Transición entre regímenes de acoplamiento débil y fuerte de la densidad de corriente en sistemas híbridos dopados con nanoemisores en 2D: Un estudio numérico con el método FDTD.

Transition between weak and strong coupling regimes of current density in 2D hybrid systems doped with nanoemitters: A numerical study using the FDTD method

Jesús Jonathan Martínez-Ocampo[1,*], Gennadiy Burlak[1], Miguel Ángel Ruiz-Jaimes[2] y Eugenio César Velazquez-Santana[3]

[1]CIICAp, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Cuernavaca, Morelos 62210, México
[2]Universidad Politécnica del Estado de Morelos, Ingeniería en Informática e Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Boulevard Cuauhnáhuac 566, Colonia Lomas del Texcal, Jiutepec, Morelos 62550, México
[3]Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico 27, Zacatepec de Hidalgo, Morelos 62780. México
[*]jesusj@icf.unam.mx

PALABRAS CLAVE:

Nanoemisores, emisión laser, plasmón-polaritón

RESUMEN:

Estudiamos la dinámica y el campo óptico generado por nanoemisores (NEs) distribuidos aleatoriamente integrados en un arreglo (2D) de nanoanillos (NR), cuyo comportamiento se ve influenciado por excitaciones de plasmón-polaritón (PP). Los resultados evidencian que la frecuencia plasmónica influye notablemente en el tiempo que tardan los campos ópticos de los nanoemisores (NEs) en alcanzar el régimen de generación láser. Cuando esta frecuencia de plasma supera un valor crítico ωp>ωc, los campos PP se excitan macroscópicamente en todo el sistema, induciendo un acoplamiento fuerte entre la emisión de los NEs y los campos PP. Este fenómeno es calculado numéricamente usando el método de FDTD conduce a un aumento crítico de la corriente total en el arreglo de(2D).

KEYWORDS:

Nanoemitters, lasing emission, plasmon-polariton.

ABSTRACT:

We study the dynamics and optical field generated by randomly distributed nanoemitters (NEs) embedded in a two-dimensional (2D) array of nanorings (NRs), where their behavior is influenced by plasmon-polariton (PP) excitations. Our results demonstrate that the plasmonic frequency significantly affects the time required for the nanoemitters' optical fields to reach the lasing regime. When this plasma frequency exceeds a critical value (ωp>ωc) PP fields become macroscopically excited across the system, inducing strong coupling between NE emission and PP fields. This phenomenon is numerically modeled using the FDTD method, revealing a critical enhancement of the total current in the 2D array

• Recibido: 1 de septiembre de 2025 • Aceptado: 13 de febrero de 2026 • Publicado en línea: 2 de octubre de 2026

1. INTRODUCCIÓN

La manipulación eficiente de la luz a nanoescala es un desafío fundamental en la nanofotónica y la optoelectrónica moderna, con aplicaciones que van desde sensores ultrasensibles hasta dispositivos de comunicación óptica y celdas solares de alta

Copyright:© 2026 *por los autores*
Creative Commons Atribución 4.0 CC-BY

eficiencia [1,2]. En este contexto, la combinación de materiales bidimensionales (2D), como el grafeno y los nanotubos de carbono (CNTs), con estructuras plasmónicas ha surgido como una estrategia prometedora para controlar las propiedades ópticas a escalas nanométricas [3,4]. Los plasmones superficiales cuasipartículas resultantes del acoplamiento entre fotones y electrones de conducción en metales permiten la concentración de campos electromagnéticos en volúmenes muy por debajo del límite de difracción, lo que facilita interacciones luz-materia altamente localizadas [5,6].

Recientemente, sistemas híbridos que integran emisores cuánticos, como puntos cuánticos (QDs) o nanoemisores (NEs), con nanoestructuras metálicas han demostrado un control sin precedentes sobre la emisión y absorción de luz, gracias al acoplamiento plasmónico [7,8]. Asimismo, estudios teóricos y experimentales han explorado cómo la interacción dipolo-dipolo entre puntos cuánticos y nanotubos metálicos puede modular las propiedades ópticas no lineales, permitiendo efectos como la conmutación óptica ultrarrápida [9,10].

Además, los avances en la síntesis y caracterización de materiales 2D, como los CNTs, han abierto nuevas posibilidades para la ingeniería de plasmones en regímenes cuánticos. Se han reportado la existencia de plasmones intersubbanda en CNTs alineados y gateados [4], mostrando cómo las propiedades electrónicas unidimensionales pueden acoplarse con modos plasmónicos confinados. Estos sistemas exhiben una fuerte dependencia de la frecuencia plasmónica (ω_p), un parámetro clave que determina la respuesta óptica colectiva de los electrones en nanoestructuras metálicas [11].

