

Redes interorbitales basadas en moléculas fotónicas

Diego Antonio Román Cortés

Profesor Guía: Rodrigo Andrés Vicencio Poblete

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

1. Contexto del proyecto (introducción y descripción del estado del arte)

Entre los premios Nobel de la última década se encuentran varios que están estrechamente ligados a la óptica: por la generación de pulsos de luz ultra cortos (femtosegundos y luego attosegundos), por experimentos con fotones entrelazados, por la ideación de pinzas ópticas y por la invención de luces LED [1]. El estudio del comportamiento de la luz en diversos contextos ha permitido el posterior desarrollo tecnológico con aplicaciones industriales, en medicina, en comunicaciones e incluso militares. Una aplicación cotidiana es la fibra óptica, que actúa como una guía de onda para la luz y actualmente es el principal medio de transmisión de Internet en el país [2].

Numerosos de estos avances se han visto propiciado por la técnica de escritura de guías de onda por láser femtosegundo que ha permitido la fabricación de redes fotónicas de variada índole [3–10]. Su importancia radica no sólo en emular situaciones de la física del sólido, sino que también en el estudio de fenómenos ópticos como la no-linealidad tipo Kerr y su uso en la formación de solitones [11], la posibilidad de propagar luz cuántica [12–14] o su compatibilidad con la transmisión de información en la industria de telecomunicaciones [15].

En particular, el acoplamiento interorbital SP ha permitido el estudio de redes que presentan flujo magnético efectivo $\Phi = \pi$ el cual permite el transporte controlado de la luz [16–18]. Una aplicación directa de este fenómeno es la generación de guías de onda que admitan modos guiados de luz con momentum angular orbital (OAM) y la codificación de su carga topológica l como medio para transmitir información [19, 20]. Se ha reportado la propagación OAM sólo mediante de redes fotónicas que prevean simetría C_3 [21, 22]. Sin embargo, el acoplamiento entre modos OAM en una red fotónica permitiría la generación de flujos magnéticos distintos de 0 o π lo que se refleja en una direccionalidad dependiente de la circulación propagante [23, 24]. Para ello será necesario introducir el concepto de “moléculas fotónicas” [25] y su aplicación en la generación de redes fotónicas [26].

2. Objetivos de la tesis

1. Utilizar moléculas fotónicas como base para fabricar y estudiar redes interorbitales.
2. Entender el comportamiento de los modos guiados en moléculas fotónicas y su interacción en el régimen de acoplamiento débil.

3. Metodología

Desde las ecuaciones de Maxwell en un medio dieléctrico no magnético sin cargas ni corrientes libres es posible escribir la siguiente ecuación para la envolvente lenta del campo eléctrico $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_1(\mathbf{r})e^{-i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}}$.

$$(\nabla - i\mathbf{k}_1) \times ((\nabla - i\mathbf{k}_1) \times \mathbf{E}_1) = k^2 \mathbf{E}_1, \quad (1)$$

con $k \equiv k_0 n$. La ecuación (1) es resuelta por el software comercial COMSOL *Multiphysics* mediante elementos finitos y será una de las herramientas a usar en esta tesis. Por otro lado, utilizando la aproximación paraxial es posible simplificar la ecuación (1) y llegar a la implementación de los *Beam Propagation Methods* usados ampliamente en el área [4, 16, 17, 22, 27].

$$-i\lambda \frac{\partial}{\partial z} \psi(x, y, z) = \left(\frac{\lambda^2 \nabla_{\perp}^2}{2n_0} + \Delta n(x, y) \right) \psi(x, y, z) \quad (2)$$

Aplicando teoría acoplada de modos a la ecuación (2) para describir de forma discreta una red fotónica, es posible derivar las ecuaciones discretas tipo Schrödinger para la envolvente normalizada del campo eléctrico [11]:

$$-i \frac{\partial u_{\vec{n}}}{\partial z} = \beta_{\vec{n}} u_{\vec{n}} + \sum_{\vec{m} \neq \vec{n}} C_{\vec{n}, \vec{m}} u_{\vec{m}} \quad (3)$$

Para la fabricación de guías de onda se utiliza un láser femtosegundo pulsado de 1064 nm enfocado en un vidrio de borosilicato en movimiento gracias a una plataforma XYZ motorizada.

