

Optical Bistability in an Asymmetric Fabry-Perot Optical Cavity Filled with Hybrid Molecules Consisting of a Semiconductor Quantum Dot Coupled to a Graphene-Covered Metal Nanosphere

Nader Daneshfar^{1*}, Ali Bahari², Milad Jalilian³

1 Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Razi University, Kermanshah, Iran.
2 Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

3 PhD Student, Department of Physics, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

Correspondence

Nader Daneshfar

Email: ndaneshfar@razi.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Hybrid nanosystems in which quantum dots are coupled with plasmonic nanoparticles have attracted significant attention in recent years due to the ability of plasmon-exciton coupling to dramatically enhance local fields. These systems enable strong light-matter interactions, leading to nonlinear optical phenomena. In this study, optical bistability, in which a system exhibits two stable output states for the same input intensity, in an asymmetric Fabry-Perot optical cavity filled with hybrid structures consisting of a semiconductor quantum dot coupled to a graphene-covered metal nanosphere is investigated. Optical bistability is a nonlinear phenomenon that manifests as hysteresis in transmission or reflection under varying incident light intensity. To achieve optical bistability, a Fabry-Pérot cavity is used, which provides the feedback mechanism necessary for the emergence of bistability [1-4].

Model and Theory

We consider an asymmetric Fabry-Pérot optical cavity filled with semiconductor quantum dots (SQDs) coupled to graphene-coated metallic nanospheres (GNPs). In this structure, we consider the semiconductor quantum dot as a two-level atomic system, where $|g\rangle$ is the ground state and $|e\rangle$ is the excitonic excited state [5]. The system is irradiated by a laser field as probe field E_p , along the direction of the interparticle axis of the hybrid system. Under the rotating-wave approximation, the Hamiltonian of the hybrid system in the interaction picture can be expressed as [4]

$$H_{\text{int}} = -\hbar\Delta_p\sigma_{ee} - \hbar(\Omega_p\sigma_{eg} + H.c.) \quad (1)$$

The dynamic equations of the system are formulated using the density matrix approach by solving the master equation, $\frac{d\rho}{dt} = \frac{i}{\hbar}[H, \rho]$, and Maxwell's equation, $\frac{\partial E_p}{\partial z} = i\frac{N\omega_p\mu_{eg}}{2c\epsilon_0}\rho_{eg}$ which μ_{eg} is the electric dipole moment and ρ_{eg} is the density matrix element, is used to describe the propagation of the probe field inside the cavity to achieve optical bistability. By solving the density matrix equations in the steady state and applying boundary conditions, the relationship between the incident and transmitted fields is obtained, which can be used to investigate the output intensity as a function of the input intensity. It is interesting to note that for a graphene-coated spherical nanoparticle with radius R_0 and dielectric constant ϵ_1 situated in a medium with permittivity ϵ_2 , the dipole

How to cite

Daneshfar, N. Bahari, A. Jalilian, M. (2026). Optical Bistability in an Asymmetric Fabry-Perot Optical Cavity Filled with Hybrid Molecules Consisting of a Semiconductor Quantum Dot Coupled to a Graphene-Covered Metal Nanosphere, Optoelectronic, 8(4), 53-60.

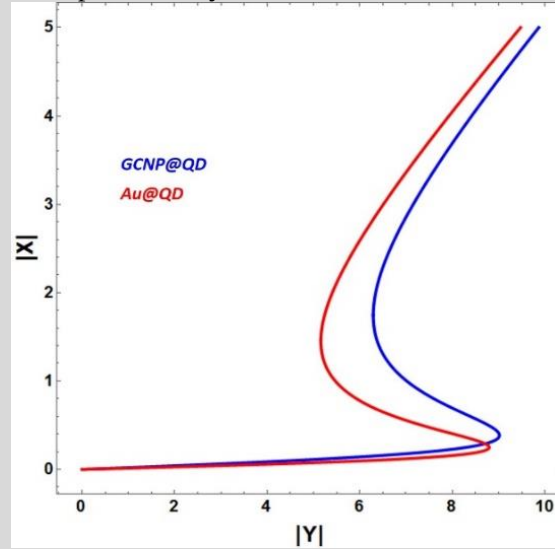
polarizability in the quasistatic approximation is defined as follows [6]:

$$\alpha(\omega) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \frac{2i\sigma_g}{\varepsilon_0\omega R_0})}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 + \frac{2i\sigma_g}{\varepsilon_0\omega R_0}} \quad (2)$$

where σ_g is the surface conductivity of graphene.

Result and Discussion

The figure below shows the optical bistability behavior in two hybrid systems: a quantum dot–gold nanoparticle system and quantum dot–graphene-coated nanoparticle system. In this figure, the output intensity is plotted versus the input intensity.