En este trabajo, investigamos teórica y numéricamente la dinámica de NEs acoplados a un arreglo 2D de (NR), donde las excitaciones de plasmón-polaritón (PP) juegan un papel crucial en la transición al régimen de emisión láser. Siguiendo los fundamentos establecidos por [5] y [3], analizamos cómo la frecuencia plasmónica de las NR influye en el tiempo de transición hacia la inestabilidad láser, así como en el acoplamiento cooperativo entre los campos ópticos de los NEs y los modos PP. Nuestros resultados revelan un umbral crítico (ω_c) para la excitación macroscópica de campos PP, lo que induce un aumento drástico en la corriente del sistema, en concordancia con estudios previos sobre híbridos plasmónicos [12,13].

Este estudio no solo profundiza en la comprensión de los mecanismos físicos que gobiernan la interacción luz-materia en sistemas nanoestructurados, sino que también proporciona pautas para el diseño de dispositivos optoelectrónicos avanzados, donde la combinación de materiales 2D y plasmónica permite un control sin precedentes sobre la manipulación de la luz a nanoescala.

2. ECUACIONES BÁSICAS

Para llevar a cabo esta investigación, utilizamos las ecuaciones de Maxwell de la siguiente manera;

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\mu_0\frac{\partial\boldsymbol{H}}{\partial t},\nabla\times\boldsymbol{H}=\epsilon\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial t}+\sum_k j(\boldsymbol{R_k},t)\delta_{\boldsymbol{r}\boldsymbol{R_k}} \quad (1)$$

donde E es el campo eléctrico, Hel campo magnético y $j(R_k,t)$ la densidad de corriente eléctrica del nanoemisor en la posición R_k. j se relaciona con la densidad de polarización $P_k = P(R_k,t)$ de la siguiente manera $j(R_k,t)=\frac{\partial P(R_k,t)}{\partial t}$. Para encontrar el campo óptico del sistema resolvemos numéricamente la ecuaciones que relacionan a P_k, $E\,y\,H$ con los niveles poblacionales $N_{i,k}$ con $i,k=0,1,2\,y\,3$ que representan los niveles de energía de los nanoemisores. Para el caso de nanoemisores desacoplados la ecuación a resolver es la siguiente [14];

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial t^2}+\Delta\omega_a\frac{\partial P_k}{\partial t}+\omega_a^2 P_k=\frac{6\pi\varepsilon_0 c^3}{\tau_{21}\omega_a^2}\left(N_{1,k}-N_{2,k}\right)E_k \quad (2)$$

definiendo a $\Delta\omega_a$ como la frecuencia de radiación donde $\Delta\omega_a=\tau_{21}^{-1}+2T_2^{-1}$donde T_2 es el tiempo medio entre el desfase de eventos, τ_{21} es el tiempo de decaimiento espontaneo del segundo nivel atómico al primero. Para átomos de cuatro niveles las ecuaciones de los niveles poblacionales se encuentran desarrolladas en [15] y toman la forma que se muestra a continuación con $N_{i,k}=N_i\left(R_k,t\right)$,el código desarrollado en Python (apéndice A).

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_{0,k}}{\partial t}&=-A_r N_{0,k}+\frac{N_{1,k}}{\tau_{13}},\\ \frac{\partial N_{3,k}}{\partial t}&=A_r N_{0,k}-\frac{N_{3,k}}{\tau_{02}}\end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_{1,k}}{\partial t}&=\frac{N_{2,k}(t)}{\tau_{(21),(32)}}-\frac{(\boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{E})_k}{\hbar\omega_a}-\frac{N_{1,k}}{\tau_{13}},\\ \frac{\partial N_{2,k}}{\partial t}&=\frac{N_{1,k}(t)}{\tau_1}+\frac{(\boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{E})_k}{\hbar\omega_a}-\frac{N_{2,k}}{\tau_{02}}\end{aligned} \quad (4)$$

Una fuente externa excita a los nano emisores desde el nivel base $i=0$ hasta el tercer nivel a una tasa A_r, que es proporcional a la intensidad de bombeo. Después de un tiempo de vida τ_{32}, los emisores se transfieren de forma no radiactiva al segundo nivel. El segundo nivel y el primer nivel son los niveles de láser superior e inferior respectivamente. Los emisores pueden decaer desde el nivel superior al inferior mediante emisión tanto espontánea como estimulada, siendo $j\cdot E/\hbar\omega_a$ la tasa de radiación estimulada. Por último, los emisores también pueden decaer de manera no radiactiva desde el primer nivel hasta el nivel del estado base. Los tiempos de vida y los niveles de energía superior e inferior del láser son τ_{21}, E_2 y τ_{10}, E_1. La frecuencia individual de radiación de cada emisor es $\omega_a=(E_2-E_1)/\hbar$. Para estudiar la dinámica resolvimos las ecuaciones (1)-(4) numéricamente usando FDTD [16] en python, en la siguiente sección se muestran los resultados numéricos obtenidos.

