

گسیل نانوجت فوتونیک توسط لنزهای دی الکتریک دو بعدی

تهمینه جلالی^۱ و^۲، مرتضی زرگروشتری^۱، دانیل ارنی^۳ و کریستین هافنر^۳

۱ گروه فیزیک، دانشگاه شهیدچمران، اهواز

۲ گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

۳ گروه فوتونیک ارتباطاتی، دانشگاه ETH زوریخ، سوئیس

چکیده - در این مقاله، تولید نانوجت فوتونیک جایگزیده در مقیاس نانو را با استفاده از موج تخت تابیده شده به لنزها گزارش کرده ایم. برای شبیه سازی عددی از نرم افزار *MAX-I* با استفاده از روش چندقطبی چندتایی استفاده شده است. لنزهای دی الکتریک قابل ساخت و بهینه سازی در آزمایشگاه می باشند. با تغییر پارامترهایی نظیر ضریب شکست، اندازه و میزان انحنا، شدت توان متمرکز شدن پرتو در نانوجت فوتونیک را توسط آنها ایجاد کرده ایم. بررسی محاسبات عددی نشان می دهد که روش *MMP* بسیار ساده، سریع و قابل استفاده بر روی کامپیوترهای شخصی می باشد.

کلید واژه- پراکندگی، روش عددی، نانوجت، فوتونیک، لنز

کد PACS - ۰۷۶۰

۱- مقدمه

فلوئورسانس سلول های زنده^۷ می باشد. همچنین برای تکنیک های فوق میکروسکوپی^۸ با استفاده از نور مرئی برای یافتن و تصویرگیری نانو ذرات^۹، نظیر پروتئین ها و تک ملکول ها^{۱۰} مفید است [۴]. بنابراین، این فرآیند در شاخه های بیولوژی، مهندسی پزشکی و علم مواد کاربرد دارد و به دلیل کیفیت بالای پرتو، از میکروکره ها می توان برای وسایل فوتونیک سخت بهم چسبیده، نظیر موجبرهای اپتیکی مشدد جفت شده استفاده شود [۵]. در مقالات، بهینه سازی ذره بیضوی دی الکتریک با در نظر گرفتن نانوجت فوتونیک کاملاً کانونی شده را گزارش کرده ایم، که بر اساس پهنای پرتو و همگرایی آن، پارامتر بندی شده است و شبیه سازی با استفاده از کد FDTD دو بعدی صورت گرفته است و همچنین با استفاده از نرم افزار MAX-1 با روش نیمه

نانوجت فوتونیک^۱، از برخورد موج تخت به میکرواستوانه دی الکتریک با بهینه کردن اندازه و ضریب شکست ذرات استوانه ای شکل، برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط گروه تافلو تولید شده اند و برای شبیه سازی آنها از کد با قدرت تفکیک بالا^۲ FDTD^۳ استفاده شد [۳-۱]. نور انتشار یافته کانونی شده غیرمیرا، زیر حد پراش، جایگزیده در امتداد خط برخورد نور فرودی و در قسمت سایه استوانه را نانوجت فوتونیک نامیدند. احتمال رفتن به زیر حد پراش، دارای کاربردهای بسیاری از جمله SNOM^۴، لیتوگرافی با قدرت تفکیک بالا^۵، ذخیره سازی اطلاعات^۵ اپتیکی و مغناطیسی پیشرفته، میکروسکوپ های لنز غوطه ور^۶ و تصویر

