بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تحلیل و شبیه‌سازی نانوموتور نوری پلاسمونی با گشتاور قابل تنظیم توسط فرکانس نور تابشی

نعیم غفاری[۱]، حامد باغبان[۱]

۱. دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز

چکیده – نانوموتور نوری پلاسمونی، ساختاری پلاسمونیک است که قسمت فلزی آن به لحاظ اندازه در مقیاس نانو قرار می‌گیرد که با اعمال یک نور قطبش یافته‌ی خطی، می‌تواند حول محور خود دوران کند. این نوع نانوموتورها می‌توانند کاربردهای گسترده‌ای در فناوری‌های زیستی، شیمی و همین‌طور سیستم‌های نانو الکترومکانیک داشته باشند. در این مقاله نحوه‌ی محاسبه‌ی گشتاور ایجادشده در اثر تابش این نور موردبررسی قرارگرفته و نمودار گشتاور برحسب فرکانس نورتابشی برای نانوموتور پلاسمونی استخراج‌شده است. همچنین در قسمت پایانی، تأثیر تغییر شکل هندسی ساختار موردمطالعه در پاسخ خروجی، موردبحث قرارگرفته است.

کلید واژه- نانوموتور پلاسمونی، نور قطبش یافته خطی، گشتاور نوری، رزونانس پلاسمونیک

Analysis and Simulation of Plasmonic Optical Nanomotors with Tunable Wavelength Dependent Torque

Naeem Ghaffari[۱], Hamed Baghban[۱]

۱. School of Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- Plasmonic optical nanomotor is a plasmonic structure which has the metal part size in nano scales. It can rotate along its axis when illuminated with a linearly polarized light. Such nanomotors potentially could have wide applications in Biology, Chemistry and also in Nanoelectro-mechanical systems (NEMS). In this paper, the method of calculation of the torque which is made due to illuminating light has been examined and also the torque– frequency diagram has been extracted. At the last section of this paper, the effects of change in geometrical structure on the output results have been demonstrated.

Keywords: Plasmonic nanomotor, linearly polarized light, optical torque, plasmonic resonance

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

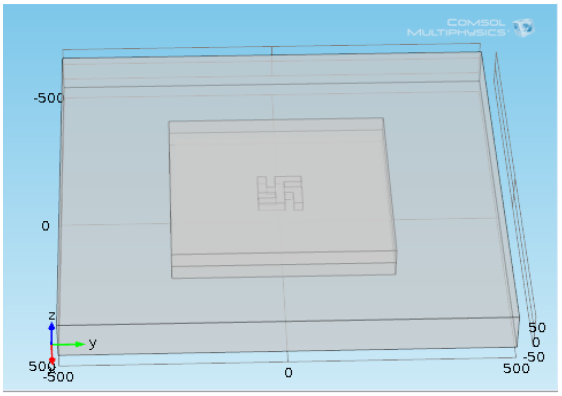
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-19]

۱- مقدمه

فوتون‌های یک موج الکترومغناطیس، حامل تکانه هستند و این تکانه می‌تواند کاربردهای بسیار گسترده‌ای در زمینه NEMS و بیولوژی فراهم آورد [۱و۲]. چنین تکانه‌ای با استفاده از طراحی هوشمندانه یک ساختار، می‌تواند برای ایجاد گشتاور به کار رود و متعاقباً ساخت یک موتور ریز مقیاس نوری را ممکن سازد. پروفسور ژانگ به همراه همکارانش در دانشگاه برکلی؛ با ارائه پژوهشی شاخص در این زمینه در سال ۲۰۱۰، موفق به ساخت یک نانوموتور نوری پلاسمونیک شده است[۳]. این ساختار با تحریک پلاسمون‌های سطحی توسط نور تابشی، می‌تواند اندرکنش نور و نانوموتور را به‌طور چشم‌گیری افزایش دهد و در حوالی فرکانس رزونانس پلاسمونیک، گشتاور تقویت‌شده‌ی قابل‌توجهی را ایجاد کند. برای محاسبه و شبیه‌سازی از روش‌های مطرح شده برای محاسبه گشتاور اعمالی بر یک نانوسیلندر نقره‌ای و نیز توده‌ای از نانوذرات طلا که در معرض میدان قرار گرفته، الهام گرفته شده است[۴و۵]. در این مقاله، روش محاسبه و شبیه‌سازی گشتاور با استفاده از مؤلفه‌های میدان الکترومغناطیس (E, B) موردبحث قرارگرفته و اثر تغییر یکی از پارامترهای هندسه نانوموتور، بر روی پاسخ خروجی گشتاور-فرکانس بررسی‌شده است.