En la figura 1 se muestra la distribución espacial de los NR en la superficie de un sustrato metálico, los puntos azules representan los NEs distribuidos de manera aleatoria en la superficie del sistema.

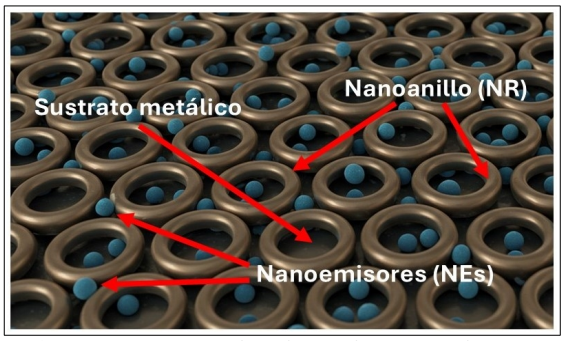

Figura 1. Los puntos de color azul muestran los NEs distribuidos en la superficie 2D de un sustrato metálico.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS PARA LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN UN SISTEMA 2D CON NR Y EFECTO LASER

Los siguientes resultados muestran un arreglo en (2D) de NR distribuidos en una malla de 7x7 donde se han incorporado 31 NEs aleatoriamente. Se utilizó un tiempo computacional t=200 para estudiar el efecto de la dinámica del campo óptico PP variando la frecuencia de plasma (ω_p); ω_p=2.3exp+11 Hz, ω_p=2.3exp+12 Hz yω_p=2.3exp+13 Hz. A continuación, se presentan la densidad de corriente promedio como función del tiempo para diferentes ω_p. En la figura 2 se muestra la densidad de corriente generada en el sistema para ω_p=2.3exp+11 Hz. En la figura 3 se muestra un aumento en un orden de magnitud de ω_p en este caso se uso ω_p =2.3exp+12 Hz y de la figura 4 se utilizó una ω_p =2.3exp+13 Hz.

4. SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA DEL CAMPO EN UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA EN 2D.

En la figura 5 se presenta diferentes simulaciones usando FDTD para la dinámica del campo en la estructura periódica para t=200, se muestra la componente del campo

eléctrico en Z, para diferentes ω_p.

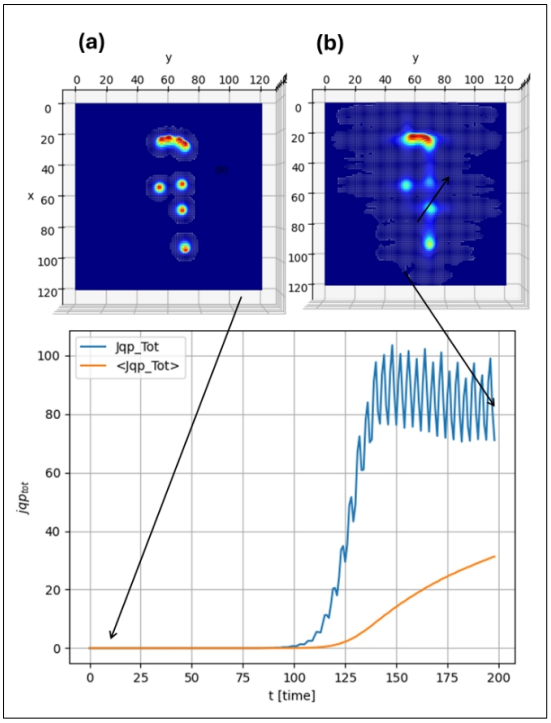

Figura 2. La grafica muestra con linea de color azul la densidad de corriente generada en el sistema de un arreglo de 7x7 NR donde se ha utilizado una ω_p =2.3exp+11 Hz para t=200, la linea de color rojo representa la densidad de corriente promedio. (a) distribución inicial de los NEs para t=2 y (b) campo óptico del PP sin emisión laser para t=200.

De la figura 5 se tiene que para bajas frecuencias ω_p=2.3exp+10 el campo eléctrico generado se propaga dentro y fuera de los nanoanillos teniendo características de un dieléctrico mientras que para ω_p=2.3exp+12 Hz ocurre una transición de fase y en el sistema y se comporta como un conductor y el campo radiante eléctrico únicamente se encuentra fuera de los nanoanillos.

5. CONCLUSIONES

Estudiamos la interacción entre nanoemisores distribuidos aleatoriamente en arreglos bidimensionales de nanoanillos (NR), los campos plasmónicos (PP) excitados en estos sistemas, y la dinámica resultante en la generación de luz laser. La investigación emplea simulaciones numéricas con el método FDTD para analizar cómo la frecuencia plasmónica (ω_p) influye en el comportamiento del sistema, específicamente en la formación de campos ópticos y en la transición hacia la emisión láser.