When the cavity is filled with graphene-coated nanoparticle-quantum dot hybrid molecules, the lower and upper thresholds shift, and the width of the hysteresis loop also changes. These differences demonstrate the role of the nanoparticle type in the variability of the system's optical response. However, by appropriate selection of the type of nanoparticle in a hybrid system, it can be beneficial for controlling the hysteresis loop and the switching thresholds, which is important for designing and developing nanophotonic devices.

Conclusions

In this study, optical bistability in a Fabry-Pérot optical cavity filled with semiconductor quantum dots coupled to graphene-coated metal nanospheres was investigated. The impact of nanoparticle size, the number density of hybrid molecules, and transmission intensity on optical bistability and its hysteretic behavior was shown and demonstrated. It is found that the use of graphene-coated nanoparticles leads to changes in the lower and upper thresholds.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this manuscript.

References

- [1] Zhao, W.-H., et al., *Optical bistability in a heterodimer composed of a quantum dot and a metallic nanoshell*. Optics Express, 2023. 31(18): p. 28805-28815.
- [2] Zhang, J., X.M. Wu, and B. Dang, *Optical bistability and multistability in hybrid system*. Laser Physics, 2023. 33(9): p. 096002.
- [3] Huang, Y., A.E. Miroshnichenko, and L. Gao, *Low-threshold optical bistability of graphene-wrapped dielectric composite*. Scientific Reports, 2016. 6(1): p. 23354.
- [4] Fan, S., et al., *Nonlinear optical nonreciprocity in a surface plasmon-exciton coupled asymmetric cavity system*. The European Physical Journal D, 2022. 76(11): p. 212.

- [5] Artuso, R.D. and G.W. Bryant, *Strongly coupled quantum dot-metal nanoparticle systems: Exciton-induced transparency, discontinuous response, and suppression as driven quantum oscillator effects*. Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics, 2010. 82(19): p. 195419.
- [6] Jalilian, M., A. Bahari, and N. Daneshfar, *Investigation of optical bistability from a graphene-wrapped nanoparticle near a pair of molecules and an electric point charge*. Applied Physics A, 2025. 131(8): p. 1-6.

ABSTRACT

In this paper, optical bistability in an asymmetric Fabry-Pérot optical cavity filled with semiconductor quantum dots coupled to graphene-coated metal nanospheres investigated due to the outstanding optical properties of graphene, such as its strong nonlinear optical response and strong light-graphene interaction, which have many potential applications in optoelectronic devices. In a hybrid molecule consisting of a semiconductor quantum dot coupled to a graphene-coated nanoparticle, the quantum dot is considered as an atomic system, and the Hamiltonian of the system is written under the electric dipole and rotating-wave approximations. Then, the dynamical equations of the system are formulated using the density matrix approach, and Maxwell's equation is used to describe the propagation of the probe field inside the cavity in order to achieve optical bistability. By solving the density matrix equations in the steady state and applying the boundary conditions, the relationship between the incident and transmitted fields is obtained, which can be used to investigate the output intensity as a function of the input intensity. It should be noted that the hybrid structures consisting of a quantum dot-metal nanoparticle hybrid structures have been of interest in recent years due to their ability to enhance plasmon-exciton interactions; therefore, covering a nanoparticle with graphene allows for greater tunability. The effect of nanoparticle size, the number density of hybrid molecules, and the transmission intensity on optical bistability and its hysteretic behavior investigated.

KEYWORDS

Optical Bistability, Graphene-Coated Nanoparticle, Quantum Dot.

فصلنامه علمی

اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

دوپاینداری نوری در یک کاواک نوری نامتقارن فابری-پرو پرشده با مولکول‌های هیبریدی تشکیل‌شده از یک نقطه کوانتومی نیم‌رسانا جفت‌شده با یک نانوکره فلزی پوشیده با گرافن

نادر دانش‌فر^{۱*}، علی بهاری^۲، میلاد جلیلیان^۳

چکیده

در این مقاله، دوپاینداری نوری در یک کاواک نوری نامتقارن فابری-پرو حاوی نقاط کوانتومی نیم‌رسانا جفت‌شده با نانوکره‌های پوشیده با گرافن به علت خواص نوری برجسته گرافن، همچون پاسخ اپتیکی غیرخطی قوی و برهمکنش قوی نور با گرافن که کاربردهای بالقوه زیادی در دستگاه‌های اپتوالکترونیکی دارد، بررسی می‌شود. در مولکول هیبریدی نقطه کوانتومی نیم‌رسانا-نانوذره پوشیده با گرافن، نقطه کوانتومی همچون یک سیستم اتمی در نظر گرفته می‌شود و هامیلتونی سیستم تحت تقریب دوقطبی الکتریکی و موج چرخان نوشته می‌شوند. سپس معادلات دینامیکی سیستم در رهیافت ماتریس چگالی نوشته شده و از معادله ماکسول برای توصیف انتشار میدان کاوش‌گر درون کاواک جهت دستیابی به دوپاینداری اپتیکی استفاده می‌شود. با حل معادلات ماتریس چگالی در حالت پایا و اعمال شرایط مرزی، رابطه بین میدان‌های فرودی و تراگسیل به‌دست می‌آید که با استفاده از آن می‌توان شدت خروجی برحسب شدت ورودی را بررسی کرد. لازم به ذکر است که ساختارهای هیبریدهای متشکل از نقطه کوانتومی-نانوذره به دلیل توانایی در تقویت برهم‌کنش پلاسمون-اکسایتون همواره مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ بنابراین پوشاندن یک نانوذره با گرافن، امکان تنظیم‌پذیری بیشتری را فراهم می‌سازد. اثر اندازه نانوذره، چگالی تعداد ذرات مولکول‌های هیبریدی و میزان شدت عبور روی دوپاینداری اپتیکی و رفتار منحنی پسماند آن بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی

دوپاینداری نوری، نانوذره پوشیده با گرافن، نقاط کوانتومی.

۱ دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۲ استاد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
۳ دانشجوی دکترا، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

نویسنده مسئول:

نادر دانش‌فر

رایانامه: ndaneshfar@razi.ac.ir

استناد به این مقاله:

نادر دانش‌فر، علی بهاری، میلاد جلیلیان (۱۴۰۵). دوپاینداری نوری در یک کاواک نوری نامتقارن فابری-پرو پرشده با مولکول‌های هیبریدی تشکیل‌شده از یک نقطه کوانتومی نیم‌رسانا جفت‌شده با یک نانوکره فلزی پوشیده با گرافن. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، ۸(۴)، ۵۳-۶۰.

مقدمه

دوپایدارای نوری پدیده‌ای غیرخطی است که طی آن یک سامانه برای شدت ورودی یکسان، دو حالت خروجی پایدار از خود نشان می‌دهد و در نتیجه حلقه پسماند مشخصی شکل می‌گیرد. این پدیده نقشی بنیادین در کلیدزنی نوری، حافظه‌های نوری و ادوات نامتقارن در فوتونیک ایفا می‌کند [۱، ۲]. دوپایدارای نوری زمانی پدیدار می‌شود که یک سازوکار بازخوردی (برای نمونه یک کاواک) با محیطی اشباع‌پذیر یا غیرخطی ترکیب شده و منحنی ورودی - خروجی با شکل S ایجاد گردد که زمینه‌ساز تحقق عملکردهایی همچون حافظه و کلیدزنی نوری در ادوات تمام‌نوری است.

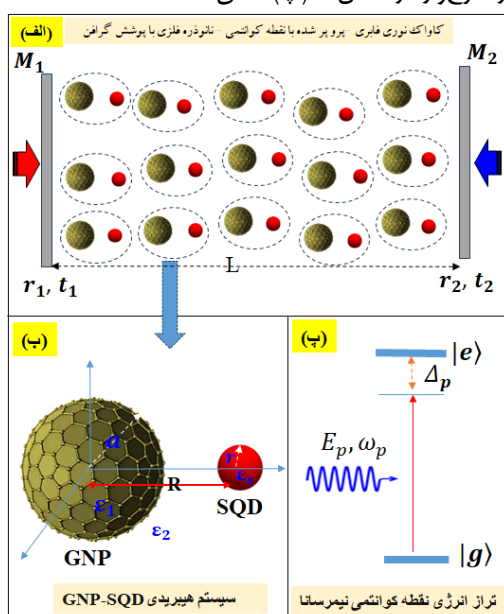
سیستم‌های هیبریدی که در آن‌ها گسیل‌کننده‌های کوانتومی (مانند اتم‌ها و نقاط کوانتومی) با نانوذرات پلاسمونیک جفت می‌شوند، در سال‌های اخیر به دلیل توانایی جفت‌شدن پلاسمون - اکسایتون در تقویت چشمگیر میدان‌های موضعی و غیرخطی‌ها، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند [۳]. علاوه بر این، نانوساختارهای هیبریدی متشکل از نقاط کوانتومی و نانوذرات پلاسمونیک، از طریق پلاسمون‌های سطحی موضعی موجب تقویت برهم‌کنش نور - ماده شده و امکان بروز غیرخطی‌ت قوی در شدت‌های پایین را فراهم می‌سازند. نشان داده شده است که قرار دادن نقاط کوانتومی و نانوذرات پلاسمونیک در کاواک‌های اپتیکی، غیرخطی‌ت نوری به‌مراتب تقویت‌شده‌ای را نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که پلاسمون‌های سطحی نانوذره میدان نوری را در نقطه کوانتومی متمرکز ساخته و شدت لازم برای اشباع و بروز دوپایدارای را کاهش می‌دهند.