¹ Photonic nanojet

² Finite difference time domain

³ Scanning near-field optical microscopy

⁴ High-resolution lithography

⁵ Data storage

⁶ Immersion lens microscopy

⁷ Fluorescence imaging of living cells

⁸ Ultramicroscopy technique

⁹ Nanoparticles

¹⁰ Single molecule

تحلیلی MMP^{۱۱} در دو و سه بعد انجام شده است [۶]. همچنین گروه‌های مختلف از روشهای متفاوت شبیه‌سازی نظیر روش تفاضل متناهی^{۱۲}، تئوری می^{۱۳}، اپتیک هندسی و بررسی طیف زاویه‌ای^{۱۴} را که در مبحث پراکندگی اپتیکی رایج می‌باشند، استفاده نموده‌اند. در این مقاله، ما از نرم‌افزار MAX-1 به روش چند قطبی چندگانه (MMP) استفاده کرده‌ایم [۷]. این روش بسیار دقیق و سریع می‌باشد، ولی برای گذاردن چندقطبی‌ها در مسئله باید با سعی و خطا جای بهینه آنها را یافت و چیدن درست آنها به گونه‌ای که خطا مینیمم شود بسیار دشوار است.

ساختار این مقاله بدین شرح می‌باشد، ابتدا تئوری روش عددی چندقطبی چندتایی را بررسی کرده و نحوه اعمال شکل‌های مختلف را با استفاده از این تئوری ارائه می‌نماییم. سپس، در مبحث بعد با استفاده از شکل‌های مختلف لنزها به یافتن داده‌های بهینه نظیر اندازه و ضریب شکست برای گسیل نانوجت فوتونیک می‌پردازیم. نهایتاً نتیجه‌گیری در انتهای مقاله آمده است.

۲- شبیه‌سازی دو بعدی MMP

برنامه چندقطبی چندگانه یک روش نیمه تحلیلی مرزی در بازه فرکانس است، که به نتایج بسیار دقیقی منجر می‌شود [۸]. در این برنامه، تکنیک جفت شدن نقطه تعمیم یافته^{۱۵} (GPM) اعمال شده است، که مانده وزنی شرایط پیوستگی میدان الکتریکی در یک دسته نقاط جفت شده، که در امتداد مرزها بین دامنه‌های همگن توزیع شده‌اند، را مینیمم می‌کند. به منظور به دست آوردن دقت بالا، لازم است که مرزهای چند ضلعی تقریبی نباشد. کد MAX-1 به استفاد کننده اجازه می‌دهد که فرمول‌های تحلیلی را به کار گیرد و همچنین می‌توان یک چند ضلعی با گذاشتن دایره-هایی در نقاط گوشه‌ها را اعمال کرد به طوری که جهت‌های مماسی در همه جا پیوسته باقی بماند. در ضمن می‌توان چندین چند ضلعی را بدین صورت به یکدیگر چسباند و

