بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

نیروهای دافعه و جاذبه نوری در موجبرهای پلاسمونیکی V شکل صاف برای جابجایی نانو ذرات

سینا عقیلی، آیدین امینی، سعید گل محمدی

دانشکده مهندسی فناوری های نوین، دانشگاه تبریز

Sina.aghili93@ms.tabrizu.ac.ir , Aiden.amini93@ms.tabrizu.ac.ir ,sgolmohammadi@tabrizu.ac.ir

چکیده – در این مقاله نیروهای جاذبه و دافعه نوری در یک موجبر پلاسمونیکی V شکل از جنس طلا با دیواره هایی با زاویه دندانه ۷۷ درجه با نقاط تیز صاف شده مورد بررسی قرار گرفته است. با تغییر جنس لایه ی بیرونی و تغییر میزان انرژی نوری محبوس در انتهای موجبر، نیروهای نوری دافعه و جاذبه اعمالی بر نانوذره های فلزی و پلاسمونیکی با استفاده از تنسور تنش ماکسول بدست آمده است. نتایج حاصل نشان می-دهد با به کار بردن لایه پوشش از جنس مناسب افزایش چند برابری این نیروها را نسبت به حالت موجبر بدون پوشش، در پی خواهد داشت. در بهترین حالت، ساختاری با لایه پوششی ۳ نانومتری سیلیکون نیترید، یک نانو ذره پلاسمونیکی متشکل از طلا و دی اکسید تیتانیوم را از انتهای شیار به وسیله ی یک موج تخت تک طول موج با شدت ۱ وات بر میکرومتر مربع به طرف بالای ساختار جابجا می‌کند که بعد از رسیدن به بالای ساختار با توجه به توزیع فضایی شدت میدان الکتریکی که باعث تغییر گرادیان میدان و قطبش نانو ذره مورد نظر می شود، علامت نیرو تغییر کرده و مانع از خارج شدن ذره از موجبر شده و ذره در داخل ساختار، به طرف پایین حرکت می‌کند.

کلید واژه- گرادیان میدان الکتریکی ، موجبرپلاسمونیکی شیار ، نانو ذره ، نیروهای نوری

Repulsive and attractive optical forces in the truncated V-plasmonic waveguide for nanoparticle manipulation

Sina Aghili, Aydin Amini, and. Saeed Golmohammadi

School of engineering emerging technologies, University of Tabriz

Abstract- In this paper, the attractive and repulsive optical forces in the truncated V-shaped 77◦ plasmonic gold waveguide have been investigated. By changing the coating layers material and consequently the amount of trapped light energy in bottom of the waveguide, the applied optical forces on metal and plasmonic nanoparticles has been obtained with using the Maxwell stress tensor method. Our results show that by using a coating layer of suitable material, the optical forces increase compared to the uncoated waveguide. In the best situation, the structure which has a silicon nitride coating layer, a plasmonic nanoparticles consisting of gold and titanium dioxide moved to the top of the structure from the end of grooves by a single-wavelength plane wave with an intensity of 1 w/um^2. After reaching nanoparticles to the top of the waveguide according to changing the spatial distribution of the electric field intensity which alters the gradient electric field and nanoparticle Polarization Consequently, the sign of optical forces is change and it Prevent the nanoparticle move to the outside of the waveguide and again it will move to the bottom of the waveguide.

Keywords: Electric field gradient, grooved plasmonic waveguide, nanoparticle, optical forces

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

موجبرهای پلاسمونیکیVشکل با تلفات هدایت پایین و ظرفیت بالا در حبس موج های پلاسمونی سطحی به صورت عرضی و توانایی درافزایش میدان الکترومغناطیسی به خصوص در انتهای ساختار مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته اند[1]. معمولا با استفاده از روش ضریب شکست موثر می توان دلایل فیزیکی بوجودآمدن یک میدان محلی شدید در قسمت انتهایی را بررسی کرد. با افزایش عمق و کاهش عرض ساختار، ضریب شکست موثر در انتهای ساختار افزایش می یابد و در نتیجه سرعت فاز و گروه به سمت صفر میل می کند و موج های پلاسمونی سطحی در آنجا متوقف و تجمع عظیم انرژی بوجود خواهد آمد[2]. پس موجبر پلاسمونیکیV شکل به عنوان یک متمرکز کننده انرژی نوری کارامد، کاربردهای زیادی ازجمله در ساختارهای نانواپتومکانیکی خواهند داشت که در سال ۲۰۱۲ آلکساندر شالین و همکارانش در چند مقاله به موضوع جابجایی نانوذرات در این ساختارها پرداخته اند [3] و [4] . در این مقاله با استفاده از همین ایده و طراحی یک موجبر جدید که نقاط نوک تیز آن صاف و برای افزایش نیروی نوری از یک لایه‌ی پوشش بیرونی سه نانومتری استفاده شده است. این نیروها را با استفاده از روش تنسور تنش ماکسول، بر روی نانو ذرات فلزی و پلاسمونیکی بدست می‌آوریم و مناسب-ترین ساختار را برای جابجایی نانوذرات معرفی می‌کنیم.

