بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

گسیل نانوجت فوتونی توسط میکروکره‌های دی‌الکتریک

شیوا مینائی، سیدحسن توسلی*

پژوهشکده لیزر و پلاسما،دانشگاه شهید بهشتی، تهران

Sh.minaei@mail.sbu.ac.ir_ h-tavassoli@sbu.ac.ir

چکیده – دراین پژوهش، تاثیر حضور میکروکره‌های دی‌الکتریک SiO_2 در روش طیف‌سنجی رامان تقویت‌یافته سطحی (SERS) به صورت شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، امواج تخت به میکروکره‌های SiO_2 در حضور دو نانوذره طلا تابیده شده و تولید نانوجت فوتونی جایگزیده بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی به روش دامنه زمانی تفاضل محدود (FDTD) نشان می‌دهد که حضور میکروکره‌های دی‌الکتریک SiO_2 باعث ایجاد توزیع میدان بهتر در مقایسه با روش (SERS) معمولی می‌باشد. بنابراین روش استفاده شده در این پژوهش نسبت به روش‌های (SERS) معمولی کارآمدتر است و با تغییر پارامترهایی مانند: ضریب‌شکست، اندازه ذره و طول‌موج فرودی می‌توان شدت، موقعیت و فاصله‌کاری نانوجت‌های فوتونی را تنظیم کرد.

کلیدواژه–شبیه‌سازی لومریکال، طیف‌سنجی رامان تقویت شده سطحی، میکروکره دی‌الکتریک، نانوجت فوتونی.

Emission of photonic Nano jets by dielectric microspheres

Shiva Minaei, Seyed Hassan Tavassoli

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University,Tehran

Sh.minaei@mail.sbu.ac.ir _ h-tavassoli@sbu.ac.ir

Abstract - In this study, the effect of the presence of SiO_2 dielectric microspheres in the surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) method has been investigated by simulation. For this purpose, plane waves were irradiated to SiO_2 microspheres in the presence of two gold nanoparticles and the production of substituted photonic nano jets was investigated. The results of the finite difference time domain (FDTD) simulation illustrated that SiO_2 dielectric microspheres result in a better field distribution than the conventional (SERS) method. Therefore, the method used in this study is more efficient than conventional SERS methods, and by changing parameters such as refractive index, particle size, and incident wavelength, the intensity, position and, working distance of photonic nano jets can be adjusted.

Keywords: Dielectric microspheres, Surface enhanced Raman Spectroscopy, Lumerical simulation, Photonic nano jets.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