اشکال جدید ایجاد کرد. هر چند در نهایت MAX-1 منحنی به دست آمده را با تکه‌های^{۱۶} مکعبی تقریب می‌زند، بنابراین خطاهایی معرفی می‌کند، اما این خطاها بسیار کمتر از تقریب چندضلعی استاندارد است، زیرا مشتقات مرتبه دوم هنوز پیوسته هستند. در روش منابع کمکی^{۱۷} (MAS) که به روش چندقطبی چندتایی بسیار مرتبط است، میدان پراکنده شده خارج جسم با یک دسته منابع تک قطبی (چندقطبی مرتبه اول) که در امتداد خطوط کمکی مرز جسم قرار دارد، تقریب زده می‌شود. هر چه دورتر از مرز خط کمکی باشد پاسخ‌ها دقیقتر می‌گردند، اما تعداد ماتریس سیستم را افزایش می‌دهند. در حالت نهایی می‌توان یک خط کمکی صاف در مرکز قرار داد. بنابراین توزیع چندقطبی با چند چندقطبی در امتداد خط کمکی به پاسخ‌های دقیقی منتهی می‌شود. وقتی که موقعیت مراکز این چند قطبی‌ها در صفحه مختلط باشد، یعنی مختصات (x,y) اعداد مختلط باشند، آکرمانز^{۱۸} شبیه‌سازی دقیقتری را پیشنهاد کرد [۹]. به طور مشابه، برای مدلسازی میدان داخل جسم باید موقعیت مراکز چندقطبی‌ها را در اطراف آن قرار داد و توسط یک دسته بسط‌های بسل مبدأ مختلط^{۱۹} تقریب زد. بسیار مهم است بدانیم درجه آزادی بسیاری در قرار دادن منابع کمکی (تک قطبی‌ها) در امتداد خطوط کمکی وجود دارد. برای چندقطبی استاندارد علاوه بر موقعیت، مرتبه آنها را نیز باید تعیین کرد. یافتن یک دسته بهینه از چندقطبی‌ها برای یک پیکربندی بسیار زمانبر است و احتیاج به تحلیل بسیار زیادی دارد. اما یافتن یک دسته کارا و تا حدودی بهینه آسان است و کد MAX-1 یک الگوریتم برای این منظور را داراست. مقایسه دسته‌های کمی بهینه مختلف از چندقطبی‌ها اطلاعات مفیدی برای اعتبار نتایج ایجاد می‌کند. به علاوه کد MMP امکان محاسبه خطاهای ناشی از جفت نشدن در روی مرز را محاسبه می‌کند و بدین صورت می‌توان با تغییرات در موقعیت چندقطبی‌ها خطا را کمینه کرد. در نهایت به دلیل همگرایی سریع پاسخ‌های MMP نتایج بسیار دقیقی در میدان بسیار نزدیک، یعنی جایی که نانوجت مشاهده می‌شود، به دست می‌آید.

¹⁶ Splines

¹⁷ Method of auxiliary sources

¹⁸ Akkremans

¹⁹ Complex origin

¹¹ Multiple Multipole Program

¹² Finite difference

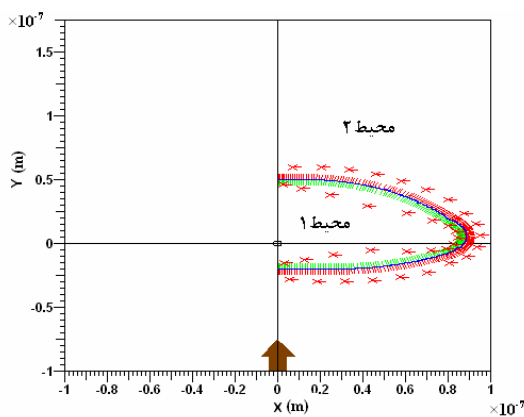
¹³ Mie Theory

¹⁴ Angular spectrum analysis

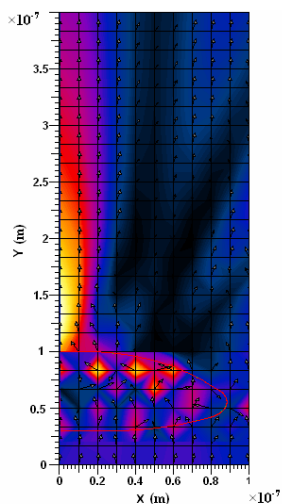
¹⁵ Generalized point matching

۳- گسیل نانوجت فوتونیک

نحوه گذاشتن چند قطبی‌ها در صفحه نمایش داده شده است. البته گذاشتن بهینه آنها کار بسیار مهم و زمان‌بری می‌باشد، منتها با استفاده از خطاهای به دست آمده در نتایج و روش سعی و خطا می‌توان جای چندقطبی‌ها را به گونه‌ای یافت که خطاها و زمان محاسبات نیز کوتاه گردند. چندقطبی‌ها از مرتبه ۲، یعنی دوقطبی می‌باشد. همان طور که در شکل (۱) مشخص است تعداد چند قطبی‌ها در انحنا ها بیشتر است، تا خطای ناشی از تقریب در آن مکانها را کاهش دهد. همچنین به دلیل تقارن و کاهش زمان محاسبات و ذخیره‌سازی حافظه تنها از یک نیمه لنز استفاده شده است. در مرجع ۸ نحوه اعمال چندقطبی در یک لنز در کد MAX-1 با جزئیات ارائه شده است.