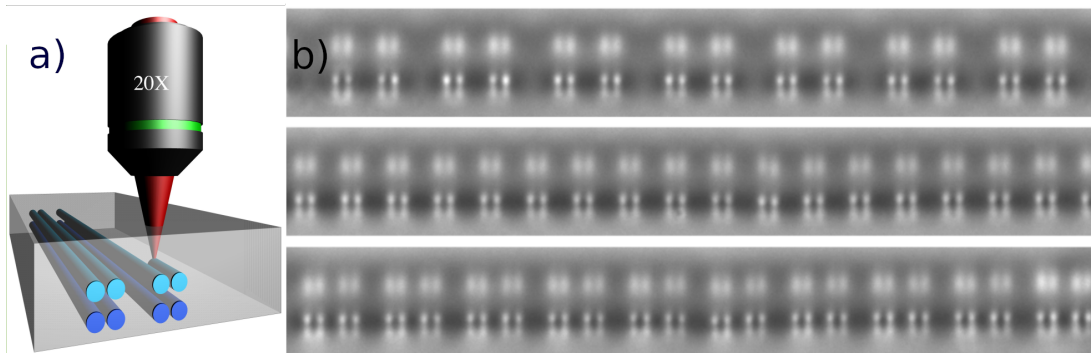


Figura 1: a) Montaje de fabricación de guías de onda mediante el enfoque de láser femtosegundo. b) Imagen microscópica de la cara salida iluminada con luz blanca.

La excitación de redes fotónicas interorbitales hace necesario el uso de condiciones iniciales no triviales. Para ello se implementó una técnica de modulación espacial de luz que permite modular tanto la amplitud como la fase de el haz tipo gaussiano proveniente del láser [28].

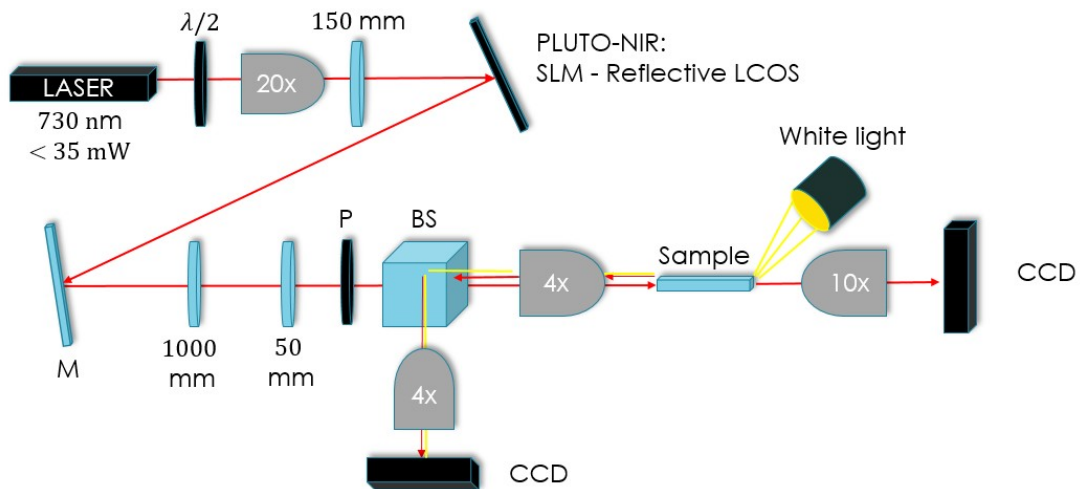


Figura 2: Montaje de excitación de guías de onda con condiciones iniciales moduladas en amplitud y fase.

4. Trabajo adelantado (si lo hubiera)

Durante el curso de Seminario de Investigación I (Primavera 2022) se hizo un barrido de parámetros de fabricación de guías de onda, en particular de potencia de escritura y separación entre guías, logrando la inversión de elipticidad el sintonizado de las constantes de propagación del modo fundamental S de la molécula de excitación y el modo excitado P_x de la molécula de acoplamiento.

