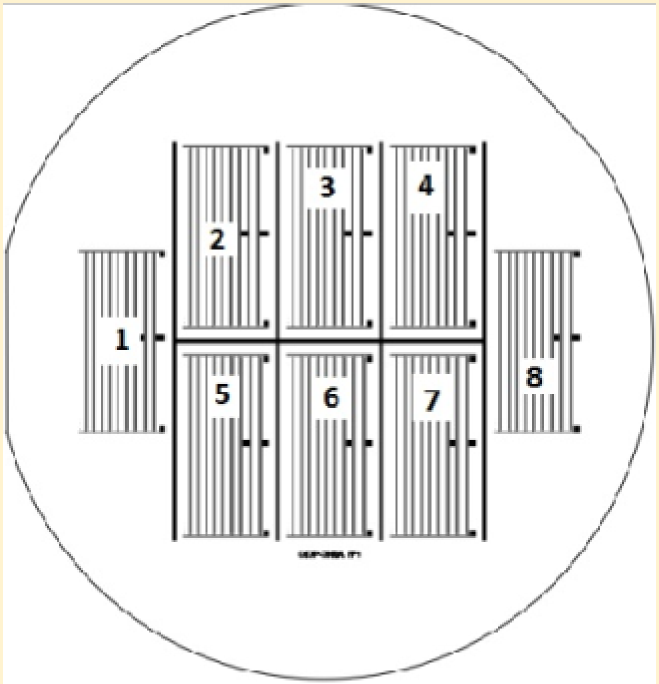
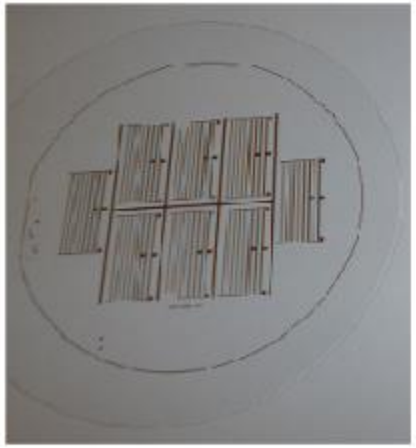


Figura 6: Componentes del campo eléctrico sobre guía de onda: (a) Componente Ez (b) Componente Ex



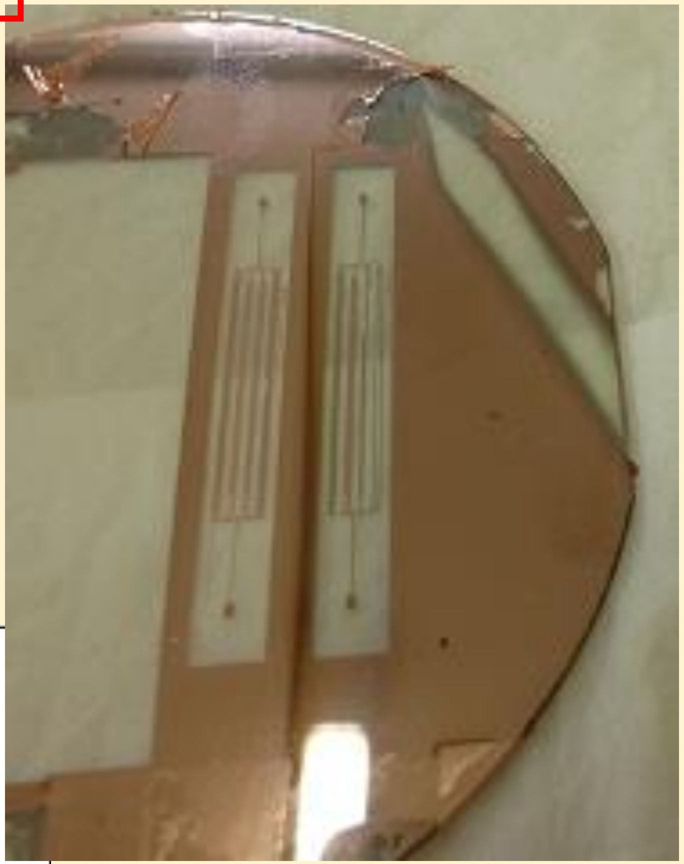
Deposición de electrodos en los moduladores de amplitud (MZI)

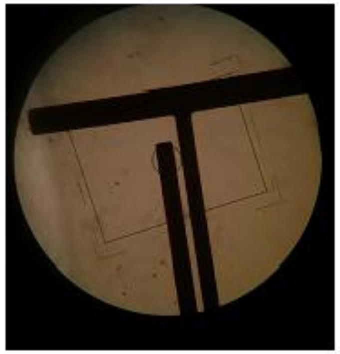
Departamento de Micro y Nano tecnología
CNEA C.A.Constituyentes



(a) Oblea con electrodos depositados con técnica litográfica negativa

(b) Oblea con electrodos depositados con técnica litográfica positiva

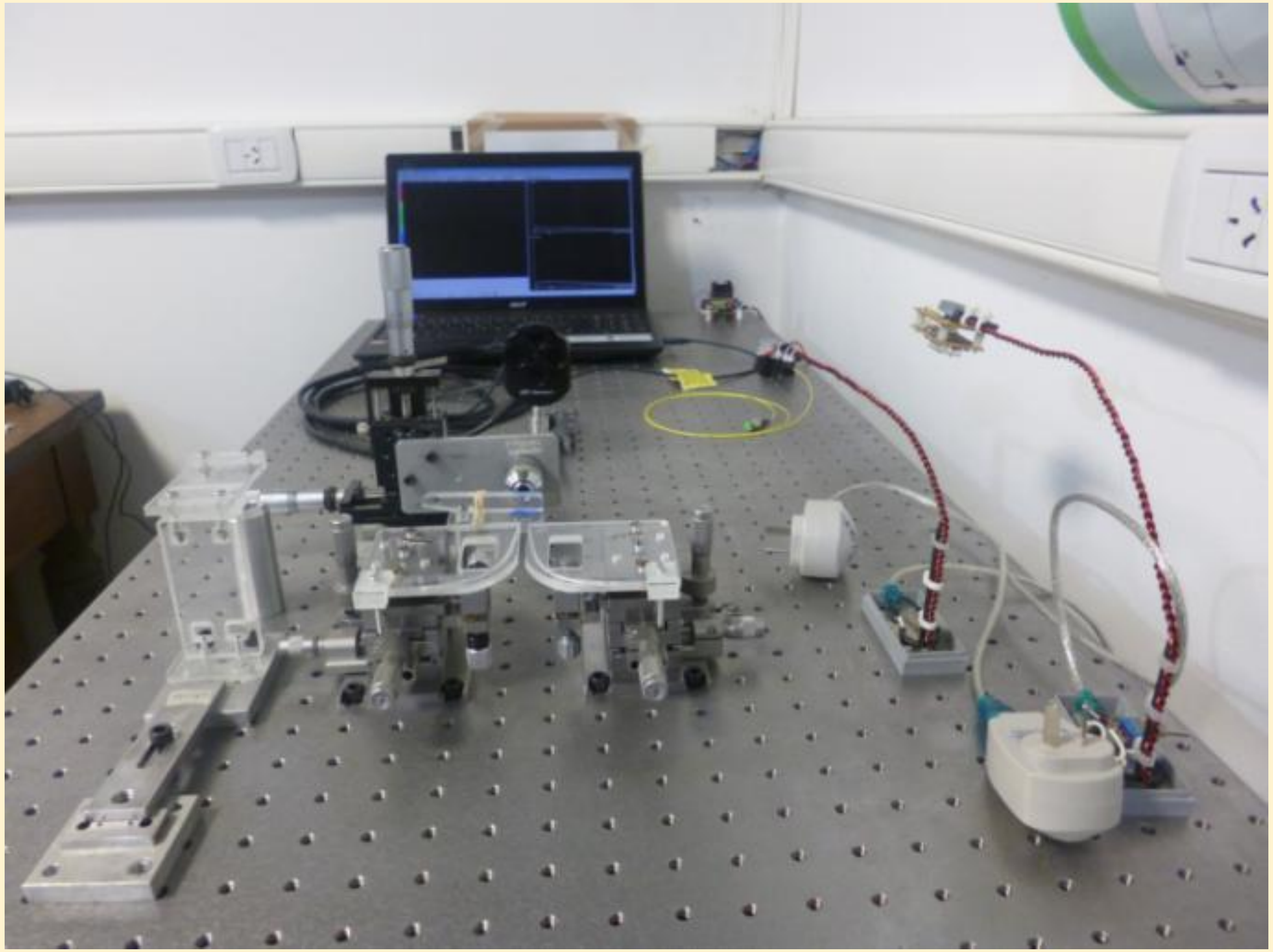




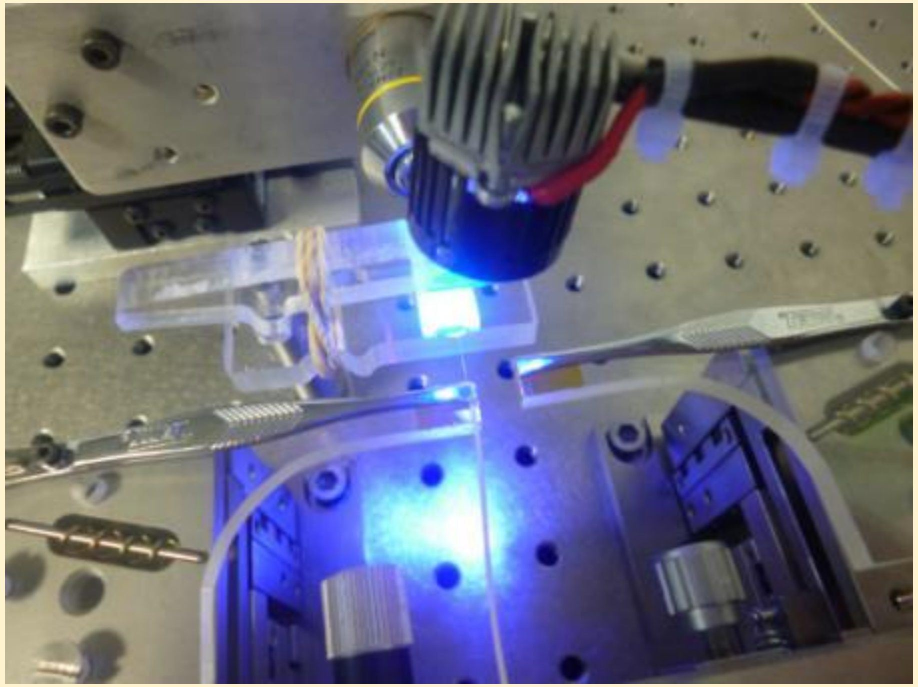
(a) Foto de sección de **oblea negativa** obtenida con objetivo x10.

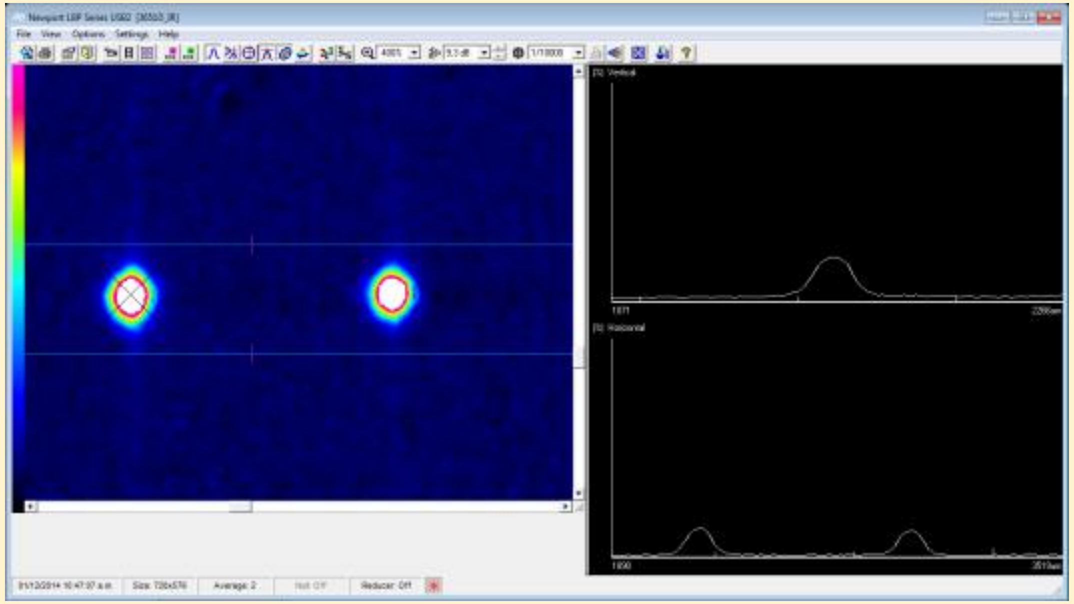
(b) Foto de sección de **oblea positiva** obtenida con objetivo x10.