۲- ساختار نانو موتور و معادله موج تابشی

ساختار نانوموتور شبیه‌سازی شده، به فرم صلیب شکسته بوده و الهام گرفته‌شده از الگوی نانوموتور ژانگ می‌باشد.



شکل ۱: نمای جانبی نانوموتور پایه شبیه‌سازی‌شده (صفحه yz)، واحد اعداد به نانومتر.

جنس مکعب خارجی، آب، دو دیسک داخلی همسان از جنس سیلیکا (شیشه)، و جنس ساختار فلزی صلیب‌شکل، از طلا می‌باشد. همچنین معادله موج تابانده‌شده به نانوموتور، یک موج مسطح قطبش‌یافته به‌صورت خطی با معادله‌ی زیر می‌باشد.

$$\vec{E}_{(\vec{r},t)} = \vec{E}_0 \exp(i(\omega t + \vec{k}.\vec{r})) \qquad (۱)$$

که در این رابطه $\vec{E}$ بردار میدان الکتریکی، $\vec{E}_0$ دامنه میدان الکتریکی، ω فرکانس زاویه‌ای نور تابشی، $\vec{k}$ بردار موج ، $\vec{r}$ بردار مکان و t زمان می‌باشند.

این ساختار به دلیل دارا بودن برخی خواص فیزیکی مطرح شده در منابع معتبر پلاسمونیک، می‌تواند در مرز مشترک بین فلز و عایق خود، به پلاسمون‌های سطحی اجازه انتشار دهد و باعث تقویت موضعی میدان الکترومغناطیس شود [۶].

۳- نحوه‌ی محاسبه‌ی گشتاور

بر مبنای فیزیک پایه، بر یک بار الکتریکی در یک میدان الکترومغناطیس نیروی لورنتز وارد می‌شود [۷].

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \qquad (۲)$$

که در آن، $\vec{F}$ بردار نیروی وارد شده بر بار الکتریکی، $\vec{P}$ بردار تکانه، q میزان بار الکتریکی، $\vec{v}$ بردار سرعت ذره باردار و $\vec{E},\vec{B}$ بردارهای چگالی شار مغناطیسی و بردار میدان الکتریکی می‌باشند. در حالت دیفرانسیلی برای یک توزیع بار و جریان الکتریکی:

$$d\vec{f} = (\rho \vec{E} + \rho \vec{v} \times \vec{B}) dV \qquad (۳)$$

در این رابطه، $d\vec{f}$ دیفرانسیل نیرو، ρ چگالی بار الکتریکی، dV المان حجمی می‌باشند. همچنین از رابطه بین چگالی جریان و سرعت حرکت یک‌ذره‌ی باردار، خواهیم داشت:

$$d\vec{f} = (\rho \vec{E} + \vec{J} \times \vec{B}) dV \qquad (۴)$$

در این رابطه، $\vec{J}$ چگالی جریان الکتریکی می‌باشد. حال با در نظر گرفتن رابطه‌ی بین گشتاور و نیروی اعمالی بر یک ذره، گشتاور به‌صورت زیر خواهد بود.

$$\vec{\tau} = \int \vec{r} \times (\rho \vec{E} + \vec{J} \times \vec{B}) dV \qquad (۵)$$

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-19]