۲- ساختار و روش شبیه سازی

ساختار مورد نظر از جنس طلا می باشد که دیواره های آن به شکل V و زاویه این دندانه ها ۷۷ درجه می باشد و لایه ی پوششی بیرونی آن در حدود ۳ نانومتر است . عمق موجبر در حدود ۱۳۰ نانومتر و عرض بالایی دهانه ی V شکل ۷۰ نانو متر و پایینی در حدود۱۰ نانومتر می‌باشد که در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱ : سمت چپ شکل کلی ساختار، دیواره ها با زاویه دندانه ۷۷ درجه و لایه پوششی به اندازه ۳ نانومتر می باشد . شکل سمت راست سطح مقطع موجبر در صفحه xz را نشان می دهد.

۲-۱- روش محاسبات

رویکرد کلی برای محاسبه نیروهای نوری اعمالی بر روی نانوذره با استفاده از تنسور تنش ماکسول و بر اساس نیروی لورنتز ماکروسکوپیک است که با این روش می‌توانیم میدان‌های پیرامون ذره را محاسبه کنیم. برای کاهش پیچیدگی موجود در محاسبات یک نانو ذره دو قطبی با پراکندگی ضعیف در نظر می گیریم: [5] :

$$\langle F_{EM} \rangle = \frac{\alpha'_p}{4} \nabla \langle |E|^2 \rangle + \frac{\alpha''_p}{2} \langle |E|^2 \rangle \nabla \varphi \qquad (1)$$

$\alpha'_p + i\,\alpha''_p$ قطبش مختلط نانو ذره و E در این رابطه میدان منتشر شده و پراکنده شده توسط نانو ذره است و φ فاز میدان را نشان می دهد. به طور کل قسمت اول رابطه معرف نیروی گرادیان نوری و قسمت دوم رابطه نشان دهنده فشار تشعشعاتی تابشی است و عامل تعیین کننده در محاسبات اندرکنش گرادیان میدان و قطبش ذره می باشد که دافعه یا جاذبه بودن نیروی نوری را مشخص می کند. مسئله دیگری که در این قسمت نمی توان از آن چشم پوشی کرد قطبش نانو ذره می باشد که با توجه به اینکه در این مقاله هم از نانوذره پوسته-هسته و هم فلزی استفاده شده است رابطه ی قطبش هر دو را بیان می کنیم که برای نانو ذرات فلزی عبارتند از[6] :

$$\alpha = 4\pi a^3 \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_m}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_m} \qquad (2)$$

که a شعاع نانو ذره و ε_p تابع دی الکتریک ذره و ε_m که تابع دی الکتریک محیط (در اینجا خلا) است و برای نانوذرات هسته-پوسته خواهیم داشت:

$$\alpha = 4\pi a^3 \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_m)(\varepsilon_c + 2\varepsilon_s) + \eta(\varepsilon_c - \varepsilon_s)(1 + 2\varepsilon_s)}{(\varepsilon_s + 2)(\varepsilon_c + 2\varepsilon_s) + \eta(2\varepsilon_s - 2)(\varepsilon_c - \varepsilon_s)} \qquad (3)$$

ε_s , ε_c به ترتیب توابع دی الکتریک هسته، و پوسته و η حجم کل ذره اشغال شده با کره‌ی داخلی را نشان می-دهد. دلیل استفاده از این نانوذرات پلاسمونیکی توانایی بالای آنها در تنظیم فرکانس رزونانس پلاسمونی می‌باشد که در بررسی اثرات نانو اپتومکانیکی بسیار پرکاربرد می‌باشد. روابط قطبش از این جهت پراهمیت است که با هر بار رزونانس مجزایی که در طول جرکت نانوذره در موجبر بر اثر