متن اصلی

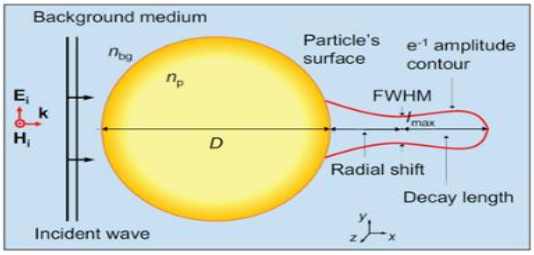
طیف‌سنجی رامان مطالعه نوعی از برهمکنش بین نور و ماده است که در آن نور دچار پراکندگی غیرالاستیک می‌شود. درآزمایش‌های طیف‌سنجی رامان، فوتون‌های تک طول‌موج روی نمونه متمرکز می‌شوند، این فوتون‌ها با مولکول‌های نمونه برهمکنش می‌کنند و بازتابیده، جذب یا پراکنده می‌شوند. طیف‌سنجی رامان فوتون‌هایی که دچار پراکندگی غیرالاستیک شده‌اند را مطالعه می‌کند که تقریباً از هر یک میلیون فوتون یک فوتون به طور غیرالاستیک پراکنده می‌شود. طیف‌های رامان هر مولکول، منحصر به فرد است. از این رو می‌توان از آن مانند اثرانگشت در تشخیص ترکیب شیمیایی نمونه‌های شیمیایی و بیولوژیکی با کاربردهای قابل توجه در علوم‌زیستی و مواد استفاده کرد. با این حال، به دلیل سطح مقطع برهمکنش کوچک، سیگنال پراکندگی رامان ضعیف است و جدا شدن از سیگنال پراکندگی‌الاستیک بسیار قوی، دشوار است [۱]. به این منظور روش‌هایی برای تقویت پراکندگی رامان مطرح شده است که یکی از این روش‌ها طیف‌سنجی تقویت‌یافته سطحی رامان (SERS) می‌باشد. این روش یک روش حساس به سطح است که پراکندگی رامان را بوسیله مولکول‌های جذب سطحی شده روی سطوح یک فلز زبر ناهموار یا آرایه‌ای از نانوذرات فلزی که عموماً از نانوذرات طلا و نقره استفاده می‌شود، تقویت می‌کند. افزایش شدت در سیگنال رامان برای گونه‌هایی که روی سطوح خاصی جذب سطحی شده‌اند بخاطر تقویت در میدان‌الکتریکی رخ می‌دهد. در این پژوهش ما به دنبال تقویت بهتر این روش هستیم. بر این اساس، اخیراً محققان توانستند سیگنال (SERS) چند مولکول را با تمرکز نور از طریق یک میکروکره دی‌الکتریک که بر روی نانوکره فلزی قرار گرفته است، تقویت کنند. عناصر میکروساختار با تقارن دایره‌ای ویژگی‌های نوری جالبی را ازخود نشان می‌دهند: نانوجت‌های فوتونی (PNJs) و میکروتشدیدگرهای نجوایی (WGMs). به ترتیب میکروساختارها نور را در مجاورت خود متمرکز کرده و PNJ را تشکیل می‌دهند یا می‌توانند نور را داخل میکروکره به دام انداخته، WGM تشکیل دهند [۲]. افزایش سیگنال (SERS) در این تکنیک عمدتا به دلیل افزایش شدت میدان‌الکتریکی در نقاط داغ نانوساختارهای پلاسمونیک در محل نانوجت فوتونی (PNJ) دی‌الکتریک است. نانو جت‌های فوتونی برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط گروه تافلو تولید شده‌اند [۲]. در مقایسه با روش‌های پراکندگی رایج رامان با افزایش سطح متداول، طیف‌سنجی رامان تقویت شده با میکروکره ممکن است به دلیل سادگی تهیه نمونه و کنترل دقیق موقعیت و اندازه میکروکره‌ها مفید باشد [۱]. نانوجت‌های فوتونی دارای کاربردهای مختلفی، ازجمله میکروسکوپ نوری، طیف‌سنجی، و لیتوگرافی گرفته تا ذخیره‌سازی داده‌های‌نوری و حتی مغناطیسی می‌باشد [۳]. هدف ما دراین پژوهش مطالعه نانوجت‌ها و بررسی تأثیر حضور میکروکره‌های دی‌الکتریک در روش طیف‌سنجی رامان تقویت‌یافته سطحی (SERS) و شبیه سازی آن‌ها می‌باشد و سپس نتایج شبیه‌سازی‌ها را مطرح کرده و در نهایت جمع‌بندی خواهیم کرد.

نانوجت‌ها

ذرات‌کروی دی‌الکتریک با اندازه‌های بسیار کوچکتر از طول‌موج نور، نور را به صورت متقارن در جهت جلو و عقب مانند یک دوقطبی نقطه‌ای پراکنده می‌کنند، پدیده‌ای که به پراکندگی ریلی معروف است. با این حال، از کره‌های بزرگتر می‌توان برای تمرکز نور با طیف گسترده‌ای از طول موج استفاده کرد [۱]. اثرات تمرکز نور در میکروکره‌های بزرگ را می توان به خوبی با قوانین اپتیک هندسی تقریب زد. بر اساس تقریب‌های اپتیک هندسی پاراکسیال، اگر ضریب‌شکست کره به ترتیب بزرگتر یا کوچکتر از ۲ باشد، موج فرودی در داخل یا خارج کره متمرکز می‌شوند. در مورد ضریب‌شکست ۲، نقطه کانونی فقط در سطح سایه کره قرار دارد که با مطالعات متعددی مطابقت دارد. هنگامی که اندازه کره به ترتیب طول‌موج نور باشد، هیچ کدام فرمالیسم پراکندگی ریلی و تقریب اپتیک هندسی نمی‌توانند برهمکنش آنها با نور را به طور دقیق توصیف کنند. نظریه Mie توصیف کامل برهمکنش نور با ذرات کروی با اندازه‌های دلخواه را ارائه می‌دهد. با استفاده از نظریه Mie،