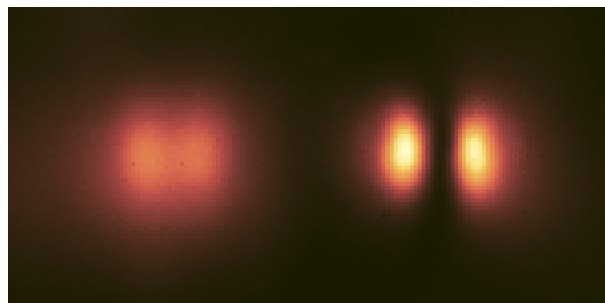


Figura 3: Interacción interorbital en moléculas fotónicas a $25 \mu\text{m}$ de separación y 13 mm de propagación. Se inyecta luz láser en la molécula S ubicada a la izquierda.

Durante el curso de Seminario de Investigación II (Otoño 2023) se implementó el montaje de modulación esquematizado en la Figura 1. Con ello fue posible la excitación de un dipolo horizontal:

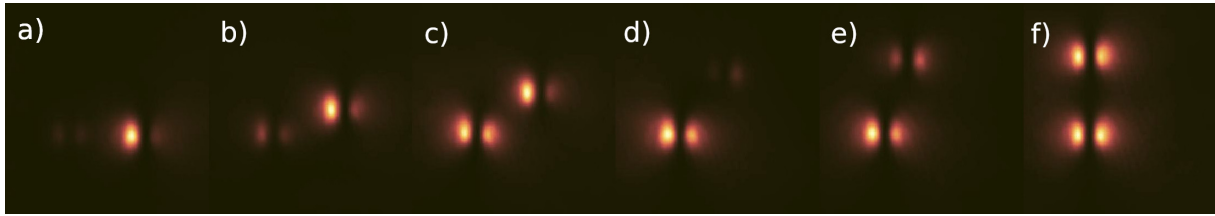


Figura 4: a)-f) Barrido en ángulo de dímeros dipolares a una distancia de separación de $25\ \mu\text{m}$ propagando en una distancia de $25\ \text{mm}$ en la dirección perpendicular al plano. La inyección se realiza en la molécula inferior izquierda con un modo Hermite-Gauss TEM_{10} . En d) se pasa por el ángulo mágico que hace nula la interacción dipolar.

Se está trabajando en la excitación de un OAM con $l = \pm 1$ usando la técnica de modulación espacial de la Figura 1:

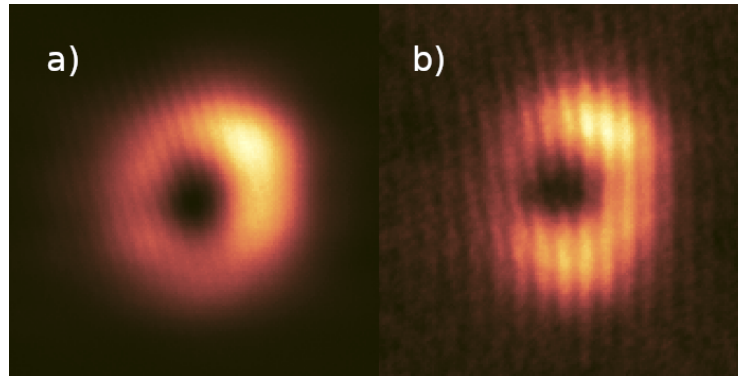


Figura 5: a) Intensidad de un OAM propagado en una molécula fotónica. b) Interferograma que captura el cambio de fase esperado.