Sistema de acople y pegado de fibra óptica en los dispositivos

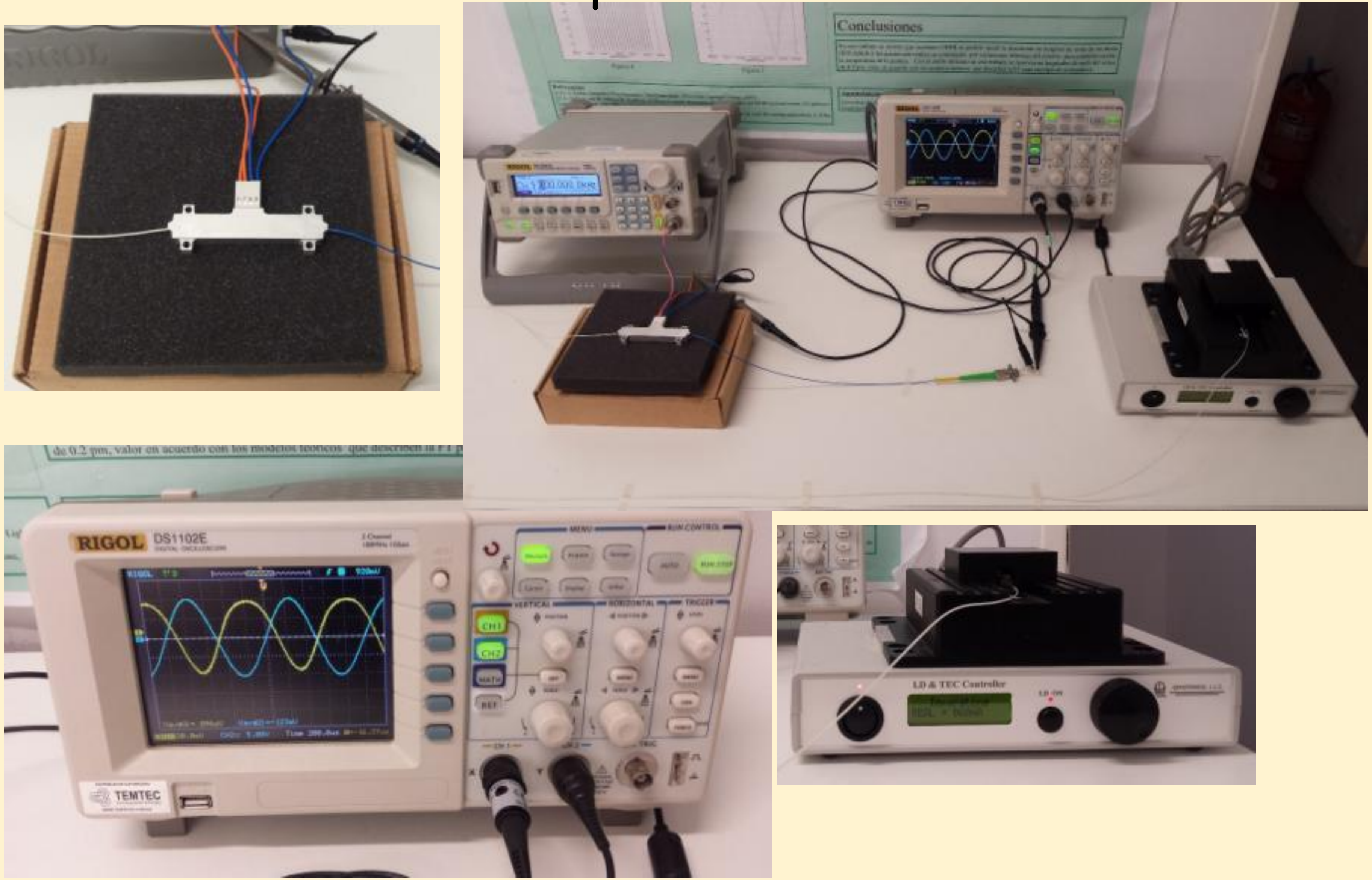


Pegado de Fibra Óptica sobre los circuitos ópticos



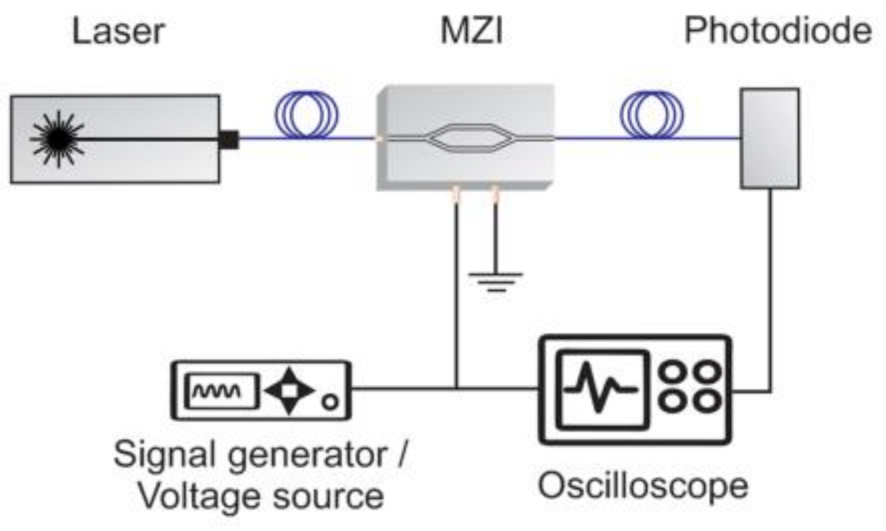


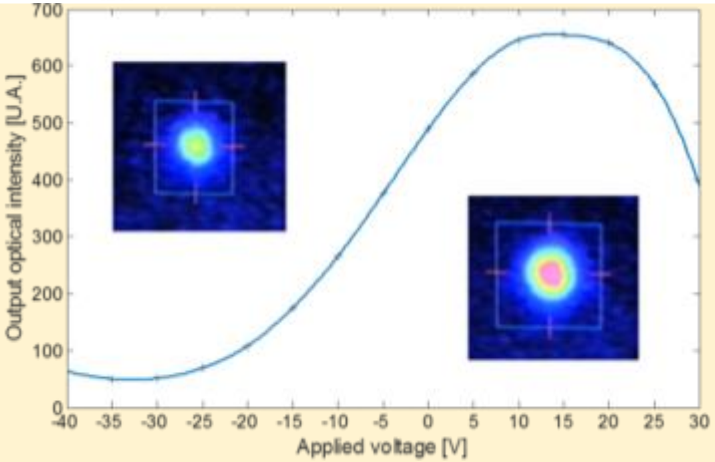
Modulación electro-óptica

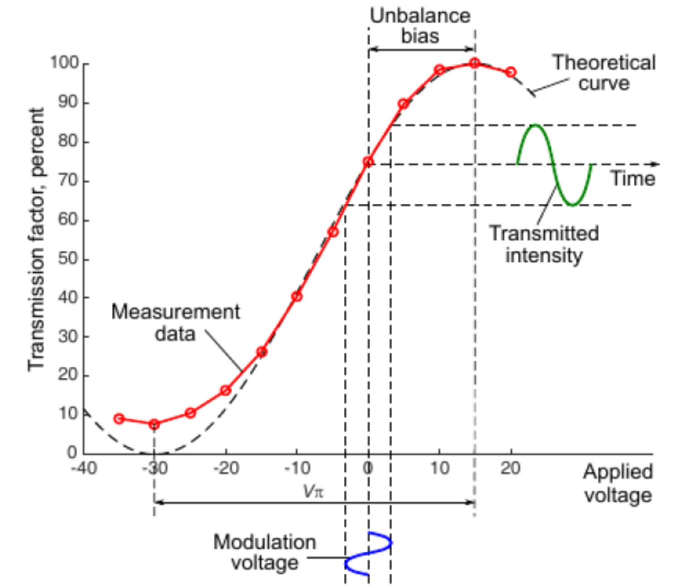


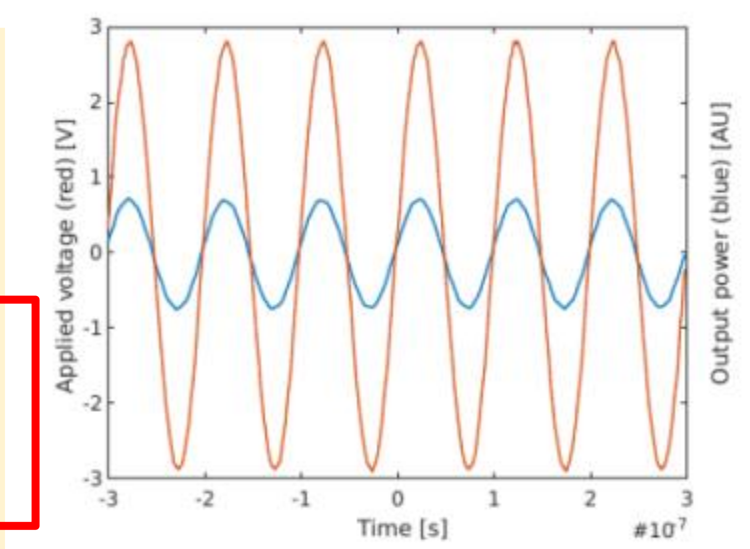
Características del MZI

$$V_\pi = \frac{\lambda \cdot g}{n^3 \cdot r \cdot \Gamma \cdot L}$$

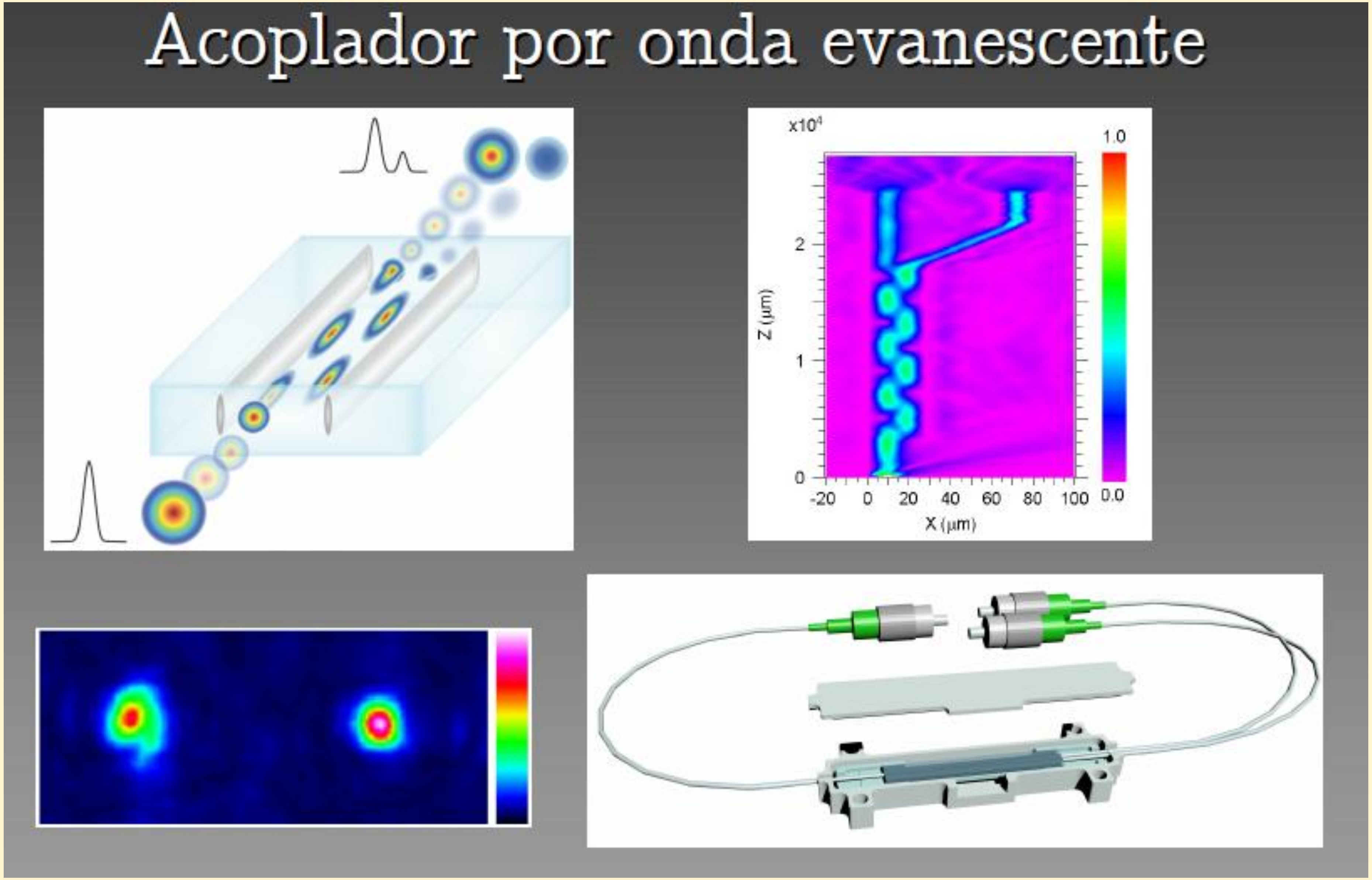








Intensity modulator fabricated in $LiNbO_3$ by femtosecond laser writing, PRESTI D; GUAREPI V; FASCISZEWSKI A; TORCHIA G.A, enviado a ***Optical and Laser in Engineering* , 2018.**



Acoplador por onda evanescente

Fotónica de Silicio.