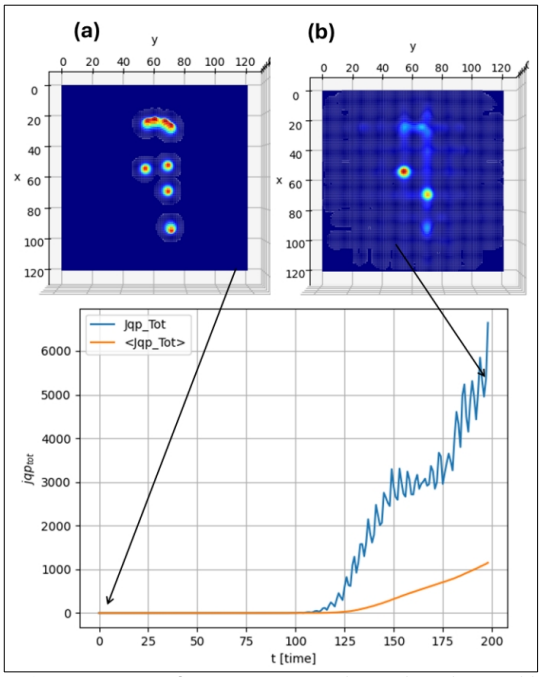

Figura 3. La grafica muestra con linea de color azul la densidad de corriente generada en el sistema utilizado una ω_p=2.3exp+12 Hz para t=200, la linea de color rojo representa la densidad de corriente promedio. (a) distribución inicial de los NEs para t=2, (b) campo óptico PP generado para t=200 en este tiempo ya no hay emisión laser y la energía se almacena en el sistema.

Las gráficas presentadas, especialmente en la figura 5, muestran claramente que la respuesta del campo eléctrico en la estructura periódica 2D varía notablemente con diferentes valores de (ω_p). A bajas frecuencias ω_p = 2.3×10^10 Hz, el campo eléctrico generado por la estructura se propaga dentro y fuera de los NR, exhibiendo características propias de un dieléctrico. Esto indica un acoplamiento débil donde los NR actúan como elementos que confinan parcialmente la luz sin facilitar un proceso de retroalimentación suficiente para la emisión láser. A medida que ω_p aumenta, la interacción se intensifica, y a frecuencias

cercanas a ω_p = 2.3×10^12 Hz, se observa una transición de fase en el sistema que hace que pase a comportarse como un conductor. En este régimen, el campo radiante eléctrico se encuentra principalmente afuera de los NR, y su propagación eficiente favorece la retroalimentación necesaria para la emisión láser, además de generar un notable aumento en la corriente total en la estructura, lo cual ha sido evidenciado en el aumento de la densidad de corriente en las gráficas de la figura 2, 3 y 4.

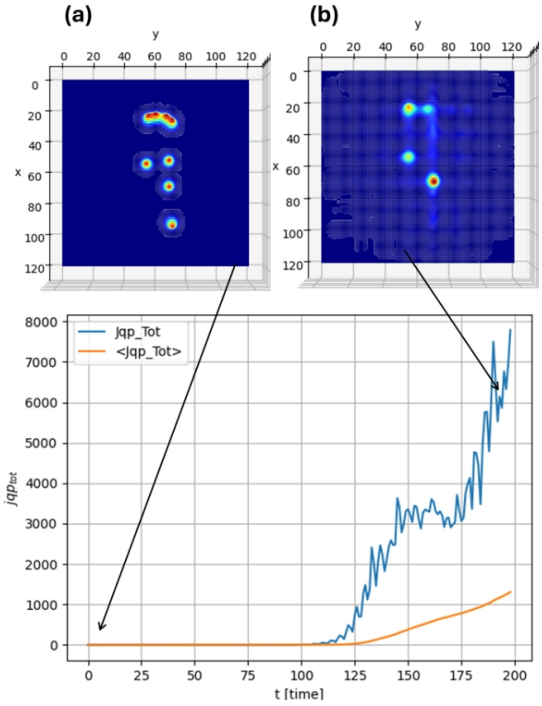

Figura 4. La linea de color azul muestra la densidad de corriente donde se ha utilizado una ω_p=2.3exp+13 Hz para t=200, la linea de color rojo representa la densidad de corriente promedio. (a) distribución inicial de los NEs para t=2 y (b) campo óptico del PP sin emisión laser para t=200.

Asimismo, el análisis de la dinámica de los nanoemisores (NEs), particularmente en la dependencia temporal, revela que cuando el ω_p supera un umbral crítico ω_c se logra un acoplamiento fuerte entre estos emisores y los campos PP excitados. Esto resulta en la macroscópica excitación de los campos PP en todo el sistema, facilitando una rápida acumulación de energía y favoreciendo condiciones óptimas para generar emisión láser. La presencia de un aumento crítico en la corriente y en la densidad de campo indica que la interacción entre los NEs y los modos plasmónicos puede ser controlada mediante el ajuste de la frecuencia plasmónica, permitiendo así la modulación de la emisión óptica y la potencial implementación en dispositivos nano-ópticos.

