بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

افزایش نرخ گذار تابش فلورسانس با بهره کوانتومی بالا با استفاده از فراماده هذلولوی چندلایه‌ای

مریم محمودی، مریم اردکانی، میثم گزمه و سید حسن توسلی

ایران، تهران، ولنجک، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده – افزایش نرخ گذارخودبخودی تابشگرهای کوانتومی با استفاده از نانوساختارها، با توجه به رشد روز افزون علوم و تکنولوژی برهمکنش نور-ماده در ابعاد نانومتری، در سال های اخیر بسیار مورد مطالعه و کاربرد قرار گرفته است. فراماده هذلولوی بدلیل فراهم آوردن چگالی حالت های فوتونی زیاد، از جمله افزاره‌های قابل توجه در این زمینه به حساب می‌آیند. در این مقاله، با استفاده از شبیه سازی FDTD و محاسبات تابع گرین، به بررسی چگالی حالت‌های فوتونی افزاره فراماده هذلولوی متشکل از ۶ لایه متناوب طلا-آلومینا پرداخته و نرخ گذار خودبخودی به تفکیک گذار غیرتابشی و تابشی (فلورسانس) برای تابشگر کوانتومی در مجاورت ساختار، محاسبه شده است. نتایج افزایش نرخ گذارتابشی با فاکتور ۱۰ برابر و بهره کوانتومی حدود ۵۰ درصد را نشان می‌دهد.

کلید واژه- افزایش نرخ گذار تابش فلورسانس، چگالی حالت فوتونی، فراماده هذلولوی، مهندسی اپتیکی.

Fluorescence Decay Rate Enhancement With High Quantum Efficiency Using Multilayer Hyperbolic Metamaterials

Maryam Mahmoodi, Maryam Ardekani, Meisam Gazmeh and Seyed Hassan Tavassoli

Iran, Tehran, Velenjak, Shahid Beheshti University, Laser and Plasma Research Institute

ma_mahmoodi@sbu.ac.ir, m.ardekani@sbu.ac.ir, m_gazmeh@sbu.ac.ir, h-tavassoli@sbu.ac.ir

Abstract- Decay rate enhancement of quantum emitters using nanostructures have been widely studied in the last decades, thanks to the development of science and technology of light-matter interaction in nanoscales. Hyperbolic metamaterials (HMMs) as artificial nanostructures providing high photonic density of states (PDOS) are highly promising in this regard. In the present paper, we investigate PDOS of a hyperbolic metamaterial component consisting of 6 alternating gold-alumina layers, using FDTD simulation and the Green's function. Non-radiative and radiative (fluorescence) spontaneous decay rate enhancement of a quantum emitter nearby the structure is calculated. The results indicate the fluorescence enhancement of a factor of 10 having quantum efficiency of about 50 percent.

Keywords: Fluorescence decay rate enhancement, Hyperbolic metamaterials, Optical engineering, Photonic density of states.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-17]

مقدمه

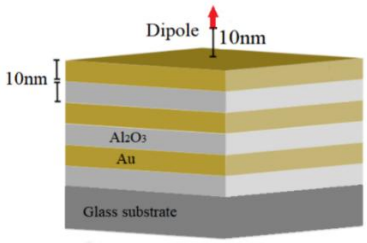
مطالعه طیف تابش خودبخودی مولکول‌ها، از ابزارهای اصلی در آنالیز شیمیایی مواد و زیربنای علوم پزشکی به طور ویژه در طیف‌سنجی و تصویرنگاری فلورسانس به شمار می‌رود. تغییر نرخ گذار تابش خودبخودی یک تابشگر کوانتومی (مولکول، یون، فلوئورسازه، نقطه کوانتومی و...) از اثرات بنیادی در الکترودینامیک کوانتومی است که امروزه با توجه به ظهور فناوری‌های ساخت ادوات نانومتری، در ساختارهایی با ابعاد زیر طول‌موجی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. فراماده هذلولوی[1] نانوساختارهایی با قابلیت مهندسی بهینه هستند که به دلیل دارا بودن مدهایی با بردار موج بزرگ و همچنین ویژگی ذاتی در افزایش چگالی حالت‌های فوتونی، از توانمندی بالقوه‌ای در کاربردهای حسگری[2]، تصویرنگاری[3] و تقویت تابش فلورسانس[4] برخوردار می‌باشند. در این مقاله افزاره فرامادهٔ تشکیل شده از ۶ لایه متناوب طلا و آلومینا[1] هرکدام با ضخامت ۱۰nm (۳ سلول واحد) که در طول موج‌های بزرگتر از ۵۵۰ نانومتر در رژیم هذلولوی قرار دارد، مورد مطالعه قرار گرفته است. در شبیه سازی با استفاده از روش FDTD و تابع گرین، مد هذلولوی افزاره بررسی شده و با قرار دادن یک دو قطبی الکتریکی به عنوان یک تابشگر کوانتومی در فاصله ۱۰nm از سطح ساختار (شکل۱)، چگالی حالت‌های فوتونی و افزایش نرخ گذار خودبخودی تابشگر محاسبه شده است.