Es una tecnología de rápido crecimiento en el desarrollo de circuitos fotónicos integrados, debido a la compatibilidad con los procesos estándar de fabricación CMOS y su alta integración.

Ventajas: - Gran ancho de banda permitido en la región de comunicaciones ópticas.
- Inmunidad al ruido electromagnético.
- Posibilidad de producir chips fotónicos a gran escala.

Figura 3. Obleas de Nitruro de Silicio (Si_3N_4)

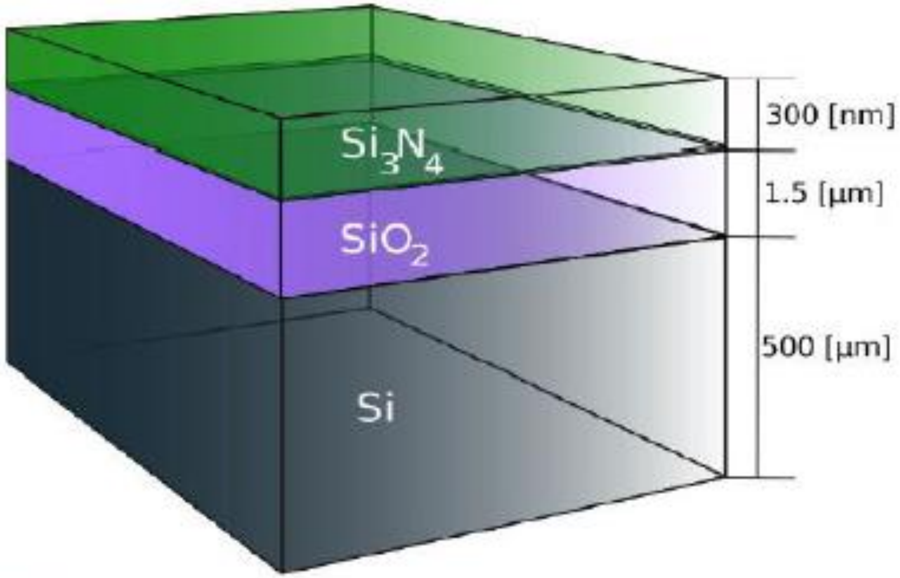


Figura 4. Estructura de una oblea con tecnología Si_3N_4

Desarrollo de Dispositivos Fotónicos Integrados (PICs) con tecnología Si_3N_4

(Divisor de potencia 1x2 integrado en Si_3N_4 combinando MMI + CCT)

Diseño.

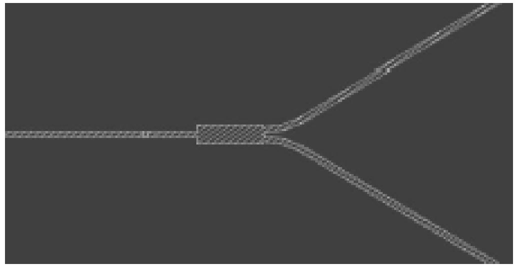


Figura 5. Diseño del divisor de potencia 1x2.

Simulación

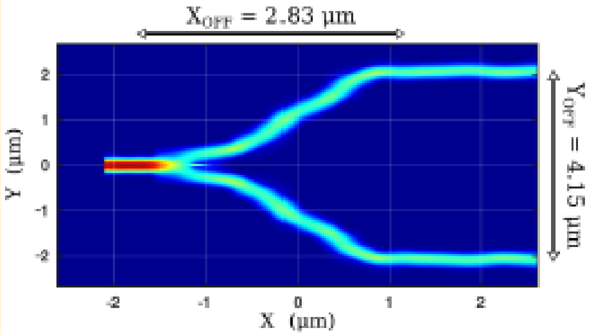
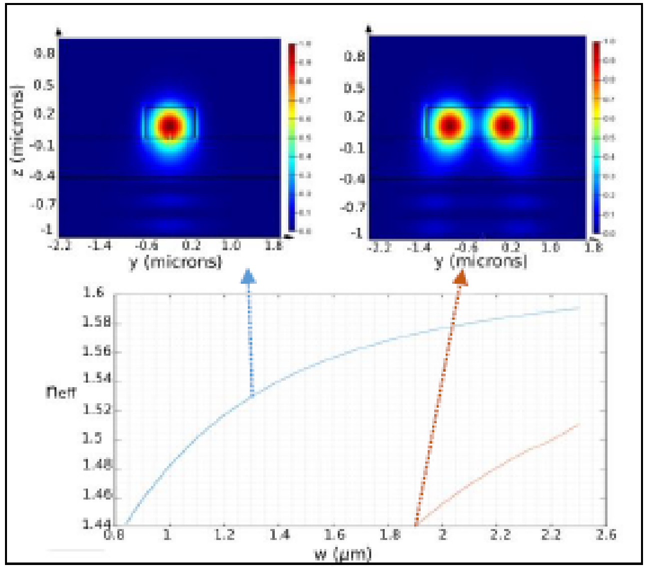
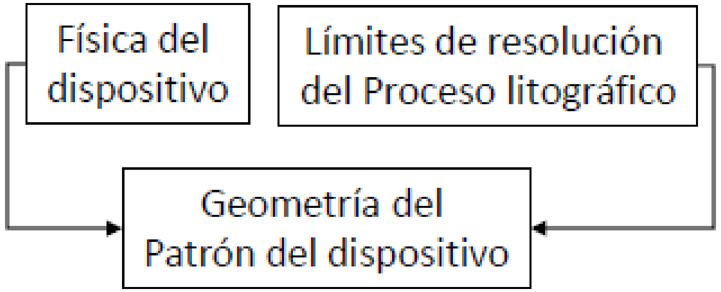


Figura 6. Método 3D Finite-Difference Time Domain (3D-FDTD).

Fabricación (Consideraciones)

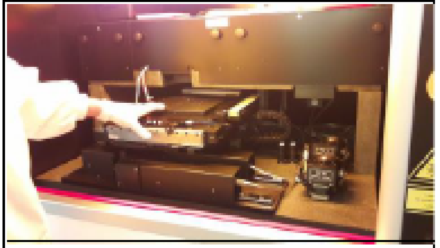




Física del dispositivo

Límites de resolución del Proceso litográfico

Geometría del Patrón del dispositivo



- Equipo masterizador.
- Cabezales: 10[mm], 2[mm].
- Fotoresinas.

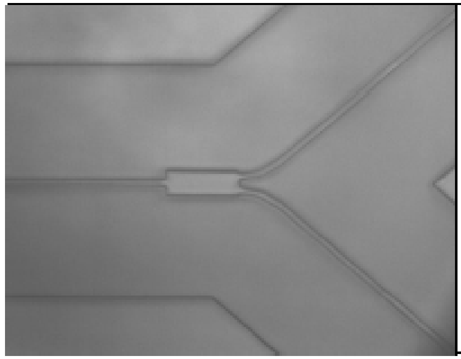
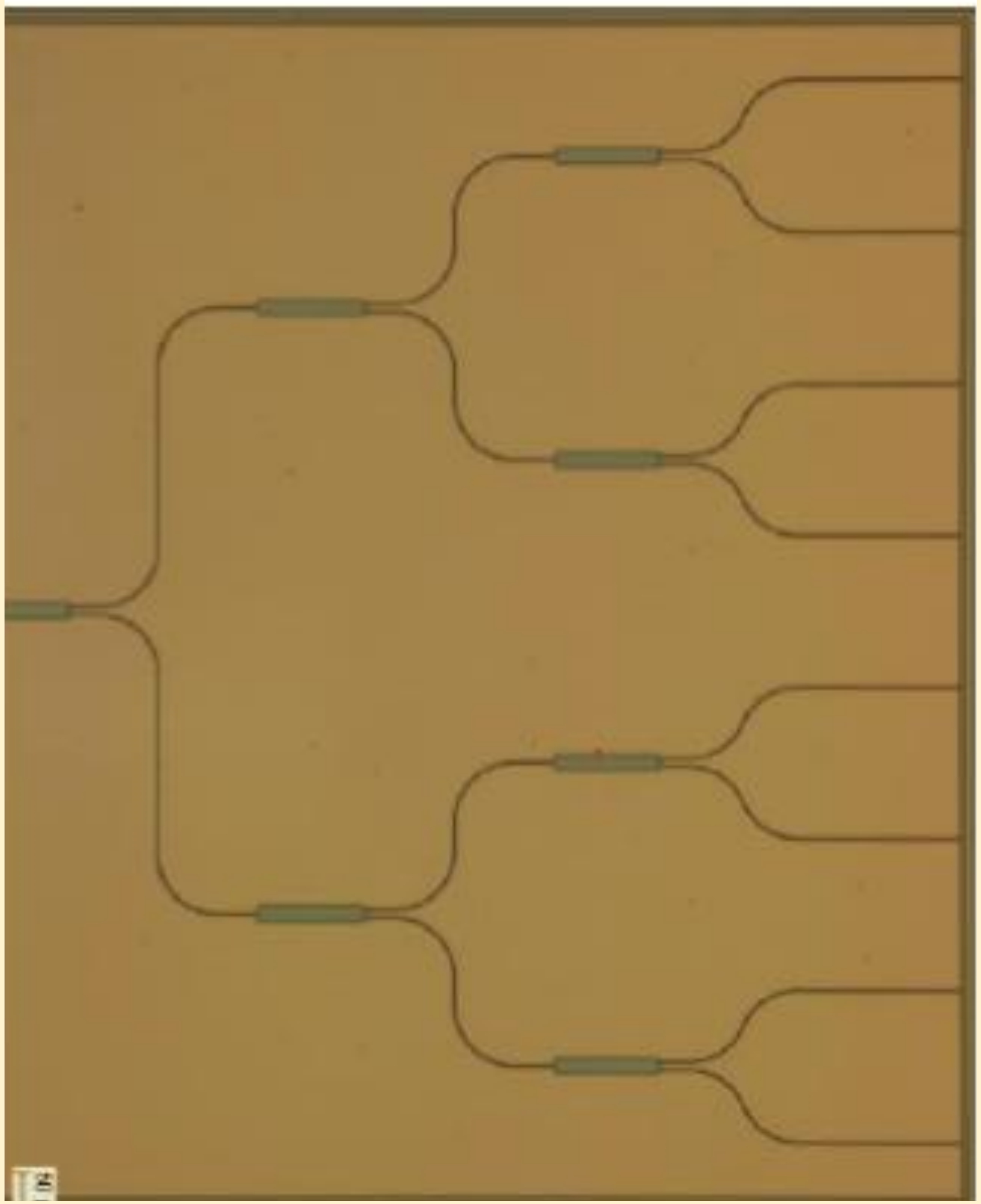


Figura 7. Fabricación del divisor de Potencia 1x2 integrado en obleas de Si_3N_4

Nitruro de Silicio

Divisor 1x8



Splitters utilizados en redes de fibra óptica al hogar (FTTH)

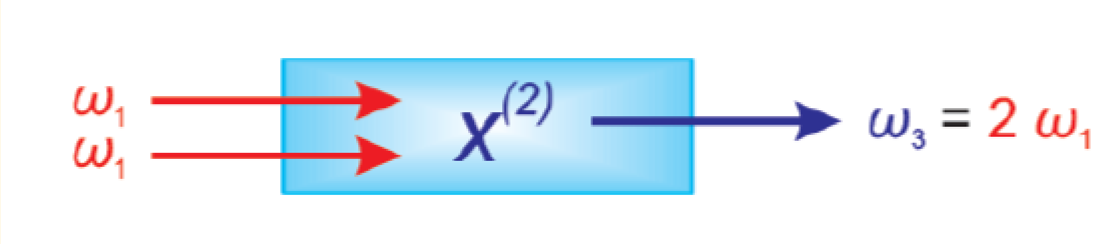
Muchas gracias!!!