با وجود پیشرفت‌های اخیر در زمینه سامانه‌های هیبریدی نقطه کوانتومی - نانوذره فلزی، بررسی ترکیب نقاط کوانتومی با نانوذرات پوشیده‌شده از گرافن کمتر مطالعه شده است [۴، ۵]. گرافن، که آلوتروپی تک‌لایه‌ای از کربن با ساختار شبکه لانه‌نبوری است از ویژگی‌های نوری منحصر به فردی نظیر جذب فراگیر نور در گستره وسیعی از طول‌موج‌ها، پذیرفتاری مرتبه سوم بالا و تحرک الکترونی فوق‌العاده سریع برخوردار است. پوشش‌دهی مواد با لایه‌های گرافنی، آن‌ها را به جاذب‌های اشباع‌پذیر کارآمدی تبدیل می‌کند که مشابه نمونه‌های به‌کاررفته در سامانه‌های لیزری مولد پالس برای قفل‌شدگی مد عمل می‌کنند [۶، ۷]. در این پژوهش، مطالعه‌ای نظری از دوپایدارای نوری در یک سامانه هیبریدی شامل نقطه کوانتومی دوترازی واقع در مجاورت یک نانوذره فلزی پوشیده‌شده با گرافن ارائه می‌شود. برای دستیابی به دوپایدارای اپتیکی، از یک کاواک فابری - پرو که سازوکار بازخورد لازم را برای ظهور دوپایدارای

فراهم می‌سازد، استفاده می‌شود.

مدل فیزیکی و معادلات حاکم

همان‌طور که در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است یک کاواک نوری نامتقارن فابری - پرو پرشده با نقاط کوانتومی نیم‌رسانا (SQD) جفت‌شده با نانوکره‌های فلزی پوشیده با گرافن (GNP) که ساختار نقطه کوانتومی - نانوذره تشکیل یک مولکول هیبریدی را می‌دهد، در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ۱ (ب) ساختار هیبریدی بررسی‌شده از یک نقطه کوانتومی نیم‌رسانا به شعاع r که در مجاورت یک نانوذره فلزی کروی با پوشش گرافن با شعاع a قرار گرفته است، تشکیل شده است. فرض می‌شود که فاصله بین‌ذره‌ای (فاصله مرکز تا مرکز) بین این نانوذره پوشیده با گرافن و نقطه کوانتومی R است که به‌طور معمول بزرگ‌تر از شعاع نانوذره فلزی است تا از هم‌پوشانی فیزیکی مستقیم اجتناب شود و برهم‌کنش‌ها به‌صورت غیرتماسی (مانند برهم‌کنش‌های دوقطبی) مدل‌سازی شوند. همچنین فرض می‌شود در این سیستم هیبریدی برهم‌کنش مجاور ندارد. علاوه بر این، نقطه کوانتومی نیم‌رسانا به‌صورت یک سیستم اتمی دوترازی است که $|g\rangle$ حالت پایه و $|e\rangle$ حالت برانگیخته اکسایتونی هستند و به‌طور طرح‌وار در شکل ۱ (پ) نشان داده شده است.



شکل ۱. الف) یک کاواک فابری - پرو به طول L پرشده با مولکول‌های هیبریدی با چگالی تعداد N که تشکیل شده از نقطه کوانتومی نیم‌رسانا (SQD) جفت‌شده با نانوذره پوشیده با گرافن (GNP) یک مولکول هیبریدی GNP-SQD (ب) تراز انرژی نقطه کوانتومی نیم‌رسانا (پ) که تحت تابش یک میدان با دامنه E_p و فرکانس ω_p قرار گرفته است. $\Delta p = \omega_p - \omega_{eg}$ نامیزانی میدان کاوش است.

همان گونه که پیشتر بیان شد، سیستم هیبریدی درون یک کاواک فابری - پرو نامتقارن قرار داده شده است که بازتابندگی نامساوی آینه‌های آن موجب ایجاد محیط فوتونی ناهمگن

$$\rho_{eg} = \frac{i\Gamma_{eg}(\gamma_{eg} + i\Delta_p)(\Omega_{p1} + \Omega_{p2} + \Lambda_p D)}{\Gamma_{eg}(\gamma_{eg}^2 + i\Delta_p^2) + 4\gamma_{eg}|\Omega_{p1} + \Omega_{p2} + \Lambda_p D|^2} D = \quad (5)$$

$$\frac{i\Gamma_{eg}(\gamma_{eg} + i\Delta_p)(\Omega_{p1} + \Omega_{p2})}{\Gamma_{eg}(\gamma_{eg}^2 + i\Delta_p^2) + 4\gamma_{eg}|\Omega_{p1} + \Omega_{p2}|^2}$$