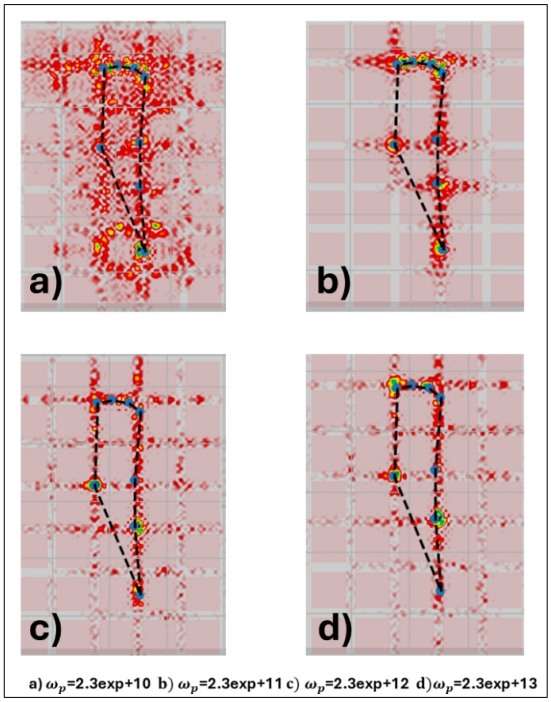

Figura 5. En a), b), c) y d) se observa la estructura del campo eléctrico para un sistema periódico en 2D que es exitado mediante una fuente externa para ω_p =2.3exp+10, ω_p=2.3exp+11 Hz, ω_p=2.3exp+12 Hz yω_p =2.3exp+13 Hz.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que el control preciso de la frecuencia plasmónica ω_p en sistemas híbridos que combinan estructuras plasmónicas y materiales 2D es fundamental para activar la transición de comportamiento dieléctrico a conductor en los NR, algo crucial para estimular fenómenos como la generación láser a partir de NEs. La simulación demuestra que, en ciertas condiciones, es posible inducir una fuerte retroalimentación optomecánica, esencial en la creación de nanodispositivos emitiendo láser y sensores de alta sensibilidad basados

en PP. Por lo tanto, la investigación concluye que la sintonización de la frecuencia plasmónica en arreglos estructurados de NR junto con la integración de NEs distribuidos aleatoriamente, abre nuevas vías para diseñar nanodispositivos fotónicos con control dinámico y eficiencia en la generación de luz. Estos resultados aportan conocimientos importantes para el desarrollo de tecnologías de nanoiluminación, detección y en la integración de componentes fotónicos en circuitos cuánticos, logrando manipular la luz a niveles nano y pico segundos mediante un control preciso de la interacción entre NEs y excitaciones plasmónicas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por CONACYT (México) a través de las subvenciones No. A1-S-9201, No. A1-S-8793.

REFERENCIAS

[1] AlAloul M, Rasras M. Plasmon-enhanced graphene photodetector with CMOS-compatible titanium nitride. Journal of the Optical Society of America B (2021) 38(2):602-610. doi: 10.1364/JOSAB.416520

[2] Eatemadi A, Karimkhanloo H, Daraee H, Kouh M, Zargham N, Akbarzadeh A, et al. Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. Nanoscale Research Letters (2014) 9:1-13. doi: 10.1186/1556-276X-9-393

[3] De Angelis F, Das G, Candeloro P, Patrini M, Galli M, Bek A, et al. Nanoscale chemical mapping using three-dimensional adiabatic compression of surface plasmon polaritons. Nature Nanotechnology (2010) 5(1):67-72. doi: 10.1038/nnano.2009.348

[4] Pitarke JM, Silkin VM, Chulkov EV, Echenique PM. Theory of surface plasmons and surface-plasmon polaritons. Reports on Progress in Physics (2006) 70(1):1. doi: 10.1088/0034-4885/70/1/R01

[5] Muchuweni E, Mombeshora ET, Martincigh BS, Nyamori VO. Recent applications of carbon nanotubes in organic solar cells. Frontiers in Chemistry (2022) 9:733552. doi: 10.3389/fchem.2021.733552

[6] Habisreutinger SN, Blackburn JL. Carbon nanotubes in high-performance perovskite photovoltaics and other emerging optoelectronic applications. Journal of Applied Physics (2021) 129(1):010903. doi: 10.1063/5.0035864

[7] Moore K, Wei W. Applications of carbon nanomaterials in perovskite solar cells for solar energy conversion. Nano Materials Science (2021) 3(3):276-290. doi: 10.1016/j.nanoms.2021.03.005