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

می توان دید که چگونه افزایش میدان توسط کره‌های دی‌الکتریک از یک ساختار دوقطبی در رژیم پراکندگی ریلی ($r \ll \lambda$) به یک ساختار جت مانند در حوزه‌های مقیاس متوسط ($r\sim$۱–۳۰λ) تبدیل می‌شود. درنتیجه تحت ترکیب خاصی از اندازه و ضریب‌شکست یک میکروکره و طول‌موج نور، پرتو نور روی سطح "سمت سایه" یا نزدیک آن متمرکز می‌شود [۱]. در این حالت، یک پرتو الکترومغناطیسی بسیار موضعی در سطح سایه میکروساختارها ایجاد شده و "نانوجت فوتونی" نامیده می‌شود. نانوجت‌های فوتونی، پرتوهای الکترومغناطیسی باریک و با شدت بالا هستند که در اثر تابش موج‌تخت به میکروکره با قطر بزرگتر از طول‌موج تابش در سمت سایه، به محیط پس‌زمینه انتشار می‌یابند [۲]. مکانیزم فیزیکی اثر حبس نور نانوجت مساله تداخلی و پراکندگی پیچیده است. تداخل بین میدان فرودی و میدان پراکنده توسط میکروکره منجر به این حبس می‌شود [۲]. با استفاده از پاسخ های عددی دامنه زمانی تفاضل محدود (FDTD) معادلات ماکسول، شکل‌گیری "جت‌های فوتونی" جایگزیده شدید و نانومقیاس، در مجاورت سمت سایه میکروسیلندر دی‌الکتریک تحت تابش موج تخت نشان داده شده است [۲]. این نانوجت‌های فوتونی اندازه جانبی (عرضی) زیر حد پراش دارند و بدون واگرایی قابل‌توجهی، درچندین طول‌موج انتشار می‌یابند. پارامترهای مشخصه در PNJ ها اندازه کمر پرتو (FWHM)، فاصله‌کاری، حداکثر شدت پرتو و محل آن است (شکل ۱را ببینید). این پارامترها را می‌توان عمدتاً با تغییر ضریب‌شکست، اندازه و شکل ذره و ضریب‌شکست محیط زمینه ایجاد کرد. ویژگی‌های نانوجت نیز بستگی به خواص نور فرودی مانند طول‌موج، قطبش و شدت و توزیع فاز دارد[۱].

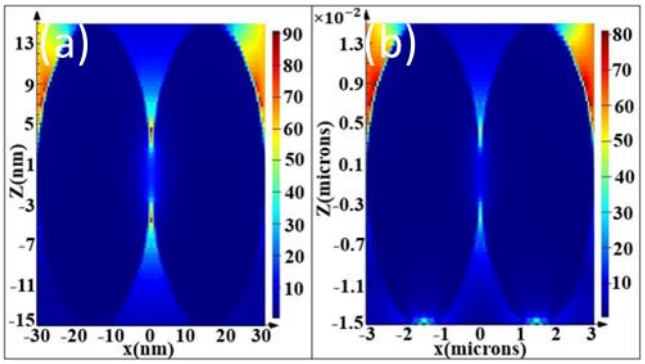


شکل۱: تصویرشماتیک یک *PNJ* و پارامترهای مشخصه آن[۱].