این رویکرد امکان تحلیل دقیق دینامیک گذارهای انرژی در سامانه نقاط کوانتومی را فراهم می‌سازد. از سوی دیگر، میدان پروب در حین انتشار درون کاواک تحت تأثیر قطبش ایجاد شده توسط مجموعه‌ای از هیبریدهای نقاط کوانتومی - نانوذره قرار می‌گیرد. این برهم‌کنش منجر به تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های انتشار و پاسخ اپتیکی سیستم می‌شود و نقشی اساسی در تعیین رفتار نهایی کاواک ایفا می‌کند. ما یک کاواک فابری-پرو به طول L را در نظر می‌گیریم که در آن آینه‌های چپ و راست دارای گذردهی t_i و بازتابندگی r_i شدت متفاوت هستند؛ به‌طوری‌که برای هر آینه شرط پایستگی انرژی یعنی $r_i + t_i = 1$ برقرار است ($i = 1, 2$) در چارچوب تقریب پوش آهسته و حد میدان میانگین، معادله ماکسول، تکامل میدان در راستای محور کاواک z را به صورت:

$$\frac{\partial E_p}{\partial z} = i \frac{N\omega_p \mu_{eg}}{2c\epsilon_0} \rho_{eg} \quad (6)$$

به دست می‌دهد. در این رابطه، N چگالی تعداد ذرات و L طول کاواک است که در دو انتها توسط آینه‌ها محدود شده است. با حل این معادله تحت شرایط مرزی متناظر با کاواک نامتقارن، یک رابطه جبری بین میدان‌های ورودی و خروجی به دست می‌آید. به‌طور مشخص، اگر E_p^I و E_p^T به ترتیب دامنه‌های میدان فرودی و عبوری باشند و ضرایب بازتاب و گذردهی آینه‌ها با نمادهای r_1, r_2 و t_1, t_2 مشخص شوند، نتیجه نهایی بیانگر آن است که این پارامترها مستقیماً بر پاسخ نوری کاواک اثر گذاشته و شرایط تداخلی و جفت‌شدگی بین میدان و ماده تعیین‌کننده رفتار ورودی-خروجی سامانه خواهند بود.

$$\sqrt{t} E_p^I = \frac{1 - \sqrt{r_1 r_2}}{\sqrt{t_2}} E_p^T - i \frac{N\omega_p \mu_{eg} L}{2c\epsilon_0} (1 + \sqrt{r_1}) \rho_{eg} \quad (7)$$

در این جا متغیرها به صورت:

$$y = \frac{\mu_{ge} E_p^I}{\hbar} \quad x = \frac{\mu_{ge} E_p^T}{\hbar} \quad (8)$$

تعریف می‌شوند. بر این اساس رابطه ورودی-خروجی به صورت زیر است:

$$y = \frac{1 - \sqrt{r_1 r_2}}{\sqrt{t_1 t_2}} x - i C_e \frac{1 + \sqrt{r_1}}{\sqrt{t_1}} \rho_{eg}(x) \quad (9)$$

که در آن ضریب C_e به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_e = \frac{N\omega_p \mu_{eg}^2 L}{2\hbar c \epsilon_0} \quad (10)$$

از نظر فیزیکی، این رابطه نشان‌دهنده چگونگی تأثیر ویژگی‌های کاواک و گذارهای اتمی بر تبدیل میدان ورودی به میدان خروجی است.

می‌شود. یک کاواک نوری فابری-پرو نامتقارن، یک حفره نوری تشدیدی است که توسط دو آینه با بازتاب و عبور متفاوت تشکیل شده است. یک لیزر پروب با میدان E_p و فرکانس ω_p ، گذار کوانتومی $|g\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ با اختلاف انرژی را تحریک می‌کند.

تحت تقریب‌های دوقطبی-الکتریکی و موج - چرخان، هامیلتونی برهم‌کنشی به صورت نوشته می‌شود [۸]:

$$H_{\text{int}} = -\hbar \Delta_p \sigma_{ee} - \hbar (\Omega_p \sigma_{eg} + H.c.) \quad (1)$$

که $\Delta_p = \omega_p - \omega_{eg}$ نامیزانی (ناکوکی) و $\Omega_p = (\Omega_{p1} + \Omega_{p2} + \Lambda_p \rho_{eg})$ سهم، میدان خارجی اعمالی، میدان قطبش نانوذرات فلزی القاشده توسط میدان خارجی و قطبش نقطه کوانتومی که میدان قطبش نانوذره فلزی را تحریک می‌کند که سپس روی نقطه کوانتومی واکنش نشان می‌دهد (یعنی قطبش نقاط کوانتومی موجب القای قطبش در نانوذره شده و این میدان دوباره بر نقاط کوانتومی اثر می‌گذارد) که عبارتند از [۸-۱۰]:

$$\Omega_{p2} = \frac{\mu_{ge} a^3 E_p}{\hbar R^3} \alpha_1(\omega_p), \Omega_{p1} = \frac{\mu_{ge} E_p}{2\hbar} \quad (2)$$

$$\Lambda_p = \frac{\mu_{ge} a^3}{\hbar \pi \epsilon_0 \epsilon_2 R^6} \alpha_1(\omega_p)$$

در این روابط، μ_{ge} گشتاور دوقطبی نقطه کوانتومی، ϵ_2 ثابت دی‌الکتریک محیط، ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک خلا و $\alpha_1(\omega_p)$ قطبش‌پذیری خطی نانوذره در فرکانس لیزر است.