Preguntas, comentarios??

Parte 2

3-Aplicaciones de efectos no lineales en volumen y en guías de onda Quasi Phase Matching- Phase Matching no colineal

Generación de segunda armónica
Phase Matching

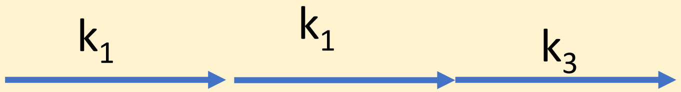


Conservación de la energía

Phase matching occurs for $\Delta k = 0$.

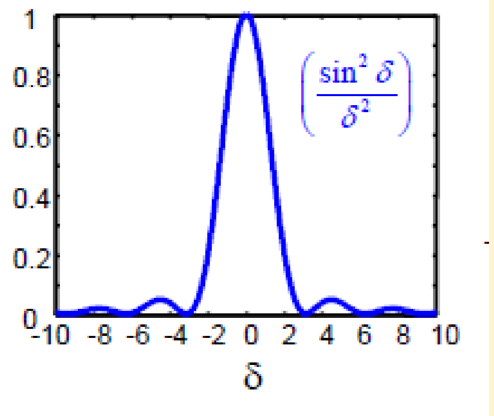
Conservación del momento

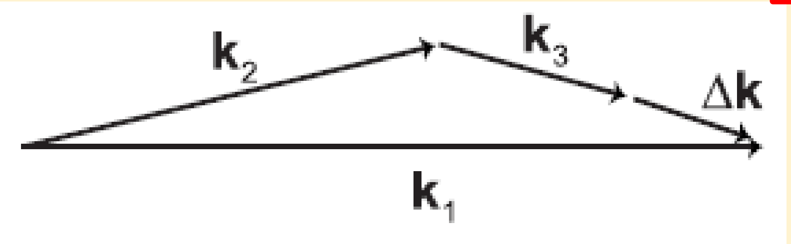
$$\Lambda k = 2k1 - k2 = 0$$



Colineal

$$I_{2\omega}(z) \propto I_\omega^{\,2} z^2 \left(\frac{\sin(\delta)}{\delta}\right)^2 \quad \text{where } \delta = \Delta k \cdot z/2 = \frac{2\pi z}{\lambda_{input}}\left(n_\omega - n_{2\omega}\right)$$





No colineal

Longitud de coherencia

$$l_c = \frac{2\pi}{\Delta k} = \frac{\lambda}{2\left(n^{(2\omega)} - n^{(\omega)}\right)}$$

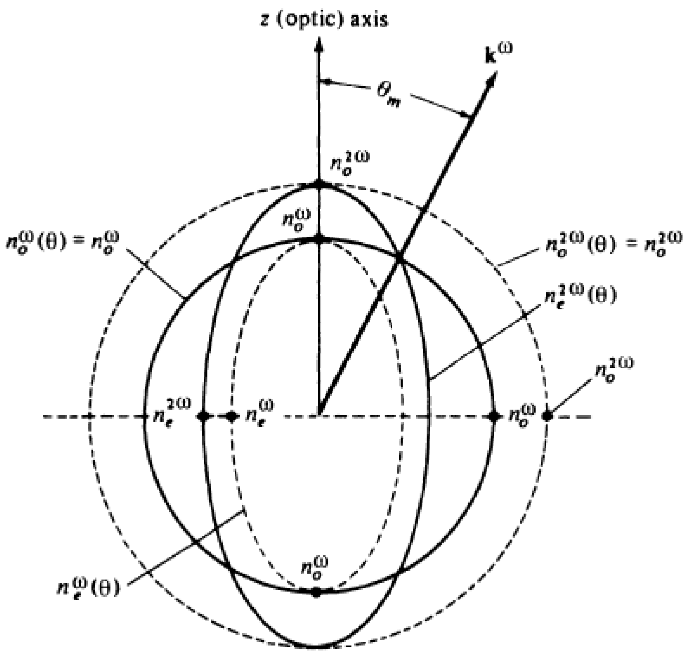
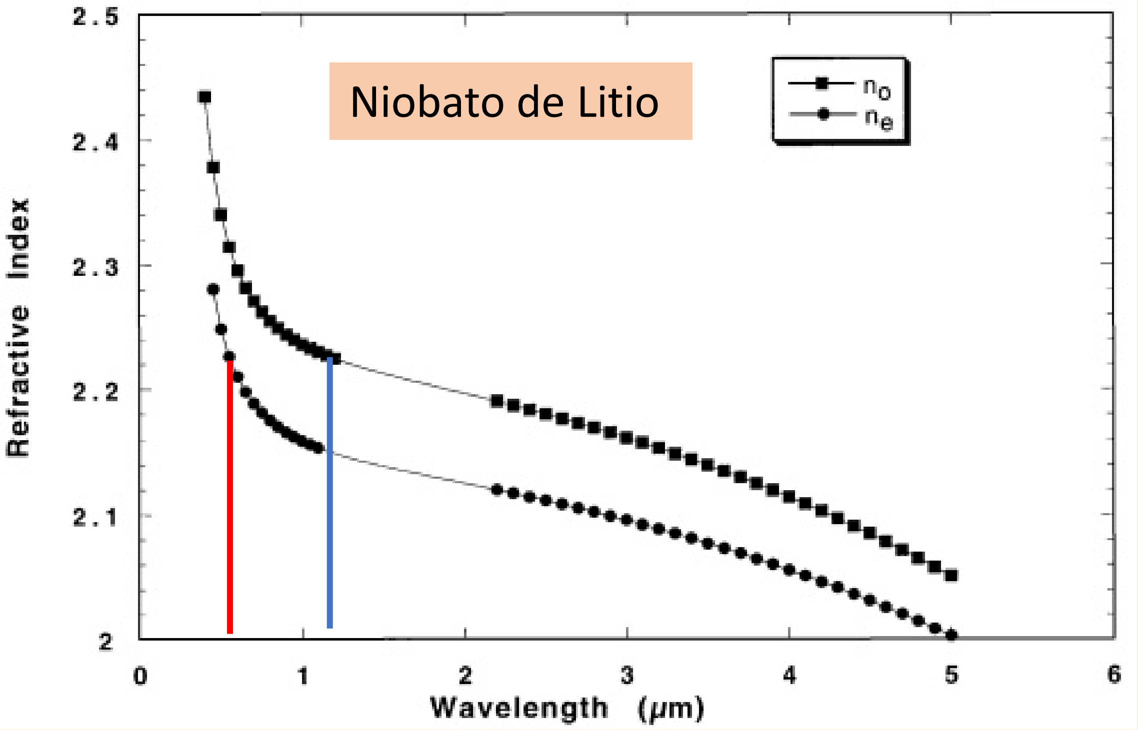
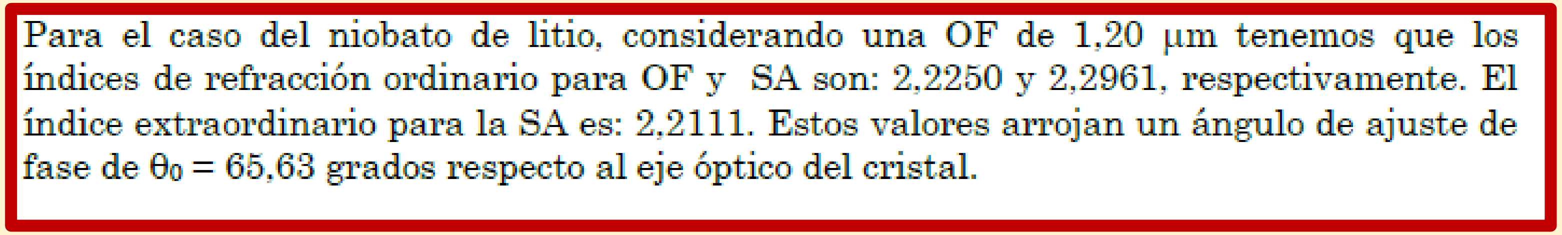


Figure 8.2 Normal (index) surfaces for the ordinary and extraordinary rays in a negative ($n_e < n_o$) uniaxial crystal. If $n_e^{2\omega} - n_o^{\omega}$, the condition $n_e^{2\omega}(\theta) = n_o^{\omega}$ is satisfied at $\theta = \theta_m$. The eccentricities shown are vastly exaggerated.

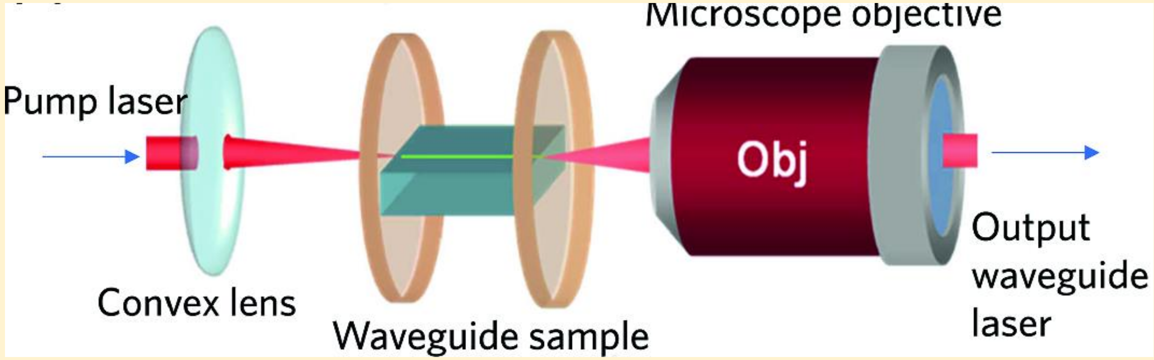


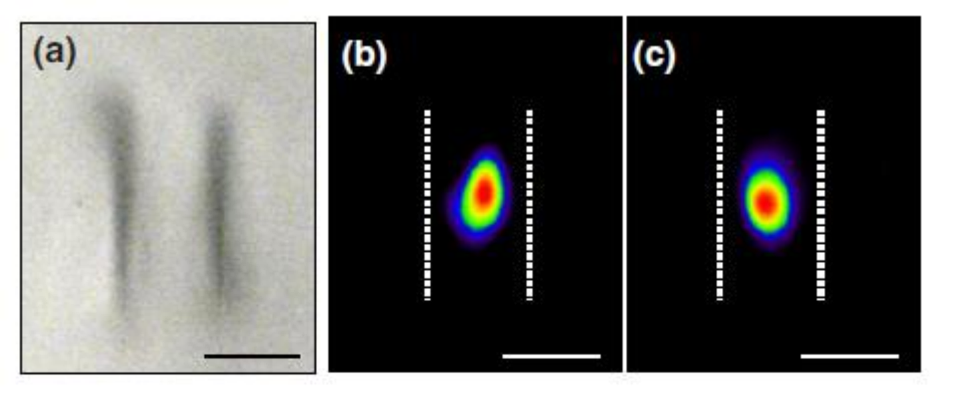
$$sen^2(\theta_0) = \frac{(n_o^{\omega})^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}}{(n_e^{2\omega})^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}}$$

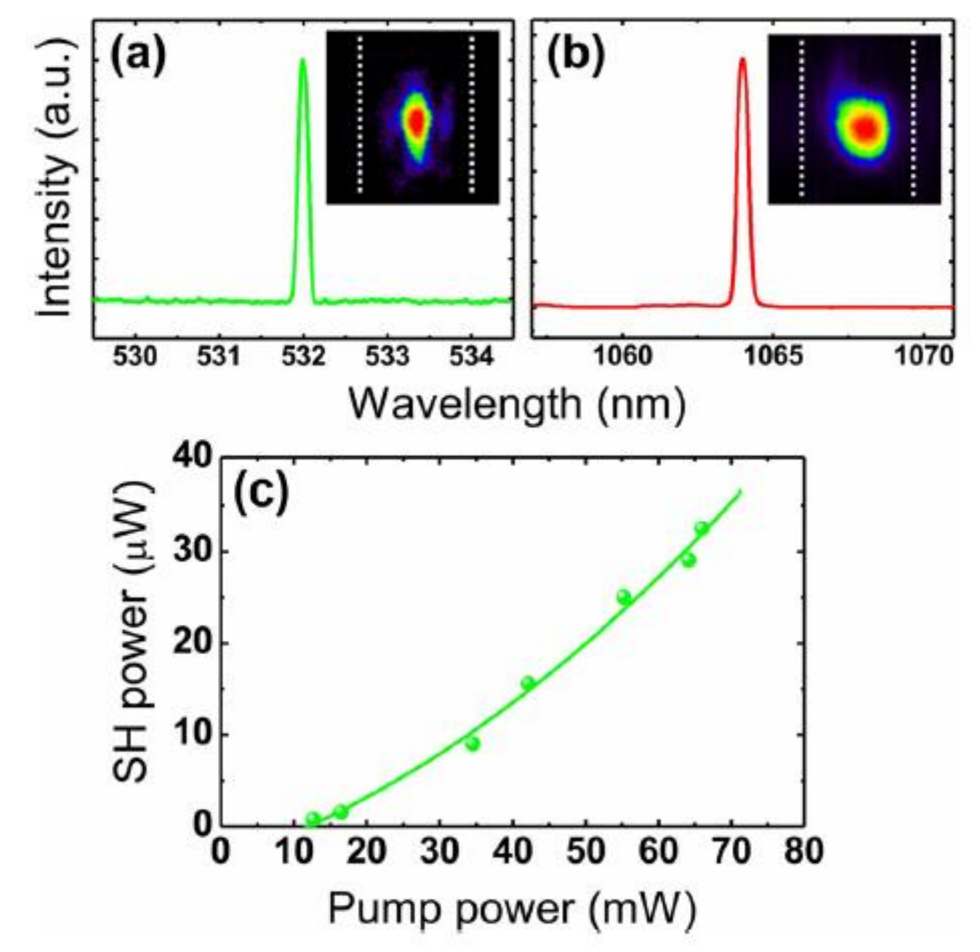
SHG-Type I


Para el caso del niobato de litio, considerando una OF de 1,20 μm tenemos que los índices de refracción ordinario para OF y SA son: 2,2250 y 2,2961, respectivamente. El índice extraordinario para la SA es: 2,2111. Estos valores arrojan un ángulo de ajuste de fase de θ_0 = 65,63 grados respecto al eje óptico del cristal.