[8] Tian F, Sumikura H, Kuramochi E, Takiguchi M, Ono M, Shinya A, et al. All-optical dynamic modulation of spontaneous emission rate in hybrid optomechanical emitter-cavity systems. Optica (2022) 9(3):309-316. doi: 10.1364/OPTICA.444781

[9] Burlak G, Medina-Ángel G. Structure of optical Cherenkov radiation in a three-dimensional compound medium with carbon nanotubes. Journal of the Optical Society of America B (2019) 36(2):187-193. doi: 10.1364/JOSAB.36.000187

[10] Burlak G, Cuevas-Arteaga C, Medina-Ángel G, Martínez-Sánchez E, Calderón-Segura YY. Plasmon-polariton oscillations in three-dimensional disordered nanotubes excited by a moving charge. Journal of Applied Physics (2019) 126(1):013101. doi: 10.1063/1.5098019

[11] Burlak G, Medina-Ángel G, Martínez-Sánchez E. Condensation of plasmon-polaritons in dispersive carbon nanotubes assisted by a fast charge. Physica Scripta (2021) 96(12):125515. doi: 10.1088/1402-4896/ac2b46

[12] Yanagi K, Okada R, Ichinose Y, Yomogida Y, Katsutani F, Gao W, Kono J. Intersubband plasmons in the quantum limit in gated and aligned carbon nanotubes. Nature Communications (2018) 9(1):1121. doi: 10.1038/s41467-018-03381-y

[13] Singh MR, Schindel DG, Hatef A. Dipole-

dipole interaction in a quantum dot and metallic nanorod hybrid system. Applied Physics Letters (2011) 99(18):181106. doi: 10.1063/1.3658395

[14] Matis BR, Liskey SW, Gangemi NT, Edmunds AD, Wilson WB, Wheeler VD, et al. Observation of a transition to a localized ultrasonic phase in soft matter. Communications Physics (2022) 5:21. doi: 10.1038/s42005-021-00795-x

[14] Siegman AE. Lasers. Mill Valley, California: University Science Books; 1986. ISBN: 978-0935702118

[15] Taflove A, Hagness SC. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method. 3rd ed. Artech House; 2005. ISBN: 978-1580538329A

ACERCA DE LOS AUTORES

El **Mtro. Jesús Jonathan Martínez Ocampo** en el año 2018 obtiene el grado de Licenciatura en Ciencias con área terminal en Física en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, en el 2021 obtiene el grado de Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas con mención honorífica por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, actualmente realiza una estancia de investigación en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, dentro del Instituto de Física en las líneas de investigación; Medios Continuos, Óptica y Caracterización de materiales (silicio poroso). Colaboró como docente en la preparatoria La Salle Cuernavaca, en la Universidad Americana de Morelos, en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y en la Universidad Politécnica del Estado de Morelos. Desde el año 2014 ha trabajado como docente logrando mención honorífica nacional para Morelos en el XXIV concurso nacional de aparatos y experimentos de física y se obtiene primer lugar estatal en el 5to. concurso de aparatos y experimentos de física en Morelos, México. Ha impartido cursos de física, cálculo, laboratorio de física y múltiples asignaturas de las ciencias exactas y naturales a nivel medio superior, superior y posgrado. Actualmente se encuentra inscrito y cursando el Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, su tema principal de investigación es el estudio del campo óptico generado en sistemas 3D con nano emisores distribuidos aleatoriamente.

El **Dr. Gennadiy Burlak** estudió en la Universidad Nacional de Kiev (KNU), Ucrania, en el Departamento de Física Teórica. El Doctor en Ciencias Físico-Matemáticas. Trabajó como catedrático en el Departamento de Física Teórica de KNU. A partir de 1998 – a la fecha: Profesor Investigador Titular "C" del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México, tiene SNI nivel 3. El Dr. Burlak es Merito estatal en categoría Investigación científica 2022. El Dr. Burlak es autor y coautor de 12 libros y capítulos de libros, 175 artículos publicados en revistas internacionales, 186 ponencias en Congresos nacionales e internacionales. Bajo de su dirección han graduado: Doctorado: 8, de cuales 6 son miembros de SNI. Líneas principales de investigación son: la percolación óptica, teoría electromagnética, microesferas multicapas, radiación óptica de nano-estructuras, entrelazamiento cuántico, física no-lineal, inteligencia artificial.