برای یک نانوذره کروی پوشیده با گرافن با شعاع a و ثابت دی‌الکتریک ϵ_1 که در محیطی با گذردهی ϵ_2 قرار گرفته، قطبش‌پذیری دو قطبی در تقریب شبه‌استاتیک به صورت زیر است:

$$\alpha_1(\omega_p) = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \frac{2i\sigma_g}{\epsilon_0 \omega a})}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2 + \frac{2i\sigma_g}{\epsilon_0 \omega a}} \quad (3)$$

σ_g رسانایی سطحی گرافن به صورت جمع دو بخش درون‌نواری و بین‌نواری نوشته می‌شود و رابطه آن مطابق رفرنس است [۱۱].

با استفاده از معادله حرکت $\frac{d\rho}{dt} = \frac{i}{\hbar} [H, \rho]$ عناصر ماتریس چگالی یک سیستم اتمی دوترازه به صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\frac{d\rho_{gg}}{dt} = \Gamma_{eg} \rho_{ee} - i\Omega_p \rho_{ge} + i\Omega_p^* \rho_{eg} \quad (4)$$

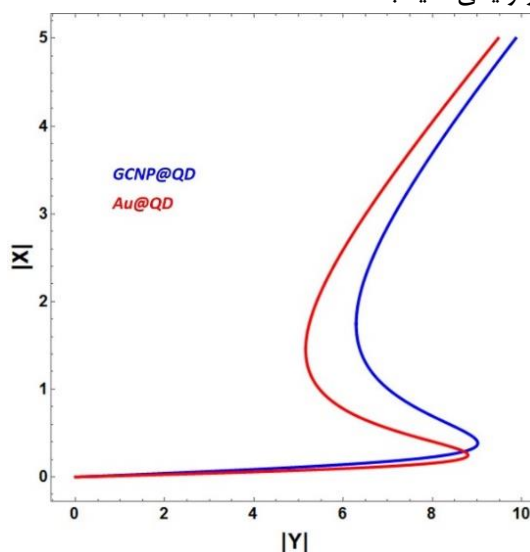
$$\frac{d\rho_{ee}}{dt} = -\Gamma_{eg} \rho_{ee} + i\Omega_p \rho_{ge} - i\Omega_p^* \rho_{eg}$$

$$\frac{d\rho_{eg}}{dt} = i\Delta_p \rho_{eg} - \gamma_{eg} \rho_{eg} - i\Omega_p (\rho_{ee} - \rho_{gg})$$

که در این روابط، Γ_{eg} به‌عنوان نرخ واپاشی اکسایتون (گسیل خودبه‌خودی) و γ_{eg} به‌عنوان نرخ واپاشی فاز تعریف می‌شوند. در شرایط پایا، مشتقات زمانی برابر با صفر قرار داده می‌شوند و سپس ρ_{eg} به‌عنوان تابعی از میدان محرک E_p (و به تبع آن Ω_p) حل می‌گردد.

بحث و نتایج

شکل ۲ رفتار دوپایداری نوری در سامانه‌ای هیبریدی شامل نقاط کوانتومی با نانوذرات پوشیده‌شده با گرافن و نانوذرات طلا را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات طلا موجب گسترش ناحیه پسماند شده و نانوذرات پوشیده‌شده با گرافن حلقه‌ای کوتاه‌تر و آستانه بالاتر برای سوئیچینگ نوری ایجاد می‌کنند. این تفاوت‌ها نقش نوع نانوذره در تغییرپذیری پاسخ نوری سامانه را نشان می‌دهد. انتخاب میان نانوذرات طلا یا نانوذرات پوشیده با گرافن می‌تواند برای کنترل حلقه هیستریزیس یا کاهش آستانه سوئیچینگ و توسعه ابزارهای نانوفوتونیک مفید باشد.



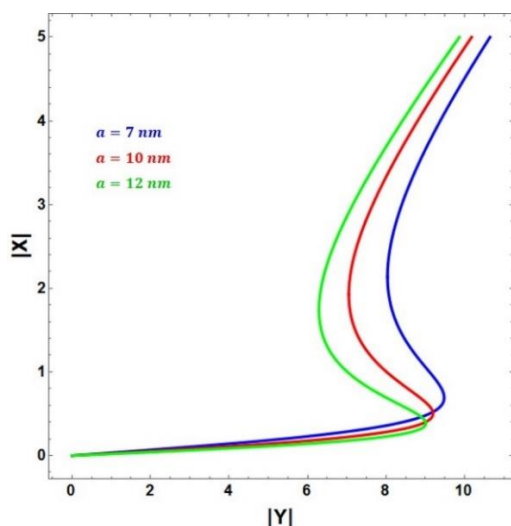
شکل ۲. تغییرات منحنی‌های دوپایداری نوری سیستم هیبریدی نقاط