شبیه‌سازی

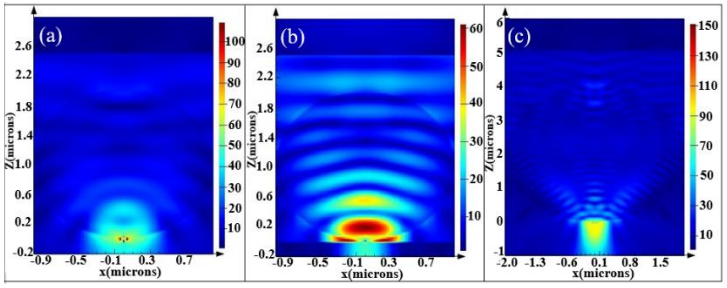
در تکنیک (SERS) با واسطه PNJ، نور فرودی از طریق یک میکروکره دی‌الکتریک SiO_2 در ناحیه اتصال دو نانوذره طلا که نقطه داغ ناشی از تداخل سازنده بین پلاسمون‌های سطح این نانوذرات است، متمرکز می‌شود و شدت میدان عظیمی را فراهم می‌کند. شبیه‌سازی ما با نرم افزار (FDTD) انجام شد. تنظیمات شبیه‌سازی به این صورت است که ساختار ذرات را کروی انتخاب کرده، مش‌بندی را ۰٫۰۲ میکرومتر قرار داده‌ایم، منبع نور فرودی موج‌تخت در راستای z- از بالای میکروکره SiO_2 می‌تابانیم. درابتدا توزیع میدان در شکاف بین دو نانوذره طلا را بررسی می‌کنیم و سپس یک میکروکره SiO_2 روی نانوذرات طلا قرار داده و توزیع میدان را به دست می‌آوریم و هردو حالت را با هم مقایسه می‌کنیم. به این منظور یک موج‌تخت با طول‌موج ۲۰۰ تا۹۰۰ نانومتر به دو نانو ذره طلا باشعاع ۱۵نانومتر تاباندیم و توزیع میدان‌الکتریکی آن را بررسی می‌کنیم(شکل۲). تفاوت این دوشکل در زیرلایه سیلیکون می‌باشد که در شکل a باعث ایجاد توزیع میدان در ناحیه اتصال با زیرلایه است.درمرحله بعد میکروکره SiO_2 باضریب‌شکست ۱/۴۶ و ابعاد شعاع ۱ میکرون را روی نانوذرات طلا قرار داده ضریب‌شکست محیط اطراف ۱ می‌باشد و از بالا موج‌تخت با طول موج ۶۰۰ نانومتر را به آن می‌تابانیم.

هدف ما شبیه‌سازی نانوجت‌فوتونی با فاصله‌کاری بالا و حدکثر توزیع شدت میدان می‌باشد برای این منظور در مرحله بعد شعاع میکروکره SiO_2 را افزایش می‌دهیم و



شکل۲: a) توزیع میدان‌الکتریکی در نانوذرات طلا بدون زیر لایه سیلیکون، b) توزیع میدان‌الکتریکی در نانوذرات طلا با زیرلایه سلیکون.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

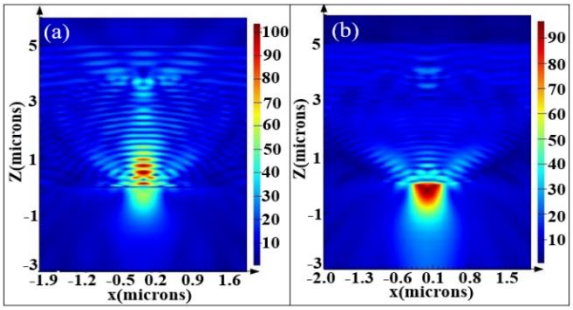


شکل۳: a) توزیع میدان‌الکتریکی درمیکروکره sio_2 به همراه نانوذرات طلا بدون زیرلایه سیلیکون، b) با زیر لایه سیلیکون، c) توزیع میدان‌الکتریکی در میکروکره sio_2 با شعاع۲ میکرون با نانوذرات طلا.