Self-frequency-doubling of ultrafast laser inscribed neodymium doped yttrium aluminum borate waveguides







SHG-Type I

Applied Physics Letters **98**, 181103 (2011); doi: 10.1063/1.3584852

Phase Matching no colineal

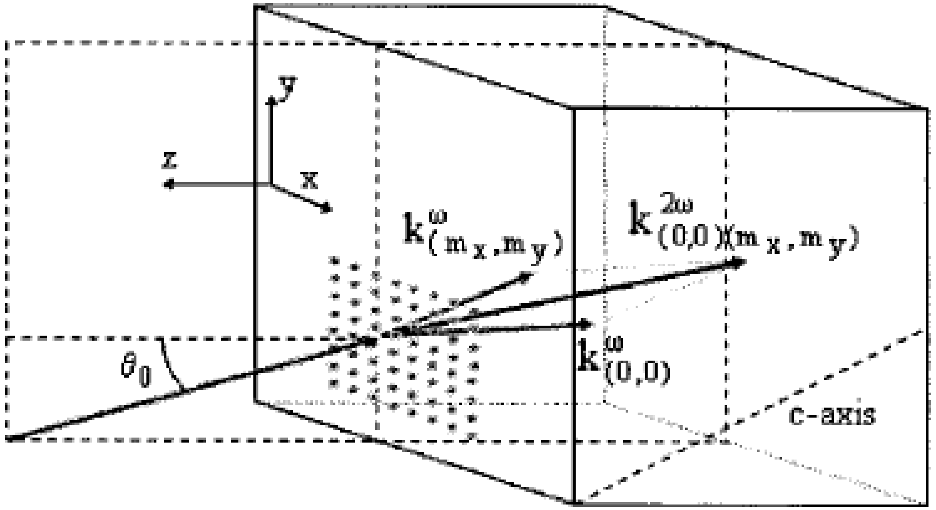


Fig. 1. Schematic arrangement of the device and NC-SHG process.

Período de la red = 12 µm

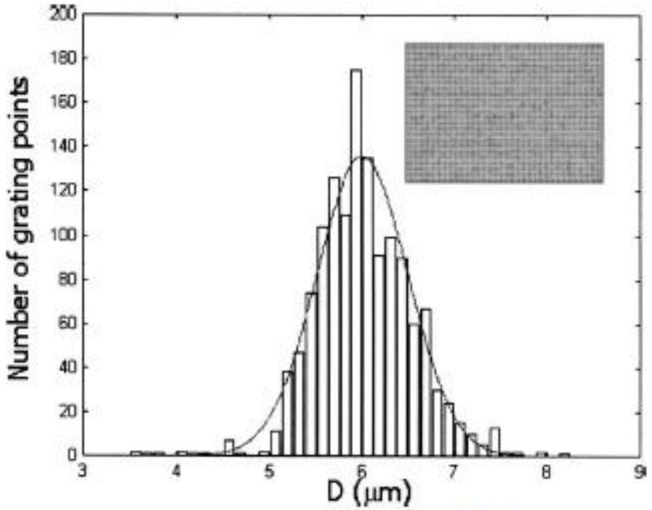


Fig. 2. Distribution of the diameters of the grating points measured along part of the sample. Inset, optical microscopy image of the crystal surface.

2005 / Vol. 30, No. 20 / OPTICS LETTERS

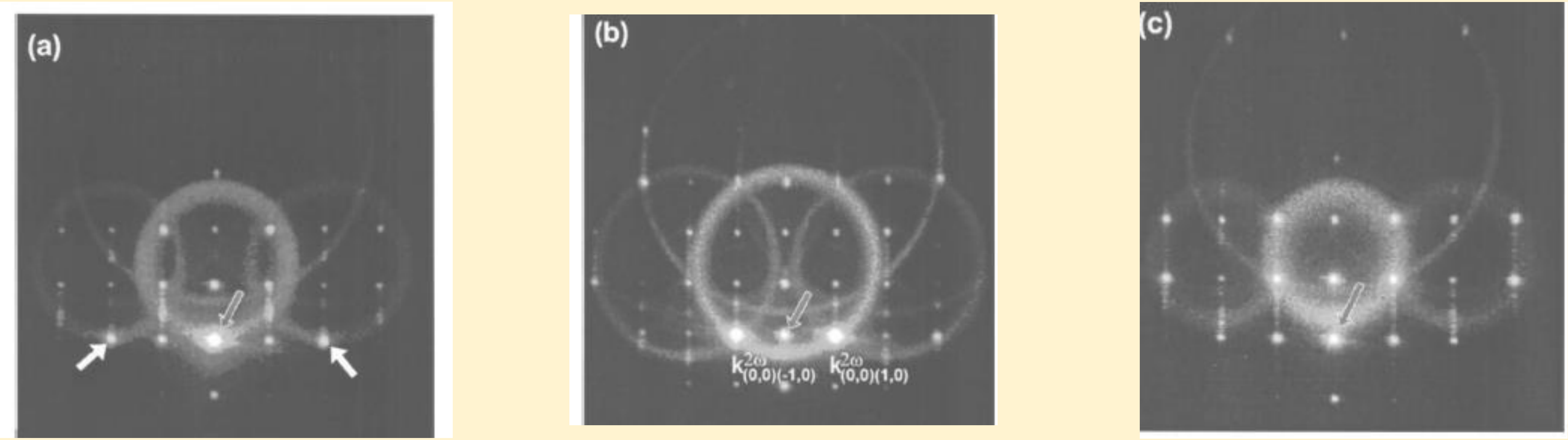
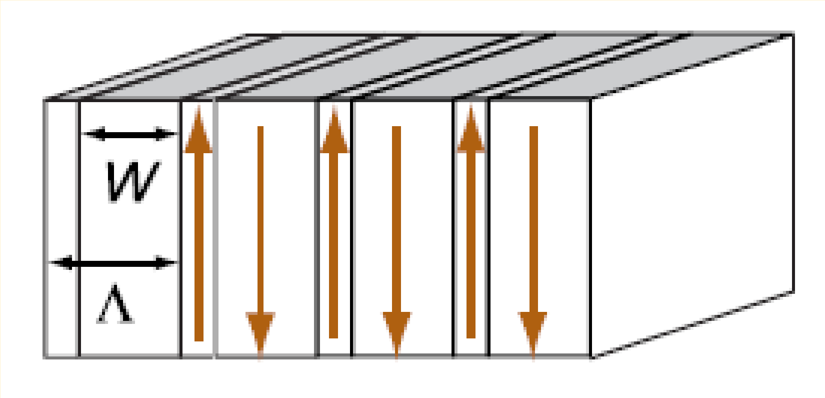


Fig. 3. Digital pictures of the SHG for different incidence angles θ_0. The fundamental light (796 nm) was filtered out. (a) $\theta_0 \simeq 0°$; the sample is placed for collinear PM in the incidence direction. (b) $\theta_0 \simeq -0.7°$; two intense SH beams are generated by NC PM. (c) $\theta_0 \simeq 0.5°$; SHG is achieved in several NC directions. Outlined arrows point out the direction of the emerging undiffracted fundamental beam.

Quasi Phase Matching

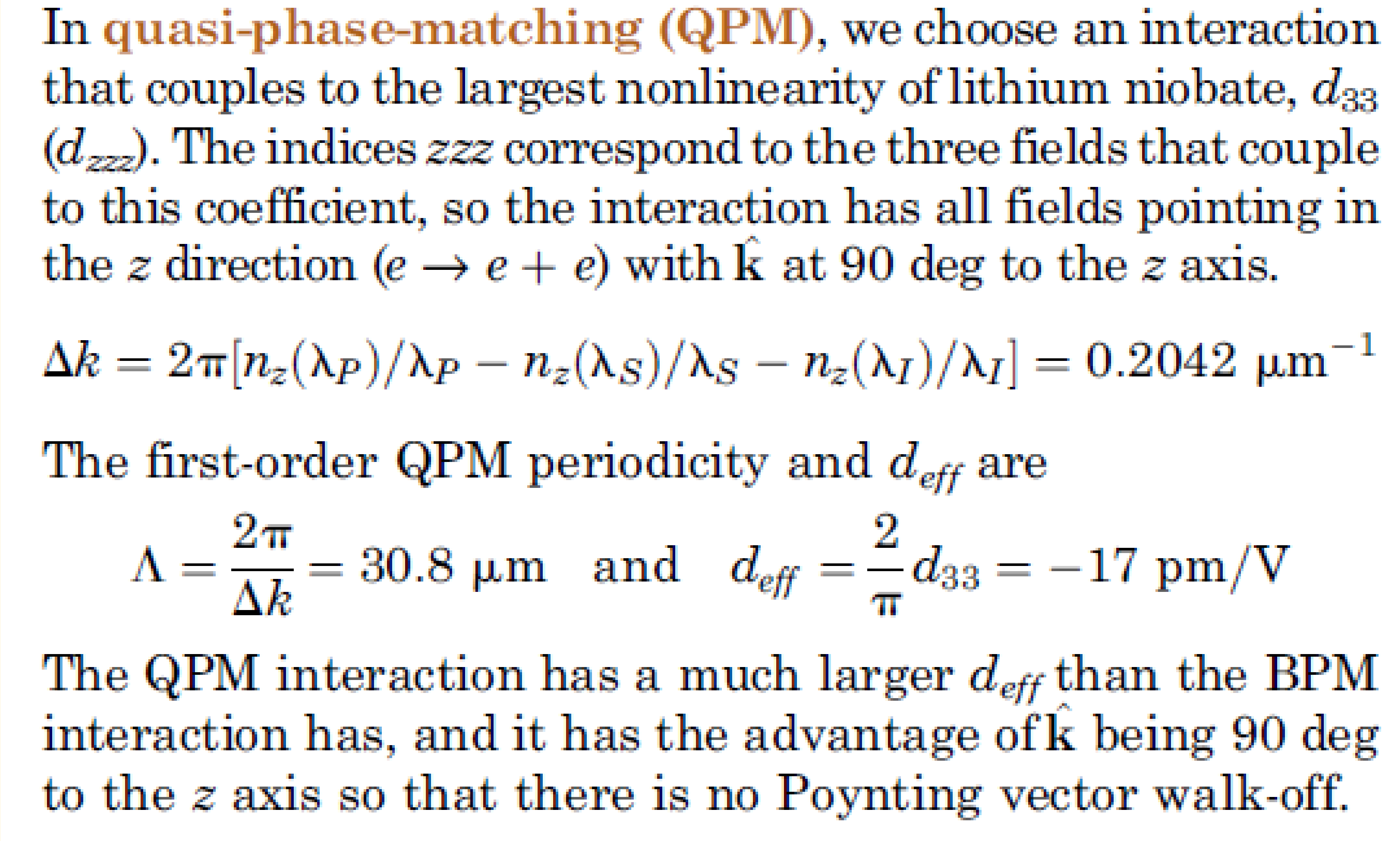


$$d_{eff} = \frac{2}{m\pi} d_o \sin\left(m\pi \frac{W}{\Lambda} \right)$$

Control sobre Periodicidad de los dominios ferroeléctricos

Condición de quasi phase matching

$$\Lambda = \frac{2\,\pi m}{\Delta k} = \frac{m\lambda_f}{2(n_{2\omega} - n_\omega)}$$



In **quasi-phase-matching (QPM)**, we choose an interaction that couples to the largest nonlinearity of lithium niobate, d_{33} (d_{zzz}). The indices zzz correspond to the three fields that couple to this coefficient, so the interaction has all fields pointing in the z direction ($e \rightarrow e + e$) with $\hat{\mathbf{k}}$ at 90 deg to the z axis.

$$\Delta k = 2\pi[n_z(\lambda_P)/\lambda_P - n_z(\lambda_S)/\lambda_S - n_z(\lambda_I)/\lambda_I] = 0.2042\ \mu\text{m}^{-1}$$

The first-order QPM periodicity and d_{eff} are

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta k} = 30.8\ \mu\text{m} \quad \text{and} \quad d_{eff} = \frac{2}{\pi} d_{33} = -17\ \text{pm/V}$$

The QPM interaction has a much larger d_{eff} than the BPM interaction has, and it has the advantage of $\hat{\mathbf{k}}$ being 90 deg to the z axis so that there is no Poynting vector walk-off.