شکل ۱: نیم میکرو لنز، خط راست مرز، علامت ستاره چندقطبی، فلاش موج تخت تابیده شده و هاشور میزان خطای برنامه را در محاسبه انحنا نمایش می‌دهد.



شکل ۲: نیم نانوجت فوتونیک تولید شده توسط موج تخت تابیده شده به لنز نمایش داده شده است. مشخصات لنز بدین قرار می‌باشد: انحنا به ترتیب $10^{-8} \times 1/5$ و $10^{-7} \times 1/2$ متر و ضریب شکست ۱/۷۶.

اخیرا شیبه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که نه تنها یک استوانه دی‌الکتریک بسیار طویل بلکه کره و بیضوی دی‌الکتریک با قطر حدود ده طول موج قادر هستند تا نور را آن سوی حد پراش متمرکز کنند [۳-۱]. البته با توجه به ضریب شکست دی‌الکتریک، نقطه کانونی می‌تواند در بیرون و یا داخل جسم باشد و امتداد انتشار نیمه ماکزیمم پهنای کل 20 (FWHM) پرتو کوچکتر از طول موج باقی می‌ماند و پرتو (نانوجت فوتونیک) به شدت بسیار بالایی می‌رسد و در نهایت نقطه کانونی زیر حد پراش قرار می‌گیرد. در این جا، ما به بررسی اشکال مختلفی که ساخت آنها در آزمایشگاه امکان‌پذیر باشد، نظیر لنزها پرداخته‌ایم و به بررسی جزئیات خواص نانوجت‌های گسیل شده از آنها و میزان کارایی آنها می‌پردازیم. همچنین برای این گونه اشکال با توجه به شکل و اندازه آنها، با تغییر ضریب شکست سعی در حفظ نانوجت تولید شده بر روی سطح لنز را در میدان نزدیک داریم.

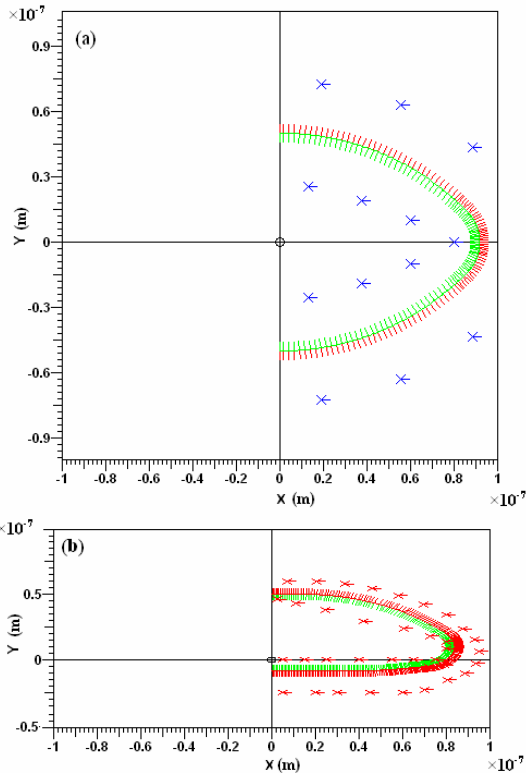
۳-۱- میکرو لنزهای بهینه برای گسیل نانوجت فوتونیک

در این مقاله، مطالعه جزئیات میدان‌های داخلی و نزدیک به جسم در خارج برای لنزهای دی‌الکتریک صورت گرفته شده است. ساخت اجسام به شکل لنزها در آزمایشگاه و تغییر شکل دادن آنها برای بهینه‌سازی امکان‌پذیر می‌باشد. در این اجسام با تغییر دادن اندازه و ضریب شکست و حتی میزان انحنای لنز سعی در به وجود آوردن نانوجت فوتونیک در مجاورت مرز روبروی پرتو فرودی به جسم می‌کنیم.