5. Plan de trabajo o carta Gantt

Referencias

- [1] All nobel prizes in physics. URL <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics/>.
- [2] Hogares con acceso a internet fijo alcanzan el 67% y usuarios aumentan preferencia por redes de alta velocidad. URL <https://www.subtel.gob.cl/hogares-con-acceso-a-internet-fijo-alcanzan-el-67-y-usuarios-aumentan-preferencia-por-redes-de->
- [3] Alexander Szameit, Dominik Blömer, Jonas Burghoff, Thomas Schreiber, Thomas Pertsch, Stefan Nolte, Andreas Tünnermann, and Falk Lederer. Discrete nonlinear localization in femtosecond laser written waveguides in fused silica. *Opt. Express*, 13(26):10552–10557, Dec 2005. doi: 10.1364/OPEX.13.010552. URL <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-13-26-10552>.
- [4] Yonatan Plotnik, Or Peleg, Felix Dreisow, Matthias Heinrich, Stefan Nolte, Alexander Szameit, and Mordechai Segev. Experimental observation of optical bound states in the continuum. *Phys. Rev. Lett.*, 107:183901, Oct 2011. doi: 10.1103/PhysRevLett.107.183901. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.107.183901>.
- [5] Rodrigo A. Vicencio, Camilo Cantillano, Luis Morales-Inostroza, Bastián Real, Cristian Mejía-Cortés, Stefan Weimann, Alexander Szameit, and Mario I. Molina. Observation of localized states in lieb photonic lattices. *Phys. Rev. Lett.*, 114:245503, Jun 2015. doi: 10.1103/PhysRevLett.114.245503. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.245503>.
- [6] Seabrata Mukherjee, Alexander Spracklen, Debaditya Choudhury, Nathan Goldman, Patrik Öhberg, Erika Andersson, and Robert R. Thomson. Observation of a localized flat-band state in a photonic lieb lattice. *Phys. Rev. Lett.*, 114:245504, Jun 2015. doi: 10.1103/PhysRevLett.114.245504. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.245504>.
- [7] Daniel Leykam, Alexei Andreanov, and Sergej Flach. Artificial flat band systems: from lattice models to experiments. *Advances in Physics: X*, 3(1):1473052, 2018. doi: 10.1080/23746149.2018.1473052. URL <https://doi.org/10.1080/23746149.2018.1473052>.