مهندسی تابش فلورسانس

بر اساس قانون طلایی فرمی[2] نرخ گذار خودبخودی یک تابشگر کوانتومی به چگالی حالت‌های فوتونی موضعی[3] بستگی دارد که با رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar}|\langle f_k|H_{int}|i_k\rangle|^2\rho(\hbar\omega_k) \qquad (۱)$$

به طوری که H_{int} هامیلتونی گذار از تراز برانگیخته i به تراز نهایی f و ρ چگالی حالت‌های در دسترس برای فوتونی است که فرکانسی برابر با فرکانس گذار $\omega = \omega_{if}$ و تکانه‌ای متناظر با بردار **k** دارد. چگالی حالت‌های فوتونی به محیطی که تابشگر در آن قرار دارد وابسته است؛ بنابراین با تغییر و مهندسی محیط اطراف تابشگر، چگالی حالت فوتونی می‌تواند افزایش یابد. از روش‌های مرسوم در مهندسی چگالی حالت‌های فوتونی می‌توان به استفاده از ساختارهای مبنتی بر تشدید پلاسمونی[5] و فوتونیک کریستال[6] اشاره کرد. به دلیل وجود اتلاف (کانال‌های غیرتابشی) ساختارهای پلاسمونی دارای محدودیت کاربرد می‌باشند. با معرفی فراماده هذلولوی مطالعات زیادی برای استفاده از آن‌ها در مهندسی فلورسانس انجام گرفته است. این نوع از فراماده بدلیل بهره‌گیری از مدهای پلاسمونی حجمی غیرتشدیدی، چگالی حالت‌های زیاد در پهنای باند بزرگ فراهم می‌کنند.



شکل۱: افزاره فراماده هذلولوی متشکل از ۶ لایه طلا-آلومینا و دوقطبی الکتریکی به فاصله ۱۰ نانومتر از سطح ساختار.

فراماده هذلولوی

همزمان با شروع قرن بیست‌ویک مواد مصنوع مهندسی شده‌ای (فراماده) با خواص اپتیکی جدید معرفی شد. فراماده هذلولوی به عنوان دسته خاصی از این مواد که همگن، غیرمغناطیسی و بسیار ناهمسانگرد هستند، به

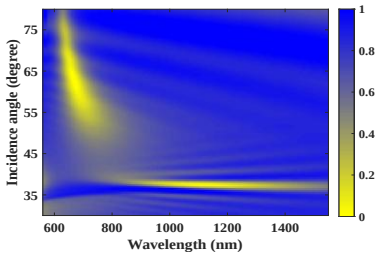
[1] Al_2O_3
[2] Fermi's Golden Rule
[3] Local Density of States (LDOS)

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-17]