که در این رابطه $\vec{\tau}$ گشتاور کل اعمال شده به ساختار و $\vec{r}$ بردار مکان می‌باشند. با در دست داشتن رابطه‌ی گشتاور، می‌توان مؤلفه‌به‌مؤلفه عبارات تشکیل‌دهنده‌ی گشتاور را در سه راستای $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$ استخراج کرد و در محیط نرم‌افزاری به‌کار گرفت. طبق قانون اول ماکسول(قانون گوس) که در آن $\vec{D}$ چگالی شار الکتریکی می‌باشد.

$$\rho = \vec{\nabla}.\vec{D} \qquad (۶)$$

و رابطه (۴) خواهیم داشت:

(۷)

$$d\vec{f} = \left(\left(\frac{\partial \vec{D}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{D}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{D}_z}{\partial z}\right)\begin{pmatrix}\vec{E}_x \\ \vec{E}_y \\ \vec{E}_z\end{pmatrix} + \vec{J} \times \vec{B}\right)dV$$

که $\vec{E}_x, \vec{E}_y, \vec{E}_z$، $\vec{D}_x, \vec{D}_y, \vec{D}_z$ به ترتیب مولفه‌های میدان الکتریکی و مولفه‌های چگالی شار الکتریکی در راستای بردارهای یکه مختصات دکارتی و علامت ∂ نماد مشتق جزئی نسبت به کمیت‌های مکانی می‌باشد. حال گشتاور را با جایگزینی رابطه (۷) به دست خواهیم آورد.

$$d\vec{\tau} = \vec{r} \times d\vec{f} = (x\hat{a}_x + y\hat{a}_y + z\hat{a}_z) \times d\vec{f} \qquad (۸)$$

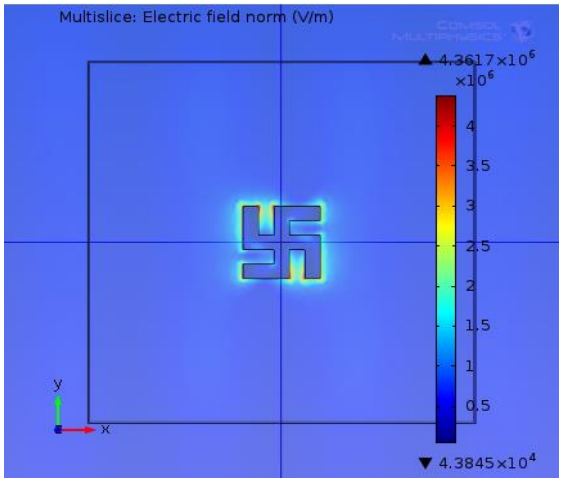
که x, y, z متغیرهای مکان در مختصات دکارتی و $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$ بردارهای یکه در مختصات دکارتی می‌باشند.

۴- روند و پارامترهای شبیه‌سازی

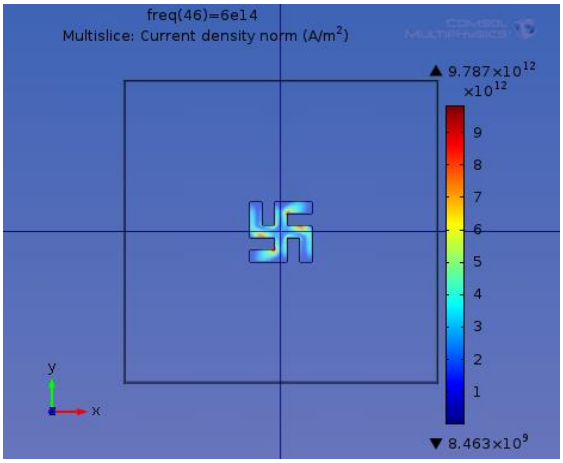
جهت انجام شبیه‌سازی، ابتدا تحلیل کمیت‌های میدان الکترومغناطیس در محیط نرم‌افزاری قدرتمند و دقیق کامسول مالتی فیزیکس صورت گرفته و با پردازش‌های ثانویه، گشتاور سیستم نانوموتوری محاسبه‌شده‌است. در این شبیه‌سازی؛ فرکانس نور تابشی به عنوان پارامتر ورودی لحاظ شده و نیز گشتاور مکانیکی ایجاد شده در نانوموتور به عنوان پارامتر خروجی محاسبه گشته است.