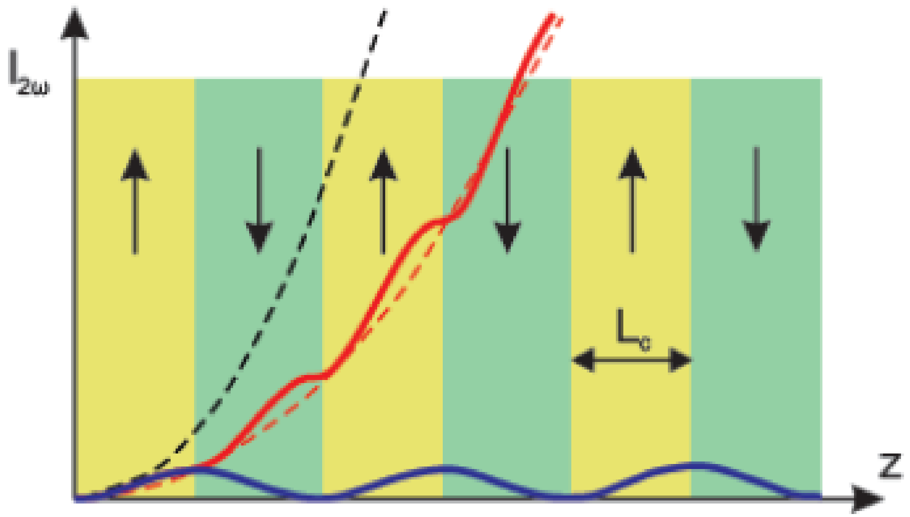
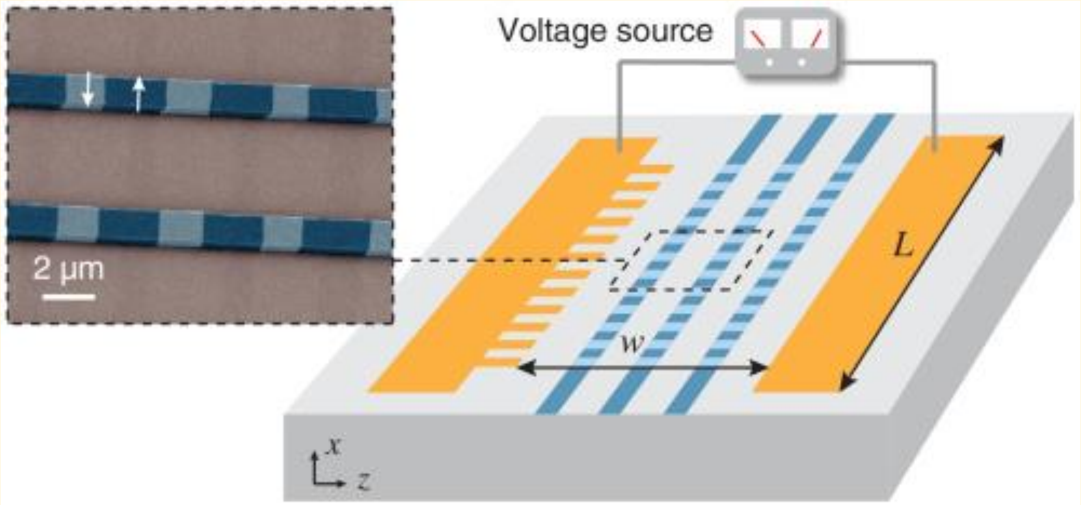


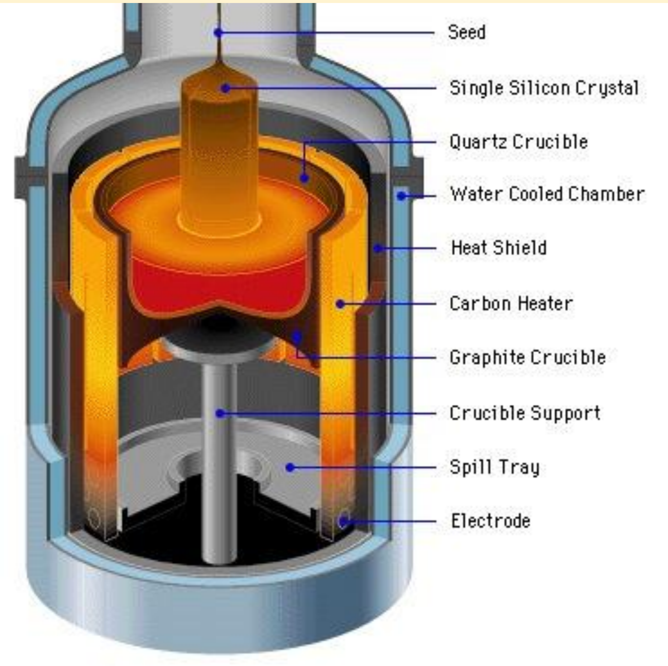
Fig.7. Intensidad de SA en función de la longitud del cristal PPLN: Birrefringencia en condición de ajuste de fase (línea discontinua negra), Cuasi-fase en un cristal PPLN de período 2Lc (línea continua roja) y fuera de ajuste de fase (línea continua azul).

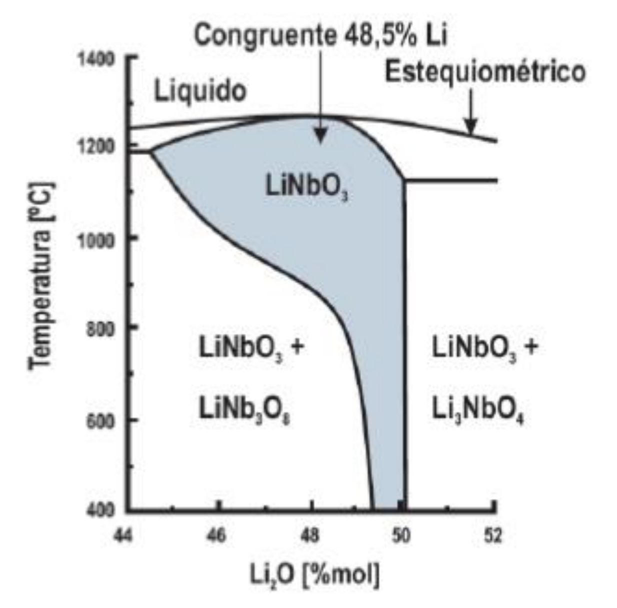
Como conseguir cristales PPLN (Periodic Poled Lithium Niobate)

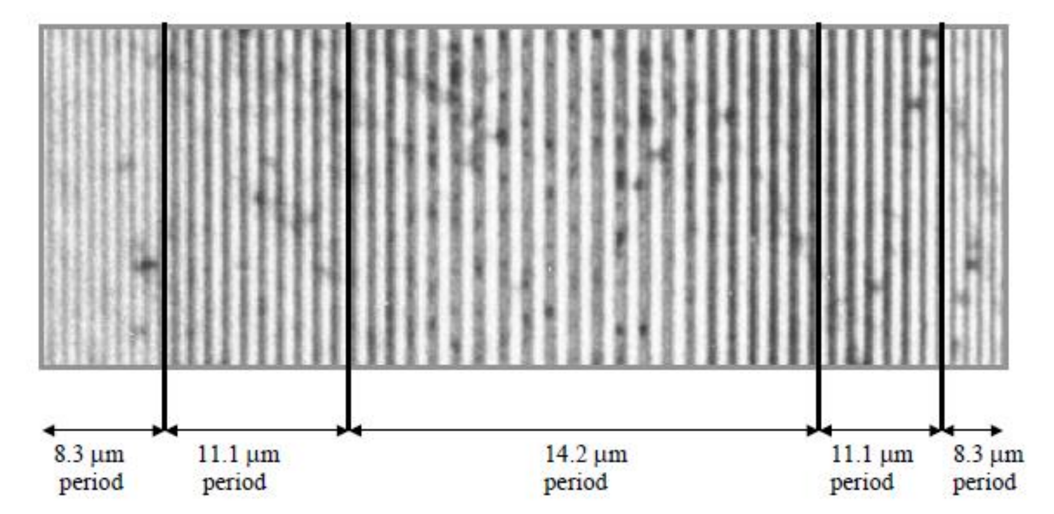
- Voltear los dominios ferroeléctricos con un campo eléctrico intenso (centenas kV/cm).



Engineering of lithium niobate domain structure through the off-centered Czochralski growth technique







Control en el espaciado de los dominios ferroeléctricos mediante la velocidad de rotación en una configuración fuera de eje. Periodos en los dominios ferroeléctricos de 8.3, 11.1 and 14.2 mm se logran con velocidades de rotación de 10, 7.5 and 6.1 rpm, respectivamente.

Engineering of lithium niobate domain structure through the off-centered Czochralski growth techniqueV Bermúdez, D Callejo, R Vilaplana, J Capmany, E Diéguez Journal of crystal growth 237, 677-681 (2002).

Red, green, and blue simultaneous generation in aperiodically poled Zn-diffused LiNbO3 : Er 3+ / Yb 3+ nonlinear channel waveguides

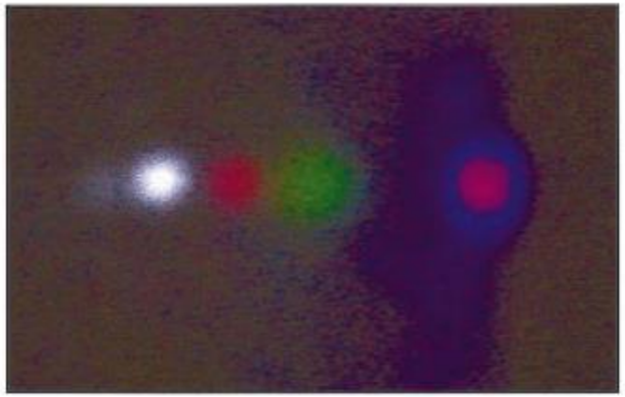
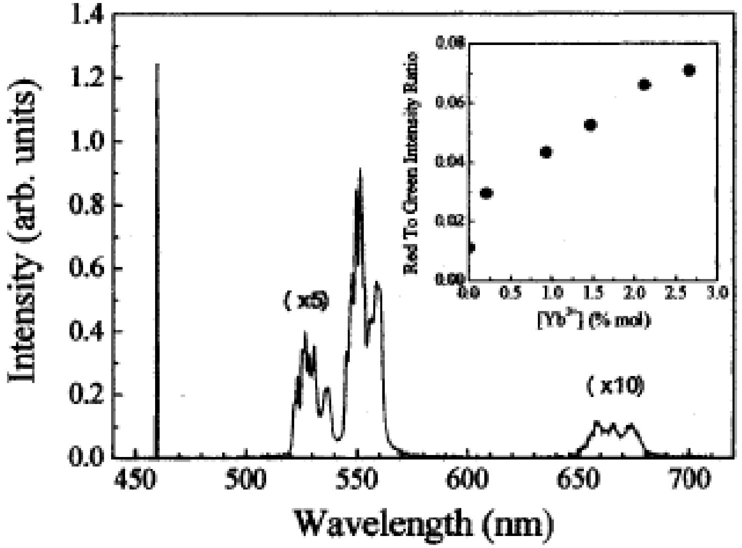


FIG. 2. (Color) Image of the output waveguide focused on a screen, after being spatially separated with a prism.