دلیل خواص فیزیکی منحصر به فرد به سرعت توجه زیادی به خود جلب کردند. این نوع از فراماده که از فلز و دی-الکتریک تشکیل می‌شوند (در مقایسه با مواد معمول با صفحات پاشندگی به شکل کروی و یا بیضوی) صفحات پاشندگی به شکل هذلولی دارند[7]. در میان مواد مختلف، طلا و آلومینا پرکاربردترین موادی هستند که در ساختارهای متناوب چندلایه‌ای، می‌توانند فراماده هذلولوی نوع دوم در بازه طول موجی مرئی ایجاد کنند[1]. تعداد لایه‌ها بیشتر ویژگی‌های ساختار هذلولوی را بهتر نمایان می‌کند؛ از طرفی به دلیل محدودیت‌های ساخت، از دیگاه تجربی ساختارهایی با تعداد لایه‌های زیاد مطلوب نیست. در نتیجه در این مقاله ساختاری با ۶ لایه متناوب طلا و آلومینا برای بررسی در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

برای بررسی افزاره مورد نظر، ابتدا مد هذلولوی ساختار با استفاده از شبیه سازی FDTD و محاسبه طیف بازتابی مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل۲، مد هذلولوی افزاره فراماده را در بازه طول موجی۱۵۰۰-۵۵۰ نانومتر و در زاویه فرود ۸۰-۳۰ درجه نمایش می‌دهد که در طول موج‌های بزرگتر از ۸۰۰ نانومتر به صورت پهن باند، غیرتشدیدی و با اتلاف کم دیده می‌شود (پهنای مد معرف اتلاف می‌باشد).



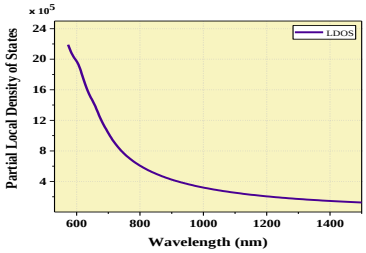
شکل۲: مد هذلولوی افزاره فراماده چندلایه ای؛ غیرتشدیدی و پهن باند در طول موج‌های بزرگتر از ۸۰۰ نانومتر.

چگالی حالت‌های فوتونی

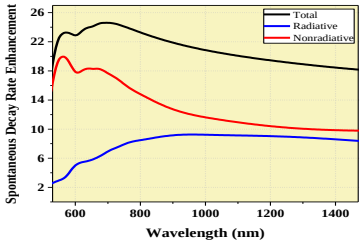
چگالی حالت‌های فوتونی مانند چگالی حالت‌های الکترونی، در قلب بسیاری از پدیده‌های فیزیکی قرار دارد و تغییرات این کمیت یک عامل کلیدی در طراحی بسیاری از افزاره‌های اپتیکی است. در این مقاله برای محاسبه چگالی حالت‌های فوتونی موضعی منتسب به مد هذلولوی از روش تابع گرین استفاده شده و یک دوقطبی الکتریکی در مجاورت افزاره و در راستای عمود بر ساختار (z) قرار داده شده است. بخش موهومی مولفه عمودی بردار گرین طبق رابطه زیر متناظر با چگالی حالت‌های فوتونی خواهد بود[8].

$$\rho = \frac{6\omega}{\pi c^2} Im(G_z) \qquad (۲)$$

در شکل۳ نمودار چگالی حالت‌های فوتونی موضعی نشان داده شده است. همانطورکه انتظار می‌رود بیشینه مقدار چگالی حالت‌ها در بازه ۸۰۰-۵۵۰ نانومتر است و در طول موج‌های بزرگتر از ۸۰۰ نانومتر به رفتاری ثابت می‌رسد.



شکل۳: چگالی حالت‌های فوتونی موضعی در مجاورت افزاره فراماده هذلولوی متشکل از ۶ لایه ۱۰ نانومتری طلا-آلومینا.



شکل۴: افزایش نرخ گذار خودبخودی تابشگر در مجاورت افزاره فراماده (مشکی)، به تفکیک افزایش نرخ گذار تابشی (آبی) و غیرتابشی (قرمز).