۵- نتایج و نمودارهای به‌دست‌آمده

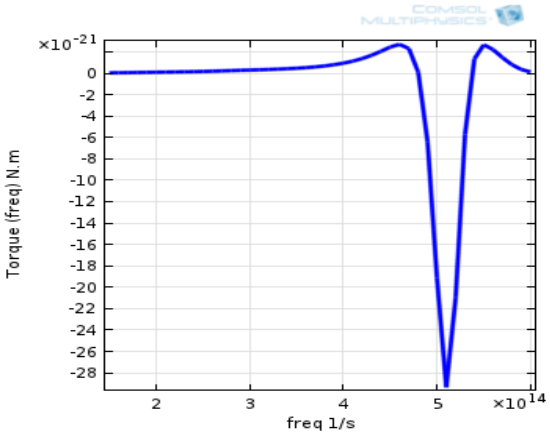
با تاباندن یک موج الکترومغناطیس با توان ۱ میلی‌وات، طول‌موج بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر، همچنین شدت میدان ۱ ولت‌برمتر، بافرم استاندارد موج مسطح و همچنین عدد موج $k = \omega/c$، نتایج به شرح ذیل می‌باشند.



شکل ۲: نمودار توزیع نرم میدان الکتریکی در سطح نانوموتور پایه



شکل ۳: نمودار توزیع نرم چگالی جریان در سطح نانوموتور پایه



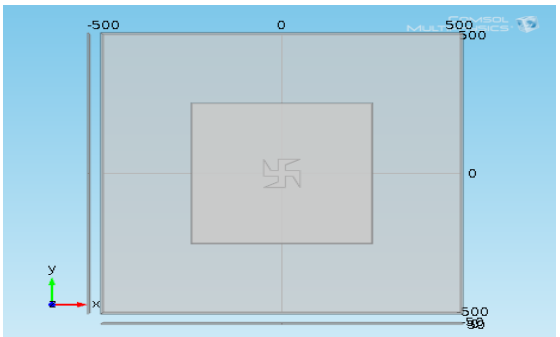
شکل ۴: پاسخ گشتاور نانوموتور پایه نسبت به فرکانس نورتابشی؛ گشتاور مثبت بیانگر دوران پادساعت‌گرد و گشتاور منفی نمایانگر دوران ساعت‌گرد می‌باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-19]

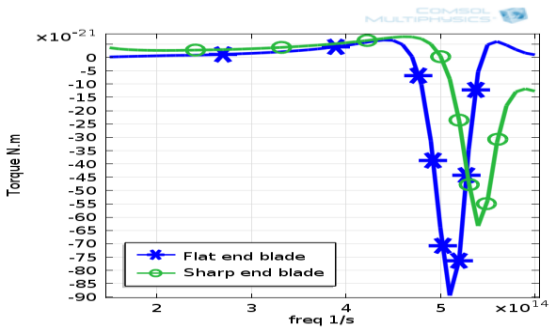
۶- بررسی اثر تغییر هندسه بر پاسخ گشتاور

شکل هندسی، جنس مواد و نحوه‌ی اتصال اجزای مختلف ساختار پلاسمونیک، بر فرکانس رزونانس پلاسمونیک، بیشینه مقدار تقویت میدان و نیز گشتاور ایجادشده توسط نانوموتور تأثیرگذار می‌باشند. در این قسمت با بررسی انجام‌شده روی تأثیر تغییر پارامتر ضخامت انتهای پره‌های نانوموتور صلیبی بر پارامتر خروجی سیستم یعنی گشتاور، نسبت به پارامتر ورودی یعنی فرکانس، قابلیت طراحی و کنترل نوع پاسخ خروجی به تصویر کشیده شده است.