کوانتومی - نانوذره با در نظر گرفتن تغییر نوع نانوذره. $\mu_{eg} =$

$$a = 12nm, \delta = R = 15nm, \epsilon_2 = 1, \epsilon_1 = 2.25, 0.5e$$

$$\Gamma_{eg} = 2\gamma_{eg} = 1, t_2 = 0.0001, t_1 = 0.001, \Delta_p = 0.5, 0.5nm$$

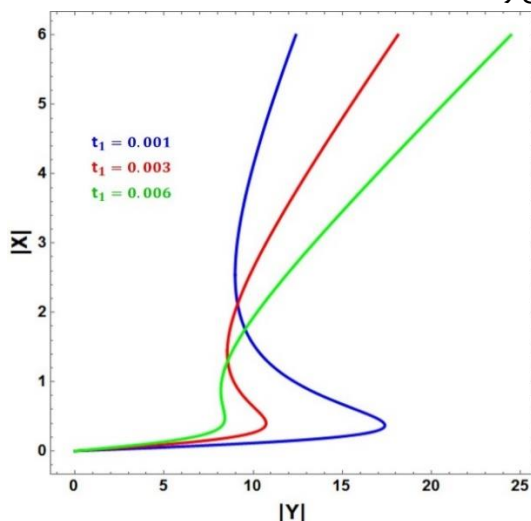
نانوذرات بزرگ‌تر به دلیل قطبش‌پذیری بیشتر، قادر به تقویت برهم‌کنش پلاسمون - اکسایتون هستند و آستانه شدت ورودی برای دوپایداری نوری را کاهش می‌دهند (شکل ۳). با افزایش شعاع نانوذره، پهنای حلقه پسماند در منحنی ورودی-خروجی گسترده‌تر شده و گذارهای سوئیچینگ نوری سریع‌تر و تندتر می‌شوند. این روند تا حدی ادامه می‌یابد که مکانیزم‌های اتلاف و محدودیت زیرطولی موج، رزونانس پلاسمونیک بهینه را تعیین می‌کنند. به همین دلیل، انتخاب اندازه مناسب نانوذره در طراحی‌های هیبریدی نانوفوتونیک مهم است.



شکل ۳. تغییرات منحنی‌های دوپایداری نوری سیستم هیبریدی نانوذره-

نقاط کوانتومی با تغییر سایز نانوذره. پارامترها مطابق شکل ۲ است.

کاهش شدت t_1 آینه ورودی در کاواک نامتقارن فابری-پرو، در عمل منجر به افزایش بازتابندگی آینه $t_1 = 1 - r_1$ می‌شود. این افزایش بازتابندگی موجب ارتقای ضریب کیفیت حفره و تقویت بازخورد نوری آن می‌گردد (شکل ۴). افزایش بازخورد، زمان عمر فوتون‌ها در حفره را طولانی‌تر کرده و همدوسی نوری سامانه را افزایش می‌دهد. این امر پاسخ غیرخطی سامانه هیبریدی نقاط کوانتومی - نانوذره را تقویت کرده و میدان محبوس‌شده، برهم‌کنش پلاسمون - اکسایتون و اشباع را شدت می‌بخشد. نتیجه، گسترش حلقه پسماند در منحنی دوپایداری با آستانه‌های سوئیچینگ پایین‌تر، گذارهای تندتر و ناحیه دوپایدار وسیع‌تر است.

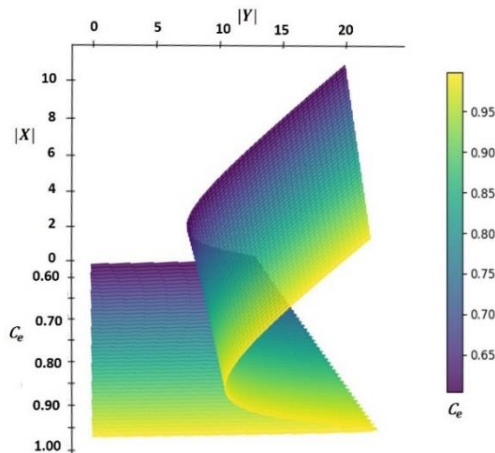


شکل ۴. تغییرات منحنی‌های دوپایداری نوری سیستم هیبریدی نقاط

کوانتومی - نانوذره با تغییر t_1 . پارامترها مطابق شکل ۲ است.

شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش چگالی نانوذرات، حلقه پسماند گسترده‌تر می‌شود و برهم‌کنش‌های میان‌ذره‌ای و میدان‌های موضعی تقویت می‌گردند. این افزایش، جفت‌شدگی

پلاسمون‌های سطحی و فوتون‌های کاواک است. این تغییرات به‌وضوح در شکل ۶ نمایش داده شده و رابطه مستقیم میان C_e و عرض حلقه پسماند را نشان می‌دهد.