بهره کوانتومی در افزایش نرخ گذار تابشی

افزایش نرخ گذار خودبخودی تابشگر کوانتومی Γ، که بیانگر مجموع نرخ گذارهای تابشی و غیرتابشی است با فاکتور زیر محاسبه می‌شود، به طوری که ρ_0 چگالی

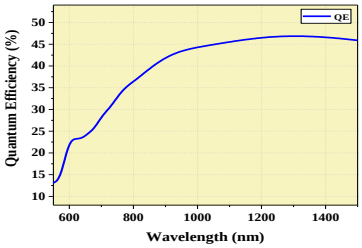
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-17]

حالت‌های فضای آزاد و Γ_0 نرخ گذار خودبخودی تابشگر در فضای آزاد است.

$$EF = \frac{\Gamma}{\Gamma_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (۳)$$

فاکتور افزایش نرخ گذار برای دو قطبی در مجاورت افزاره هذلولوی با نمودار مشکلی رنگ در شکل۴، دیده می‌شود. با



شکل۵: بهره کوانتومی برای تابشگر مجاور افزاره فراماده

استفاده از شبیه‌سازی FDTD، این فاکتور افزایش در میدان نزدیک (مجموع گذارهای تابشی و غیرتابشی) و میدان دور[۴] تابشگر (گذار تابشی) محاسبه شده و به صورت تفکیک شده در شکل۴، گذار تابشی و غیرتابشی به ترتیب به رنگ قرمز و آبی نشان داده شده است. در طول موج‌های بزرگتر از ۸۰۰ نانومتر (مد پهن باند و کم اتلاف هذلولوی) گذارهای غیرتابشی به حداقل رسیده و گذار تابشی با فاکتور افزایش ۱۰ برابر دیده می‌شود. بهره کوانتومی[۵] معیاری از شدت فلورسانس است، که به رقابت بین مسیرهای تابشی و غیرتابشی برای گذار یک تابشگر پرداخته و با رابطه زیر بیان می‌شود[1]. شکل۵ بهره کوانتومی نزدیک به ۵۰٪ برای مد

$$\Phi = \frac{\Gamma_r}{\Gamma_r + \Gamma_{nr}} \quad (۴)$$

پهن باند هذلولوی را نشان داده که در مقایسه با روش های مبتنی بر تشدید، رقم قابل توجهی است.

[4] Near and Far field
[5] Quantum Efficiency

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی FDTD و محاسبات تابع گرین، چگالی حالت‌های فوتونی موضعی برای افزاره فراماده هذلولوی محاسبه و افزایش نرخ گذار خودبخودی از مسیرهای تابشی و غیر تابشی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده افزایش قابل توجه تابش فلورسانس (گذار تابشی) برای تابشگری که در مجاورت افزاره فراماده قرار دارد را به دلیل مد پهن باند هذلولوی نشان می‌دهد.

مرجع‌ها

[1] P. Shekhar, J. Atkinson, and Z. Jacob, “Hyperbolic metamaterials: fundamentals and applications,” *Nano Converg.*, vol. 1, no. 1, p. 14, 2014.

[2] M. A. Baqir, A. Farmani, T. Fatima, M. R. Raza, S. F. Shaukat, and A. Mir, “Nanoscale , tunable , and highly sensitive biosensor utilizing hyperbolic metamaterials in the near-infrared range,” *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 31, pp. 9447–9454, 2018.

[3] T. Repän, A. V Lavrinenko, and S. V Zhukovsky, “Dark-field hyperlens: Super-resolution imaging of weakly scattering objects,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 19, p. 25350, 2015.

[4] D. Lu, J. J. Kan, E. E. Fullerton, and Z. Liu, “Enhancing spontaneous emission rates of molecules using nanopatterned multilayer hyperbolic metamaterials,” *Nat. Nanotechnol.*, vol. 9, pp. 48–53, 2014.

[5] C. Sauvan, J. P. Hugonin, I. S. Maksymov, and P. Lalanne, “Theory of the spontaneous optical emission of nanosize photonic and plasmon resonators,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, no. 23, pp. 1–5, 2013.

[6] K. Kuroda, T. Sawada, T. Kuroda, K. Watanabe, and K. Sakoda, “Doubly enhanced spontaneous emission due to increased photon density of states at photonic band edge frequencies.,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 15, p. 13168, 2009.

[7] A. I. Fernández-domínguez, F. J. García-vidal, and L. Martín-moreno, “Unrelenting plasmons,” *Nat. Photonics*, vol. 11, no. 1, pp. 8–10, 2017.

[8] L. Novotny and B. Hecht, *Principles of Nano-Optics*. Cambridge university Press, 2006.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-17]