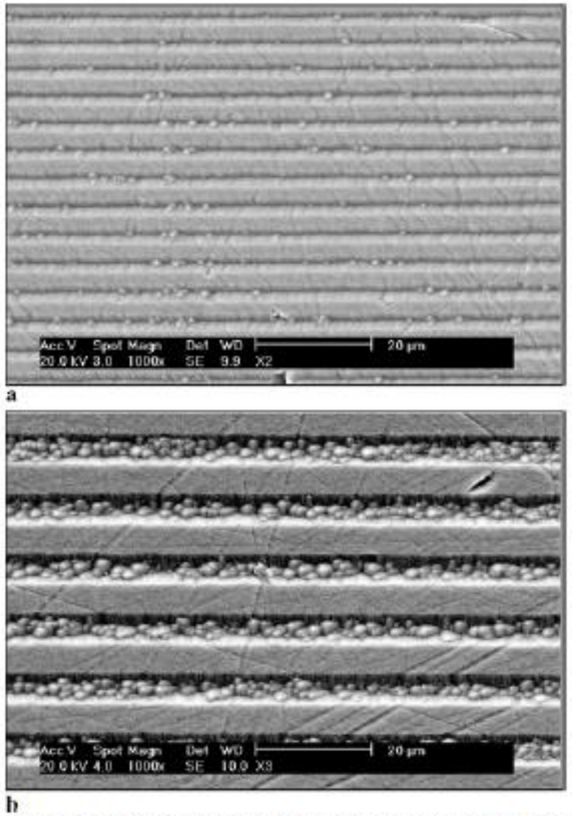
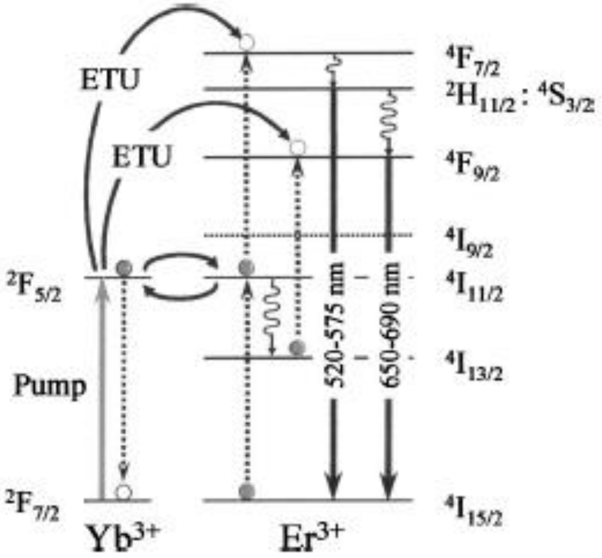
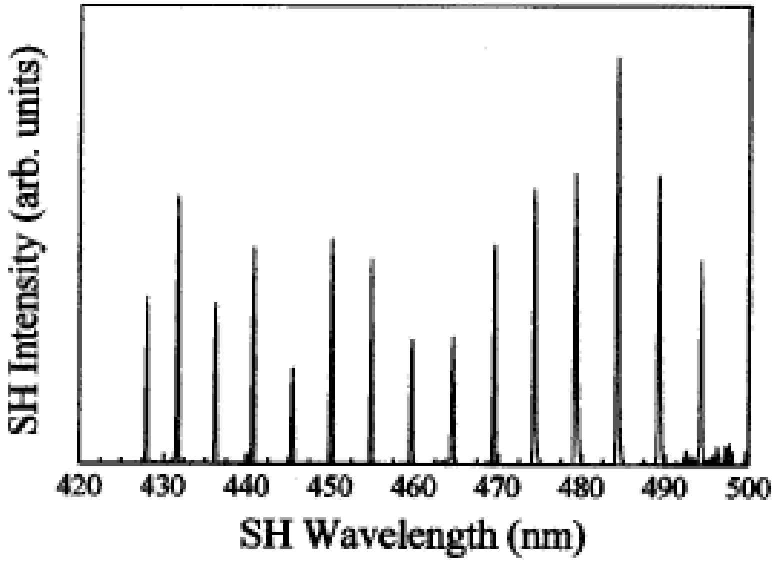


FIGURE 1 SEM micrographs of PP regions with **a** 5-µm and **b** 10-µm periods





Appl. Phys. Lett. **83**, 2991 (2003);
https://doi.org/10.1063/1.1617367

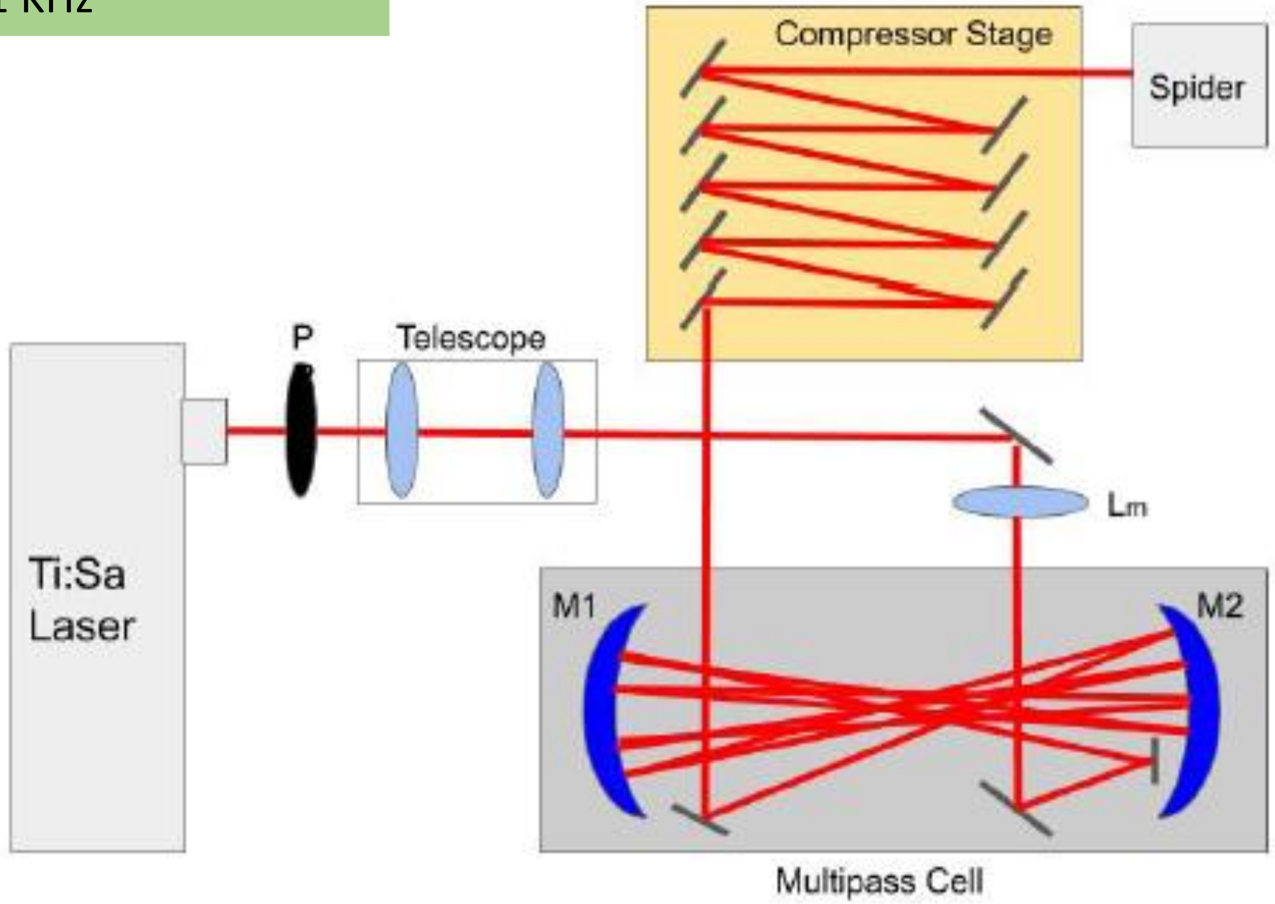
4-Lineas actuales del Grupo de Fotónica Integrada del CIOp

Óptica cuántica en FI-Conformación de pulsos de pocos ciclos en una celda de Herriot.

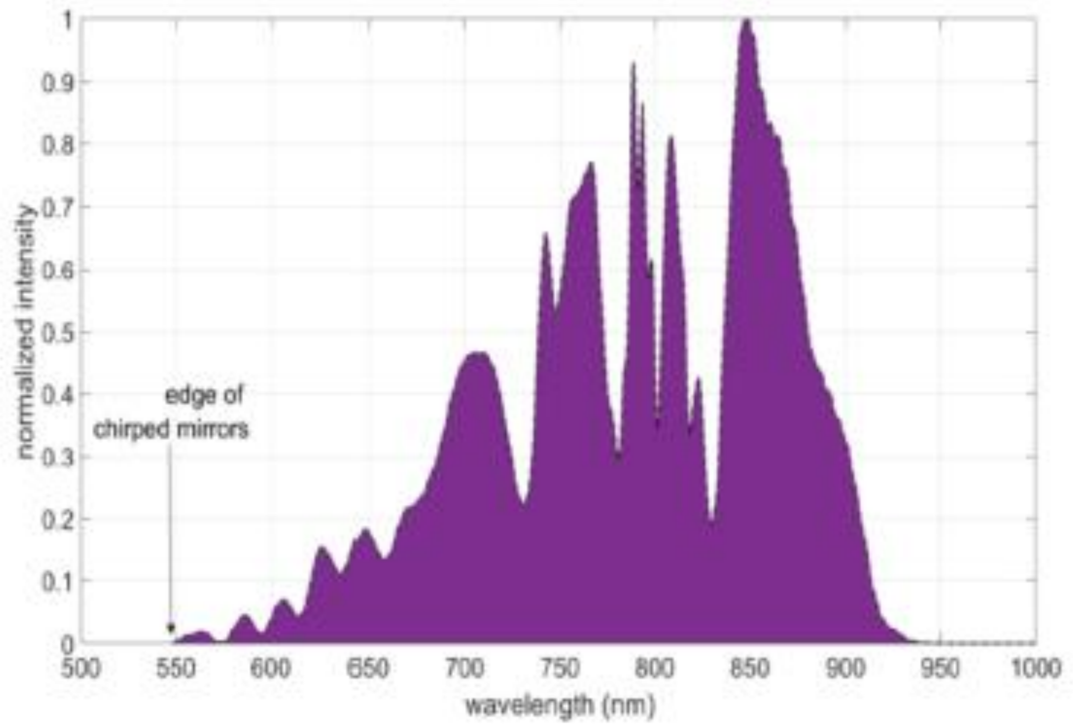
Compresión de pulsos mediante una celda multipaso