- [8] Rodrigo A. Vicencio. Photonic flat band dynamics. *Advances in Physics: X*, 6(1):1878057, 2021. doi: 10.1080/23746149.2021.1878057. URL <https://doi.org/10.1080/23746149.2021.1878057>.
- [9] Javier Cubillos Cornejo, Diego Guzmán-Silva, Víctor Hugo Cornejo, Ignacio Bordeu, and Rodrigo A. Vicencio. Transport and localization on dendrite-inspired flat band linear photonic lattices. *Scientific Reports*, 13(1):13057, Aug 2023. ISSN 2045-2322. doi: 10.1038/s41598-023-39985-8. URL <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39985-8>.
- [10] Paloma Vildoso, Rodrigo A. Vicencio, and Jovana Petrovic. Ultra-low-loss broadband multiport optical splitters. *Opt. Express*, 31(8):12703–12716, Apr 2023. doi: 10.1364/OE.486855. URL <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-31-8-12703>.
- [11] Falk Lederer, George I. Stegeman, Demetri N. Christodoulides, Gaetano Assanto, Moti Segev, and Yaron Silberberg. Discrete solitons in optics. *Physics Reports*, 463(1):1–126, 2008. ISSN 0370-1573. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2008.04.004>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157308001257>.
- [12] S. Rojas-Rojas, E. Barriga, C. Muñoz, P. Solano, and C. Hermann-Avigliano. Manipulation of multimode squeezing in a coupled waveguide array. *Phys. Rev. A*, 100:023841, Aug 2019. doi: 10.1103/PhysRevA.100.023841. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.100.023841>.
- [13] R. Julius, A. N. Alias, and M. S. A. Halim. Quantum squeezing in coupled waveguide networks with quadratic and cubic nonlinearity. *The European Physical Journal Plus*, 137(1):91, Jan 2022. ISSN 2190-5444. doi: 10.1140/epjp/s13360-021-02302-1. URL <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02302-1>.
- [14] Joaquin Medina Dueñas, Gabriel O’Ryan Pérez, Carla Hermann-Avigliano, and Luis E. F. Foa Torres. Quadrature protection of squeezed states in a one-dimensional photonic topological insulator. *Quantum*, 5:526, August 2021. ISSN 2521-327X. doi: 10.22331/q-2021-08-17-526. URL <https://doi.org/10.22331/q-2021-08-17-526>.
- [15] Zhiwen Li, Siqi Hu, Qiao Zhang, Ruijuan Tian, Linpeng Gu, Yisong Zhu, Qingchen Yuan, Ruixuan Yi, Chen Li, Yan Liu, Yue Hao, Xuetao Gan, and Jianlin Zhao. Telecom-band waveguide-integrated mos2 photodetector assisted by hot electrons. *ACS Photonics*, 9(1):282–289, 2022. doi: 10.1021/acsp Photonics.1c01622. URL <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c01622>.
- [16] Diego Guzmán-Silva, Gabriel Cáceres-Aravena, and Rodrigo A. Vicencio. Experimental observation of interorbital coupling. *Phys. Rev. Lett.*, 127:066601, Aug 2021. doi: 10.1103/PhysRevLett.127.066601. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.127.066601>.
- [17] Christina Jörg, Gerard Queraltó, Mark Kremer, Gerard Pelegrí, Julian Schulz, Alexander Szameit, Georg von Freymann, Jordi Mompart, and Verónica Ahufinger. Artificial gauge field switching using orbital angular momentum modes in optical waveguides. *Light: Science & Applications*, 9(1):150, Aug 2020. ISSN 2047-7538. doi: 10.1038/s41377-020-00385-6. URL <https://doi.org/10.1038/s41377-020-00385-6>.
- [18] Gabriel Cáceres-Aravena, Diego Guzmán-Silva, Ignacio Salinas, and Rodrigo A. Vicencio. Controlled transport based on multiorbital aharonov-bohm photonic caging. *Phys. Rev. Lett.*, 128:256602, Jun 2022. doi: 10.1103/PhysRevLett.128.256602. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.128.256602>.
- [19] Yudong Lian, Xuan Qi, Yuhe Wang, Zhenxu Bai, Yulei Wang, and Zhiwei Lu. Oam beam generation in space and its applications: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 151:106923, 2022. ISSN 0143-8166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106923>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816621003924>.
- [20] Jaime A. Anguita, Joaquín Herreros, and Ivan B. Djordjevic. Coherent multimode oam superpositions for multidimensional modulation. *IEEE Photonics Journal*, 6(2):1–11, 2014. doi: 10.1109/JPHOT.2014.2309645.
- [21] Wei-Guan Shen, Yuan Chen, Hui-Ming Wang, and Xian-Min Jin. Oam mode conversion in a photonic chip. *Optics Communications*, 507:127615, 2022. ISSN 0030-4018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127615>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401821008646>.
- [22] Zhichan Hu, Domenico Bongiovanni, Ziteng Wang, Xiangdong Wang, Daohong Song, Jingjun Xu, Roberto Morandotti, Hrvoje Buljan, and Zhigang Chen. Topologically protected vortex transport via chiral-symmetric disclination, 2023.
- [23] J. Polo, J. Mompart, and V. Ahufinger. Geometrically induced complex tunnelings for ultracold atoms carrying orbital angular momentum. *Phys. Rev. A*, 93:033613, Mar 2016. doi: 10.1103/PhysRevA.93.033613. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.93.033613>.

- [24] Chuang Jiang, Yanting Wu, Meiyan Qin, and Shaolin Ke. Topological bound modes with orbital angular momentum in optical waveguide arrays. *Journal of Lightwave Technology*, 41(7):2205–2211, 2023. doi: 10.1109/JLT.2022.3200139.
- [25] M. Bayer, T. Gutbrod, J. P. Reithmaier, A. Forchel, T. L. Reinecke, P. A. Knipp, A. A. Dremin, and V. D. Kulakovskii. Optical modes in photonic molecules. *Phys. Rev. Lett.*, 81:2582–2585, Sep 1998. doi: 10.1103/PhysRevLett.81.2582. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.81.2582>.
- [26] Maxim Mazanov, Diego Román-Cortés, Gabriel Cáceres-Aravena, Christofer Cid, Maxim A. Gorlach, and Rodrigo A. Vicencio. Photonic molecule approach to multi-orbital topology, 2023. URL <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.03160>.
- [27] Ginés Lifante Pedrola. *Beam Propagation Method for Design of Optical Waveguide Devices*. Wiley, 2015. ISBN 9781119083382. URL <https://books.google.cl/books?id=ZV6-CgAAQBAJ>.
- [28] Bernd Terhalle. *Controlling Light in Optically Induced Photonic Lattices*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-16647-1. doi: 10.1007/978-3-642-16647-1_7. URL https://doi.org/10.1007/978-3-642-16647-1_7.