El **Dr. Miguel Ángel Ruiz Jaimes** es Licenciado en Informática, con Maestría y Doctorado en Sistemas Computacionales. Actualmente se desempeña como Profesor de Tiempo Completo en la Universidad Politécnica del Estado de Morelos (UPEMOR), donde además es Director del Programa de Ingeniería en

Informática y Electrónica y es el contacto principal de la Cisco Networking Academy.
El Dr. Ruiz Jaimes es miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México (Nivel 1 en el SNI) y ha liderado múltiples proyectos de investigación con impacto tanto nacional como internacional. Es autor y coautor de capítulos de libros publicados en prestigiosas editoriales académicas, y su trabajo ha sido presentado en diversas conferencias nacionales e internacionales. Ha dirigido tesis de licenciatura y posgrado y asesorado en el diseño y desarrollo de proyectos tecnológicos aplicados.
También ha fungido como revisor par para revistas internacionales en áreas como Inteligencia Artificial, Ciudades Inteligentes e Internet de las Cosas (IoT). Su participación académica incluye ser miembro del Sistema Estatal de Investigadores de Morelos, servir como revisor editorial de libros académicos para instituciones como la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y ser miembro activo del Comité Internacional del Congreso México-Colombia.

El **Dr. Eugenio César Velázquez Santana**, es Ingeniero en Sistemas Computacionales y Maestro en Tecnologías de la Información por parte del Instituto Tecnológico de Zacatepec, estudió el doctorado en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnología en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, obteniendo mención honorifica por investigación. Actualmente es presidente del Consejo de Maestría en Inteligencia Artificial y Profesor de Tiempo Completo del Departamento de Sistemas y Computación. Fue miembro del Sistema Estatal de Investigadores del Estado de Morelos del año 2014 al 2018. Tuvo la oportunidad de ser revisor de artículos científicos de la IEEE región 9 del año 2016 al 2018. Escribió el libro "El proceso de dirección estratégica en Universidades Tecnológicas de México", así como los capítulos de libro "La influencia del capital social en la industria del software de México" y "Los procesos colaborativos en las Pymes manufactureras de México". Además, ha dirigido tesis de licenciatura y de posgrado.