زیرلایه سیلیکون را حذف کردیم تا فاصله‌کاری نانوجت را بررسی کنیم(شکل۳).میکروکره SiO_2 با شعاع ۲ میکرون نانوجت با فاصله‌کاری کارآمدی را برای ما فراهم کرد، حال قصد داریم نانوجت بدون حضور نانوذرات طلا را بررسی کنیم(شکل۴). در این قسمت از شبیه‌سازی به خوبی میتوان گسیل نانوجت را مشاهده نمود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، بدون وجود زیرلایه سیلیکون، حجم نقطه‌داغ ایجاد شده در حضور نانوذرات طلا به همراه میکروکره‌های SiO_2 در مقایسه با حجم نقطه‌داغ ایجاد شده، در حضور نانوذرات طلا به تنهایی، افزایش یافته است این در حالی است که شدت میدان نیز افزایش داشته است و این نتایج برای میکروکره SiO_2 به تنهایی یکسان است. درحضور زیرلایه سیلیکون حجم نقطه‌داغ در حضور نانو ذرات طلا به همراه میکروکره SiO_2 نسبت به حجم نقطه‌داغ برای نانوذرات طلا به تنهایی افزایش داشته است اما شدت میدان کاهش یافته است. این در حالی است که حجم نقطه‌داغ و شدت میدان در حضور میکروکره SiO_2 به تنهایی، نسبت به حالت‌های قبل افزایش داشته است. به طور کلی میتوان نتیجه گرفت شدت میدان تولید شده میکروکره به تنهایی هم‌مرتبه با توزیع میدان یک جفت نانوذره طلا در روش sers (هردو ۹۰) می‌باشد با این تفاوت که حجم میدان تولید شده بیشتر است. حال اگر نمونه مجهول ما برای طیف‌سنجی رامان سیلیکون باشد با این روش می‌توان طیف بهتری از آن را به دست آورد.

نتایج و جمع بندی

در این مقاله شبیه‌سازی بر روی تکنیک SERS با واسطه PNJ انجام شد. با استفاده از این تکنیک، میتوان به حداکثر



شکل۴: a)توزیع میدان‌الکتریکی در میکروکره sio_2 بدون نانو ذرات طلا با زیر لایه سیلیکون، b) بدون زیرلایه سیلیکون.

افزایش سیگنال SERS تک مولکولی ساکن در نانو شکاف نانوکره دست یافت. شبیه‌سازی‌های انجام شده روی این تکنیک نشان داد که باحضور میکروکره‌های SiO_2 میتوان به تقویت میدان برای تکنیک SERS دست یافت. تکنیک مرسوم SERS فاکتورهای تقویت مشاهده شده را می توان با استفاده از میکروکره بزرگتر بهبود بخشید. علاوه بر این، تولید PNJ در سمت سایه میکروساختارها به صورت عددی نشان داده شده است. این میکروساختارها برای افزایش SERS تک مولکول‌ها قابل استفاده مجدد و کارآمد هستند. از آنجایی که تکنیک‌های SERS با واسطه PNJ تنها به یک مرحله از قرار دادن یک میکروکره دی‌الکتریک مناسب روی یک بستر فعال پلاسمون نیاز دارند، یافته‌های گزارش‌شده در اینجا به جامعه تحقیقاتی امکان می‌دهد تا به راحتی به افزایش پراکندگی رامان نسبتاً بالاتری دست یابند[۴].

مراجع

[۱] A. Darafsheh, “Photonic nanojets and their applications”, Journal of Physics: Photonics, vol. ۳, no. ۲,p.۰۲۲۰۰۱,۲۰۲۱.

[۲] A. Heifetz, S. Kong, A. Sahakian, A. Taflove and V. Backman, “Photonic Nanojets”, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, vol. ٦, no. ۹,pp.۱۹۷۹۱۹۹۲,۲۰۰۹.

[۳] A. Itagi and W. Challener, “Optics of photonic nanojets”, Journal of the Optical Society of America A, vol.۲۲,no.۱۲,p.۲۸٤۷,۲۰۰٥.

[٤] G. Das, A. Ringne, V. Dantham, R. Easwaran and R. Laha, “Numerical investigations on photonic nanojet mediated surface enhanced Raman scattering and fluorescence techniques”, Optics Express, vol. ۲٥, no. ۱۷, p. ۱۹۸۲۲, ۲۰۱۷.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]