ابتدا شکل لنز با تغییر انحنای آن بهینه می‌گردد و پس از آن، با تغییر ضریب شکست می‌توان نانوجت فوتونیک را بر روی سطح مقابل پرتو فرودی به دست آورد. البته برای بعضی از شکل‌های لنز و بعضی انحناها داشتن نانوجت فوتونیک بر روی سطح امکان‌پذیر نمی‌باشد. ضریب شکست محیط اطراف لنز (۲) را یک فرض کرده‌ایم، طول موج پرتو فرودی 500 nm می‌باشد و نور فرودی به صورت موج تخت در محیط ۲ از پائین به بالا تابیده می‌شود. در شکل (۱)

²⁰ Full width half maximum

پهنای نانوجت فوتونیک حدود ۱۰۰ nm می‌باشد، ولی شدت آن کم است. مشخصات لنز (b) انحنای $۲/۰ \times 10^{-8}$ و ۱۰^{-4} پهنای نانوجت فوتونیک حدود ۲۰۰ nm می‌باشد ولی شدت آن کم است. البته در کلیه لنزها، برای کاستن خطا در گوشه‌ها، تا حدی در لبه‌ها انحنای ایجاد شده است، که تاثیر عمده‌ای در عملکرد لنز ندارد.

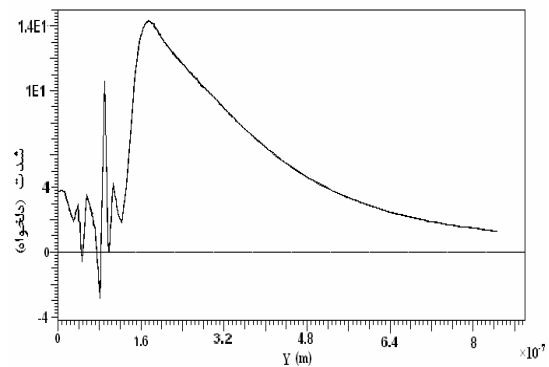


شکل ۵: نمای لنزهای متفاوت که قادر به تولید نانوجت فوتونیک بر روی سطح خود می‌باشند. خط راست مرکز، علامت ستاره چندقطبی و هاشور میزان خطای برنامه را در محاسبه انحنای نمایش می‌دهد.

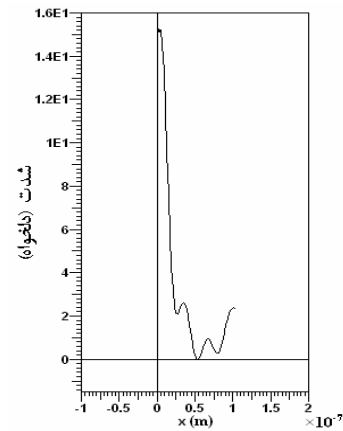
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش 2D-MMP برای مدلسازی نانوجت فوتونیک ذره دی‌الکتریک با شکل اختیاری مورد بررسی قرار گرفته شد. همچنین چند مدل از لنزهای دی‌الکتریک که قابل ساخت و بهینه‌سازی در آزمایشگاه می‌باشند، با پارامترهای مناسب برای دارا بودن نانوجت فوتونیک ارائه شده است. بررسی محاسبات عددی و مقایسه آنها با دیگر روش‌ها نشان داده است [۶] که در روش MMP زمان

در شکل (۲) نمای نانوجت فوتونیک توسط موج تخت تابیده شده به لنز با مشخصات انحنای $۱/۵ \times 10^{-8}$ و $۱/۲ \times 10^{-7}$ سانتی‌متر و ضریب شکست $۱/۷۶$ نمایش داده شده است، که پهنای $W_{FWHM} = ۸۰$ nm و شدت آن ۱۵ می‌باشد. میزان خطای نسبی محاسبات ۰/۰۴٪ می‌باشد. همان طور که در شکل (۳) مشخص است، شدت پس از قله سریعاً میرا می‌گردد. البته با افزایش ضریب شکست واضح است که قله میدان به طرف داخل لنز جا به جا می‌گردد. میزان پهنای نانوجت فوتونیک به دست آمده با توجه به اندازه لنز بسیار باریک و در حدود $۱/۶$ طول موج پرتو نور فرودی است.