APÉNDICE – A

En este apartado se muestra parte del código desarrollado en Python que nos permite encontrar la dinámica poblacional de los NEs para átomos de 4 niveles de energía y el acoplamiento de los PP para diferentes ω_p.

```
import PySimpleGUI as sg
sg.set_options(font=('Arial', 16-
6),element_padding=(1,1))

#sg.theme('SystemDefaultForReal')

sg.theme('LightGreen')

# region import
from posixpath import split
#import tkinter as tk
import tkinter.filedialog
#from tkinter import Tk, ttk
# from tkinter.constants import END
import time
import os
import sys
from ArchFDTD_12 import
ColorPrintG,ColorPrintY,ColorPrintR,ColorPrintC,Co
lorPrintM,saveDict,readDict,ChangeFileName,timerBg
n

from datetime import datetime
#import tkinter.messagebox

from MainClassFdtdDrude3D_12 import MainClass_3D
from MainClassFdtdDrude2D_12 import MainClass_2D

# endregion

#- - - - - - - class MyGui3sg- - - - - - - - - -
class MyGui3sg():
    os.system('cls')
    listEntries = []
    _fileNameLast = "!LastLaserSgPy.txt"
    _fileNameNew = _fileNameLast
    print('\nStart:\n')

    titlesDictNames = {
        "LengthScale": 1e-6,
        "indRefr": 1.35,
        "sizeXYBgn": 100,
        "shiftCNT": 2,
        "hCyl": 88,

        "drudeSigmaE": 1e-3,
        "drudeGammaE": 1e-3,
        "drudeOmegaP": 2.0e12,
        "iStepC": 12,
        "jStepC": 12,
        "drudeOmegaPh": 1e-3,
        "seed": 17,
        "tFin": 20,
        "randRegim": 1,
        "zBgn": 30,
        "cylsX": 6,
        "cylsY": 6,
        "dim": 3,
        "NSoc": 30,
        "Nz": 100,
        "width": 0.35,
        "tOff": 1000,
        "zHigh": 30,
        "diExt": 12,
        "wlengthSoc": 0.55,
        "regPlaneSoc": 0,
        "ampPlaneSoc": 0.01,
        # "laserFact":1e2,
        "omegaA": 1e0,
        "GeomSocs":"RandSocs,20",
    }
    # - - - - - __init__- - - - - - - - - - - - -
- - - - - - -
    def __init__(self, g=0):
        #window.close()
        sg.theme('LightGreen')
        os.system('cls')
        #Tk.update(self)#self.refresh()
        now = datetime.now(); print(now)
        # print ("\n\tCalculation:\n")
        print("Read file: " + self._fileNameNew)
        print("\n\tCalculation:\n")
#
        #if 1:
        self.layout = []
        wdth = 15-8+0

        comboInfo=[('1e-6', '1e-7') #"LengthScale"
                   ,('1.2', '1.35')#"indRefr"
                   ,('100', '160') #sizeXYBgn
                   ,('11', '12') #shiftCNT
                   ,(' 50', '60') #hCyl
                   ,('1e-4', '1e-3')
#drudeSigmaE
                   ,('1e-5', '1e-6')
#drudeGammaE
                   ,('1e12', '1e13')
#drudeOmegaP
                   ,('15', '16') #iStepC
                   ,('15', '16') #jStepC
                   ,('1e-3', ' 1e-4')
#drudeOmegaPh
                   ,('1', '2') #seed
                   ,('11', '50', '100', '150',
'200') #tFin
                   ,('1', '2') #randRegim
                   ,('48', '50') #zBgn
                   ,('10', '12') #cylsX
                   ,(' 10', '12') #cylsY
                   ,(' 2', ' 3') #dim
                   ,('9', '25', '40') #NSoc
                   ,('80', '100') #Nz
                   ,('0.4', '0.5') #width
                   ,('1120', '1220') #tOff
                   ,('30', '35') #zHigh
                   ,('12', '15') #diExt
                   ,('0.55', '0.45')
#wlengthSoc
                   ,('0', '1', '2')
#regPlaneSoc
                   ,('0','1e-1','1e-2','1e-3')
#ampPlaneSoc
                   ,('1', '0.5') #omegaA
                   ,('RandSocs,20',
'CassiniSocs,1.01,15', 'CassiniSocs,0.95,10',
'RandCylSocs,20',)
                   ]

        N=len(self.titlesDictNames)
        #for ii in range(N):
        for ii in range(28+1):
            val=list(self.titlesDictNames.values()
)[ii]
            nameI = list(self.titlesDictNames)[ii]
            if 0: #(abs(tmp)>1e3):
                tmp1=f'{tmp:.3E}'
```

```
                tmp=float(tmp1)
                #self.nameEntry.insert(tk.END,tmp1
)
            else:
                #self.nameEntry.insert(tk.END,list
(self.titlesDictNames.values())[ii])

                self.layout.append(
                 [sg.Text(text =f"{nameI}: "
                  , size=(wdth+6-2, 1)),
sg.Combo(values=comboInfo[ii]
                    , default_value=val,
key=nameI, size=(29+20,1))],
                )
        # - - - - end for ii

        valuesRegime = ("Save nothing","Save plots
png","Save multi plots 2D png","Save multi plots
3D png","Save plots 2D y 3D png")
        #valuesTpl = ("10,30,10", "0,30,0",
"0,20,0")

        valWhatCalc =
self.titlesDictNames.get("key_whatCalc")
        valWhatCalc = "I vs Wp" if
valWhatCalc==None else valWhatCalc

        valCalcNF =
self.titlesDictNames.get("key_calcNF")
        valCalcNF = False if valCalcNF==None else
valCalcNF

        valDebug =
self.titlesDictNames.get("key_debug")
        valDebug = False if valCalcNF==None else
valDebug

        valSaveMatlab =
self.titlesDictNames.get("key_saveMlab")
        valSaveMatlab = False if valCalcNF==None
else valSaveMatlab

        valSaveFigs =
self.titlesDictNames.get("key_saveFigs")
        valSaveFigs = "Save nothing" if
valSaveFigs==None else valSaveFigs

        self.layout.append( [
               [sg.Checkbox("debug", size=(12-4,
1), default=False, key="key_debug"),
                sg.Checkbox("Save Matlab",
size=(20, 1), default=valSaveMatlab,
key="key_saveMlab"),]

               ,[sg.Text("Regime", size=(15 - 8,
1)),
                 sg.Combo(
default_value=valSaveFigs, key="key_saveFigs",
size=(49, 1),values =
valuesRegime),]

                ,[sg.Input(visible=False,
enable_events=True, key='-IN-')
                , sg.Button("Run",size=(5+3,1),
key="key_run")
                , sg.Button("Read
last",size=(5+3,1)), sg.Exit(size=(5+3,1))]

                ,[sg.Checkbox("Calc
NF",  default=valCalcNF, key="key_calcNF")
                , sg.Button("Save
file",size=(5+3,1))
                , sg.Button("Open
file",size=(5+3,1))]

                ,[sg.Text("WhatCalc", size=(15 - 6,
1)),
                 sg.Combo(
default_value=valWhatCalc, key="key_whatCalc",
size=(49, 1), values = ["I vs Wp","Main
FDTD"],readonly=True)]

                ])

    #end  __init__
#end class MyGui:
        window = sg.Window('Window Title',
self.layout, size=(300-40-00, 800-20))
        #window.close()
        while True:             # Event Loop
            event, values =
window.read()
            #window.close()

            if event == 'Save file':
                self.SaveFileTitlesDictNames()

            if event == "Read last":
                window.close()
                self.ReadLast()

            if event == "Open file":
                window.close()
                self.ReadTitlesDictNames()

            if event in (sg.WIN_CLOSED, 'Exit'):
                break
            # When choice has been made, then fill
in the listbox with the choices

            if event == 'key_run':
                #window.close()
                self.Calculate(values=values)
                window.close() # close and exit
                # break

        window.close()
```