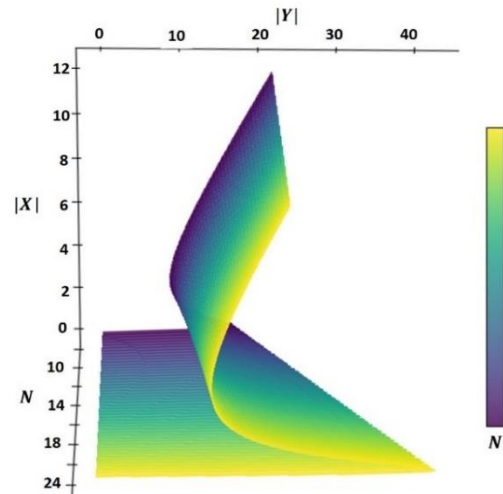


شکل ۶. تغییرات منحنی‌های دوپایداری نوری سیستم هیبریدی نقاط کوانتومی-نانوذره با تغییر C_e . پارامترها مطابق شکل ۲ است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش سازوکارهای دوپایداری نوری در سامانه‌های ترکیبی نقاط کوانتومی - نانوذره پوشیده‌شده با گرافن در حفره فابری - پرو نامتقارن را بررسی می‌کند. این کار با بهره‌گیری از فرمالیسم نیمه‌کلاسیکی ماتریس چگالی برای توصیف برهم‌کنش غیرخطی میان اکسایتون‌های نقاط کوانتومی و میدان‌های نزدیک پلاسمونی انجام شده است. نتایج به‌دست آمده می‌تواند برای بهینه‌سازی سوییچینگ تمام‌نوری فوق‌سریع و همچنین اجزای فوتونیک حساس در مقیاس نانو استفاده شوند.

میدان نزدیک مانند دوقطبی- دوقطبی و جفت‌شدگی پلاسمونیک را تقویت کرده و پاسخ غیرخطی محیط و آستانه‌های سوئیچینگ را تغییر می‌دهد. همچنین ناحیه دوپایداری و حلقه پسماند در نمودار ورودی - خروجی وسیع‌تر می‌شود. بنابراین کنترل چگالی نانوذرات به‌عنوان پارامتری کلیدی، نقش مهمی در عملکرد و بهینه‌سازی سامانه‌های هیبریدی نوری و الکترونیکی دارد.



شکل ۵. تغییرات منحنی‌های دوپایداری نوری سیستم هیبریدی نقاط کوانتومی - نانوذره با تغییر N . پارامترها مطابق شکل ۲ است.

پارامتر C_e نقش کلیدی در تنظیم پاسخ پلاسمونی نانوذره پوشیده‌شده با گرافن دارد و ویژگی‌های دوپایداری نوری سامانه نقطه‌کوانتومی-نانوذره گرافنی در کاواک نامتقارن فابری - پرو را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش C_e ، حلقه پسماند در منحنی ورودی - خروجی به‌طور قابل توجهی گسترش یافته و نشان‌دهنده تقویت تعامل جمعی میان برانگیزش‌های نقطه‌کوانتومی،

منابع

- References**
- [1] Gibbs, H., Optical bistability: controlling light with light. 2012: Elsevier.
 - [2] Peres, N., et al., Optical bistability of graphene in the terahertz range. *Physical Review B*, 2014. 90(12): p. 125425.
 - [3] Tohari, M.M., Terahertz optical bistability in the metal nanoparticles-graphene nanodisks-quantum dots hybrid systems. *Nanomaterials*, 2020. 10(11): p. 2173.
 - [4] Zhao, W.-H., et al., Optical bistability in a heterodimer composed of a quantum dot and a metallic nanoshell. *Optics Express*, 2023. 31(18): p. 28805-28815.
 - [5] Zhang, J., X.M. Wu, and B. Dang, Optical bistability and multistability in hybrid system. *Laser Physics*, 2023. 33(9): p. 096002.
 - [6] Huang, Y., A.E. Miroshnichenko, and L. Gao, Low-threshold optical bistability of graphene-wrapped dielectric composite. *Scientific Reports*, 2016. 6(1): p. 23354.
 - [7] Reep, T., et al., Graphene absorber on an SOI chip for active and passive mode locking of lasers. *Scientific Reports*, 2025. 15(1): p. 9399.
 - [8] Fan, S., et al., Nonlinear optical nonreciprocity in a surface plasmon-exciton coupled asymmetric cavity system. *The European Physical Journal D*, 2022. 76(11): p. 212.
 - [9] Artuso, R.D. and G.W. Bryant, Strongly coupled quantum dot-metal nanoparticle systems: Exciton-induced transparency, discontinuous response, and suppression as driven quantum oscillator effects. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 2010. 82(19): p. 195419.
 - [10] Zhao, D., et al., Tailoring double Fano profiles with plasmon-assisted quantum interference in hybrid exciton-plasmon system. *Applied Physics Letters*, 2014. 105(11).
 - [11] Jalilian, M., A. Bahari, and N. Daneshfar, Investigation of optical bistability from a graphene-wrapped nanoparticle near a pair of molecules and an electric point charge. *Applied Physics A*, 2025. 131(8): p. 1-6.