شکل ۳: شدت پرتو در راستای موج فرودی که ماکزیمم آن، مکان نانوجت فوتونیک، در حدود ۱۵ قرار دارد.



شکل ۴: شدت نانوجت فوتونیک در جهت عمود به راستای موج فرودی میزان پهنای پرتو $W_{FWHM} = ۸۰$ nm می‌باشد.

چند نمونه لنز در شکل (۵) آمده است که با توجه به نانوجت فوتونیک تولید شده، لنز شکل (۱) دارای باریکترین پهنای و بیشترین شدت می‌باشد. مشخصات لنز (a) انحنای $۲/۰ \times 10^{-8}$ و $۱/۲ \times 10^{-7}$ متر و ضریب شکست $۳/۵$ است،

پردازش و حافظه مورد نیاز کاهش می‌یابند و این روش دقیق، ساده و سریع است و امکان انجام محاسبات عددی و شبیه‌سازی را بر روی کامپیوترهای شخصی میسر می‌سازد.

سپاسگزاری

از همکاری گروه اپتیک محاسباتی برای استفاده از نرم‌افزار MAX-1 صمیمانه تشکر می‌کنیم. این کار با پشتیبانی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و دانشگاه ETH زوریخ انجام شد.

مراجع

- [1] A. V. Itagi, W. A. Challener, "Optics of photonic nanojets", **J. Opt. Soc. Am. A**, 22(12), 2847, (2005).
- [2] S. Lecher, Y. Takakura, P. Meyrueis, "Properties of a three-dimensional photonic jet", **Opt. Lett.** 30, 2641-2643, (2005).
- [3] Z. Chen, A. Taflove and V. Backman, "Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique", **Opt. Express** 12, 1214-1220, (2004).
- [4] E. Betzig, "Proposed method for molecular optical imaging", **Opt. Lett.** 20, 237, (1995).
- [5] Z. Chen, A. Taflove, V. Backman, "Highly efficient optical coupling and transport phenomena in chains of dielectric microspheres", **Opt. Lett.** 30, 389, (2006).
- [6] T. Jalali, D. Erni, Ch. Hafner, "Molding the Emission of Photonic Nanojets by Different Particle Shapes", **OWTNM2006**, Italy(2006).
- [7] <http://max-1.ethz.ch/>
- [8] Ch. Hafner, *Post-modern Electromagnetics*, John Wiley & Sons, Chichester (1999).
- [9] G. P. M. Akkermans, *National Technical Information Service*, Springfield, VA (1982).

Emission of Photonic Nanojet by two dimensional Dielectric Microlens

T. Jalali 1,2,3 , M. Z. Shoushtari 1, D. Erni 3 and Ch. Hafner 3

1Physics Department, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

2Physics Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

3Communication Photonics Group, Laboratory for Electromagnetic Fields and Microwave Electronics, ETH Zurich, Switzerland

Abstract- In this paper, We have studied photonic nanojet generation in nanoscale illuminated by a plane wave to the lenses. Numerical simulations were performed by using the multiple multipole methods in MAX-1 code for microlens. Dielectric lens has capability to characterize and optimize in the lab. Therefore, parameter like refractive index, size and lens curvature regarding to confined intensity beam waist of resulting photonic nanojetis changed to find optimal lenses. Numerical calculation shows that MMP method is accurate, easy, fast and it could be used on PC.

Keywords: Lens, MMP method, Nanojet, Photonic, Scattering

PACSNo:0706