Colaboración con
Federico Furch.
Laser Lab Europe

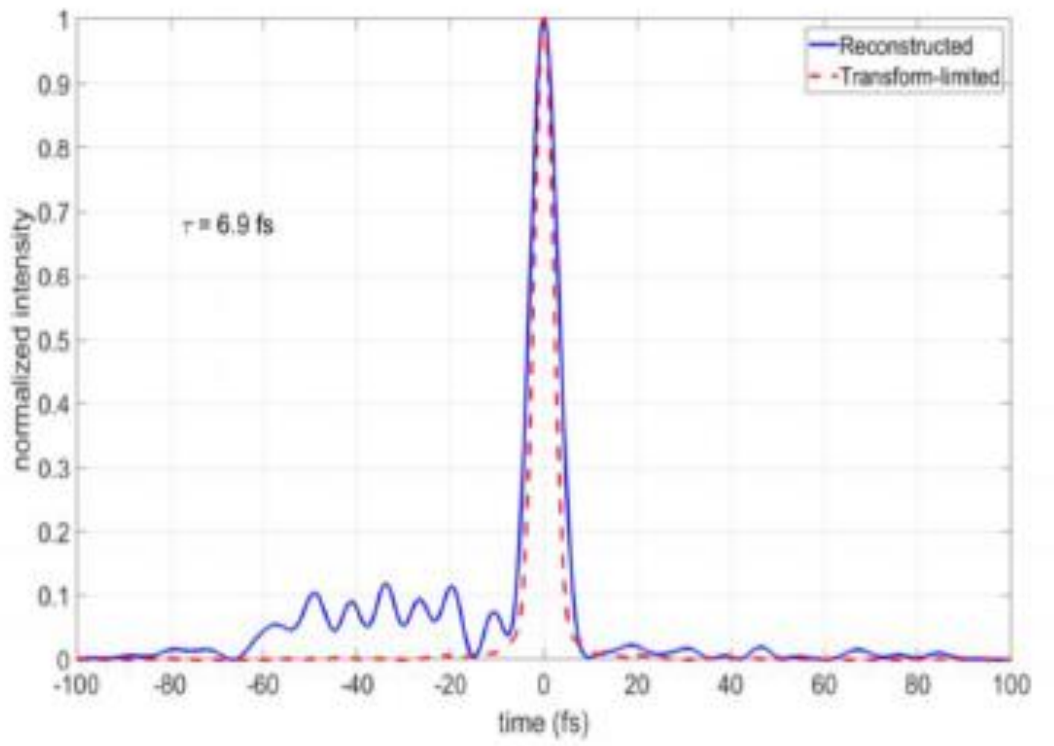
Pulso de entrada 1 mJ
40 fs, 1 KHz



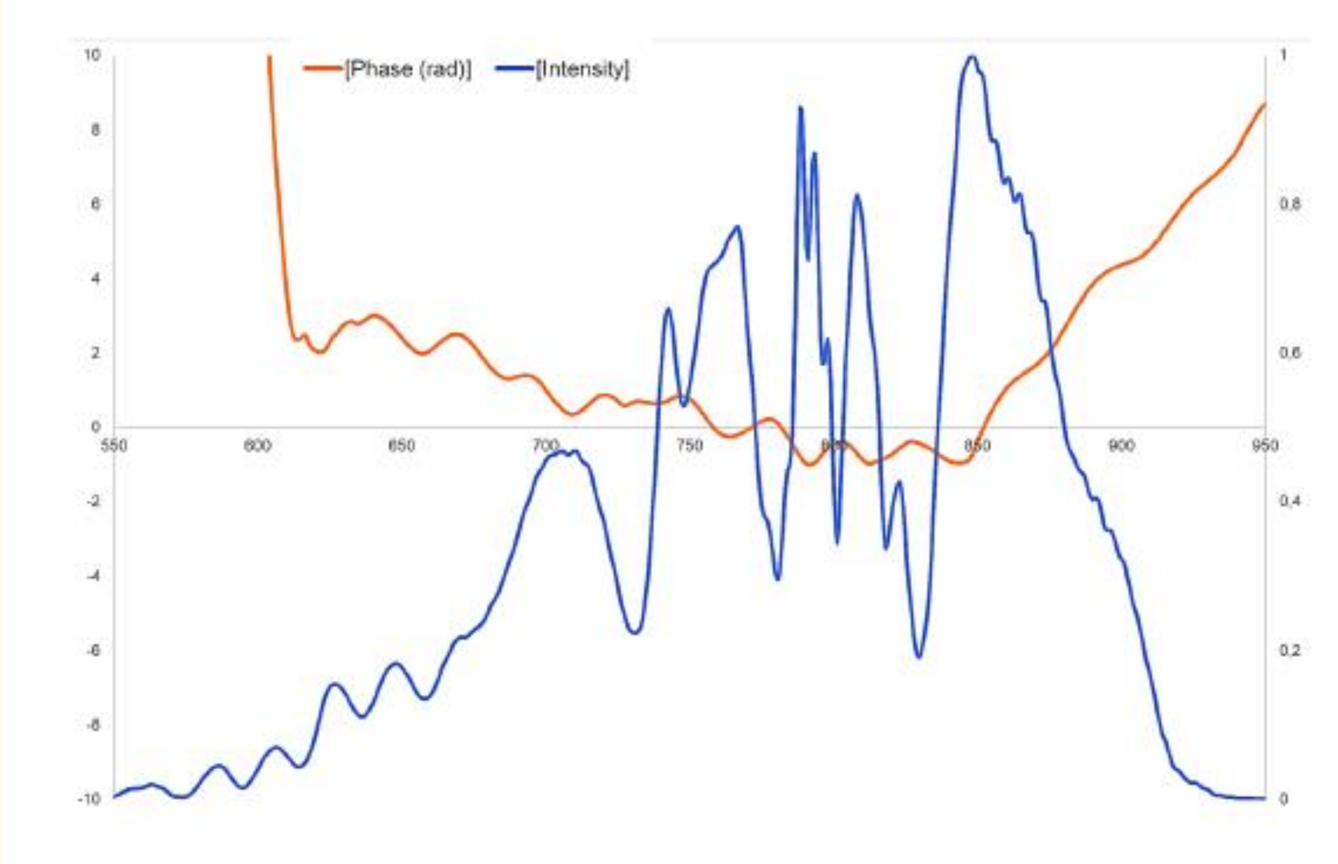
Espectro ensanchado mediante Self Phase Modulation en la cámara con 1500 mB de Argón



Pulso reconstruido y el limitado por transformada

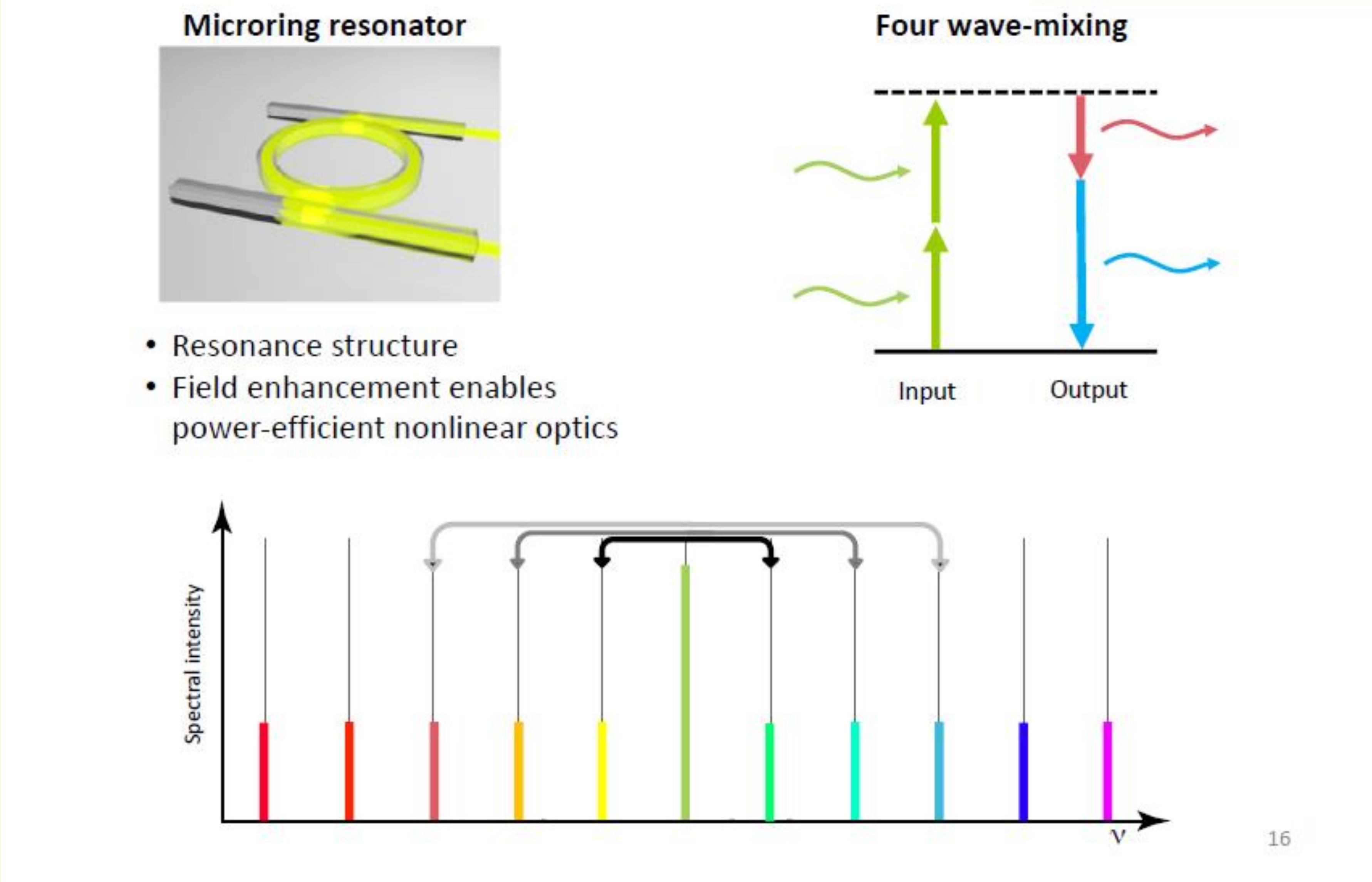


Espectro y fase del pulso luego de la Herriot Cell con Argón



Pulso de salida, mas de 150 μJ
Menos de 7 fs
Eficiencia del aproximadamente 50 %

Dispositivos en Óptica Cuántica

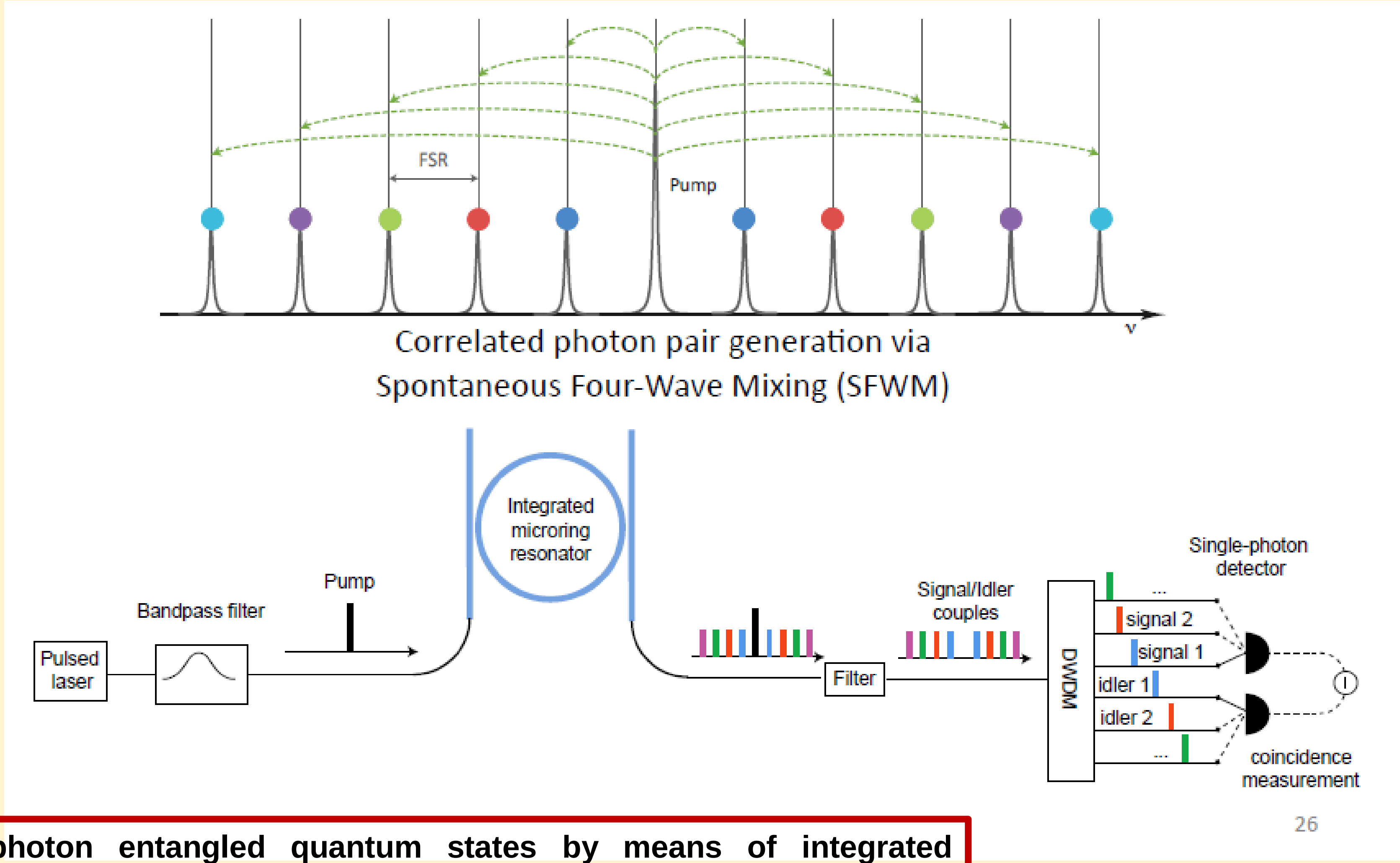


Microring resonator

- Resonance structure
- Field enhancement enables power-efficient nonlinear optics

Four wave-mixing

Correlación entre pares de fotones entrelazados generados por SFWM



Correlated photon pair generation via Spontaneous Four-Wave Mixing (SFWM)

Generation of multiphoton entangled quantum states by means of integrated frequency combs, C Reimer, M Kues, P Roztocki, B Wetzel, F Grazioso, BE Little, ST Chu, ...Science 351 (6278), 1176-1180

Muchas Gracias!!!!

Preguntas y consultas?