اگر انتهای گام پره‌های نانوموتور شکل نوک‌تیز داشته باشند، نمای نانوموتور به صورت شکل(۵) خواهد بود.



شکل ۵: نمای از بالای نانوموتور با پره‌های تیز (صفحه xy)



شکل ۶: پاسخ گشتاور - فرکانس نورتابشی بر نانوموتور با هندسه تغییریافته. نمودار نشان‌دار شده با علامت ستاره، نمودار حالت پایه با پره‌های با انتهای تخت، نمودار نشان‌دار شده با علامت دایره، نمودار برای نانوموتور با پره‌های تیز می‌باشند.

در شکل (۶)، پاسخ توأم دو نانوموتور پایه و نانوموتور تغییریافته، نسبت به یک ورودی به‌تصویر کشیده شده است. درواقع پاسخ گشتاور برحسب فرکانس برای سیستم فوق، با همان الگوی تقریباً مشابه نانوموتور با ساختار هندسی پایه است و میزان و محل پیک تغییر خواهد یافت. در این مورد خاص با کوچک شدن ضخامت انتهای ساختار، محل پیک به فرکانس‌های بزرگ‌تر انتقال خواهد یافت، اما دامنه‌ی پیک‌ها کاهش می‌یابد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش گام‌به‌گام برای تحلیل خروجی یک ساختار پلاسمونیک به‌عنوان نانوموتور نوری موردبررسی قرار گرفت و همچنین به‌عنوان یک بررسی موردی، اثر تغییر هندسه در پاسخ گشتاور- فرکانس این نانوموتور به نمایش درآمد.

تقدیر و تشکر

در پایان، لازم می‌دانم از زحمات و راهنمایی‌های بی‌دریغ جناب دکتر حامد باغبان، که مسئولیت مدیریت و هدایت این پژوهش را بر عهده داشته‌اند، قدردانی نمایم.

مراجع

[۱] Allemand, J. F., D. Bensimon, R. Lavery, and V. Croquette. "*Stretched and overwound DNA forms a Pauling-like structure with exposed bases.*" **Proceedings of the National Academy of Sciences** ۹۵, no. ۲۴ (۱۹۹۸): ۱۴۱۵۲-۱۴۱۵۷.

[۲] Fennimore, A. M., T. D. Yuzvinsky, Wei-Qiang Han, M. S. Fuhrer, J. Cumings, and A. Zettl. *"Rotational actuators based on carbon nanotubes."* **Nature** ۴۲۴, no. ۶۹۴۷ (۲۰۰۳): ۴۰۸-۴۱۰.

[۳] Liu, Ming, Thomas Zentgraf, Yongmin Liu, Guy Bartal, and Xiang Zhang. *"Light-driven nanoscale plasmonic motors."* **Nature nanotechnology** ۵, no. ۸ (۲۰۱۰): ۵۷۰-۵۷۳

[٤] Rockstuhl, C., and J. Tominaga. *"Calculation of the torque exerted by light fields on silver elliptical nanocylinders."* **EPL (Europhysics Letters)** ۷۳, no. ۲ (۲۰۰٦): ۳۱۳.

[۵] Messina, Elena, Emanuele Cavallaro, Adriano Cacciola, Maria Antonia Iatì, Pietro G. Gucciardi, Ferdinando Borghese, Paolo Denti et al. *"Plasmon-enhanced optical trapping of gold nanoaggregates with selected optical properties."* **ACS nano** ٥, no. ۲ (۲۰۱۱): ۹۰۵-۹۱۳.

[۶] Maier, Stefan Alexander. *Plasmonics: Fundamentals and Applications: Fundamentals and Applications*. Springer, ۲۰۰۷.

[۷] Griffiths, David Jeffrey, and Reed College. *Introduction to electrodynamics*. Vol. ۳. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, ۱۹۹۹.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-19]