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

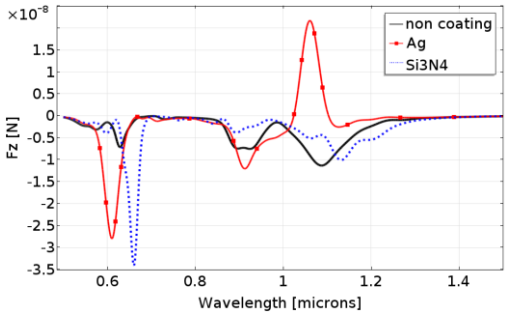
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

تغییر گرادیان میدان اتفاق می افتد قطبش تغییر می کند و با تغییر قطبش، نیروی نوری از دافعه به جاذبه و یا بالعکس تغییر می کند. اگر قسمت حقیقی قطبش نانو ذره منفی باشد، نیروی گرادیان دافعه خواهد شد و اگر قسمت حقیقی قطبش مثبت باشد، یک نیروی گرادیان جاذبه بوجود می-آید و در نهایت می‌توان با مهندسی یک ساختار با اندرکنش مناسب نیروی گرادیان و قطبش، سیستمی با خاصیت نانواپتو مکانیکی طراحی کرد [3]. در محاسبات نیرو، نیروهای وزن نانوذره، واندروالس و اصطکاک هم در نظر گرفته شده است[4].

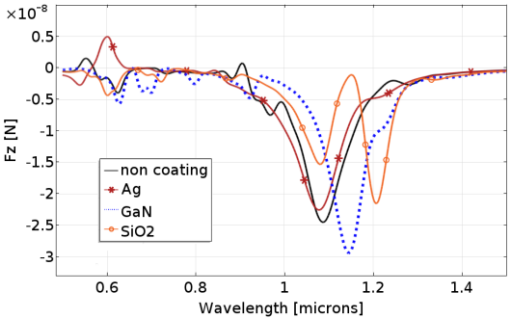
۲-۲- روش شبیه سازی

برای آنالیز ساختار مورد نظر ما از روش FDTD استفاده کرده ایم [7]. که اندازه مش در هر سه راستا ۲ نانومتر و زمان شبیه سازی 300 fs می باشد. شرایط مرزی اطراف ساختار PML در نظر گرفته شده و یک منبع موج تخت با پهنای باند ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ نانومتر در راستای z– با شدت 1.3 w/um^2 از بالای ساختار می‌تابد که جهت میدان الکتریکی در راستای x می‌باشد. ابتدا یک نانو ذره نقره در انتهای ساختار قرار می دهیم و نیروی نوری اعمالی بر آن را در راستای Z با روش تنسور تنش ماکسول محاسبه می کنیم. با توجه به این که در راستای x و y مقدار نیرو ناچیز و از مرتبه 10^{-12} می باشد از آنها صرفنظر می کنیم.

همان طور که در شکل ۲ مشخص است با اعمال یک پوشش نازک نیروی نوری حدود ۵ الی ۶ برابر بیشتر شده و برای حالت پوشش نقره ای در فرکانس حدود ۶۰۰ نانومتر یک نیروی منفی بزرگ و در طول موج حدودا ۱ میکرومتر نیروی مثبت به ذره وارد می‌شود که توانایی کندن نانوذره از انتهای ساختار را دارد. همین روش را برای یک نانو ذره نقره – طلا هم مرکز (شعاع نقره ۱۰ نانومتر و طلا ۸ نانومتر) در انتهای ساختاراستفاده می کنیم و نتایج آن مطابق شکل۳ می باشد. در این سیستم نیرویی که توانایی کندن ذره از انتهای ساختار را داشته باشد وجود ندارد و فقط ساختار با پوشش نقره نیروی کوچک مثبتی در ۶۱۰ نانومتر ایجاد می‌کند. و تنها مزیت این ساختار این است که با پوشش نازکی از موادی همچون گالیم نیترید و سیلیکا می توان نیروی نوری را تا چندین مرتبه افزایش داد.

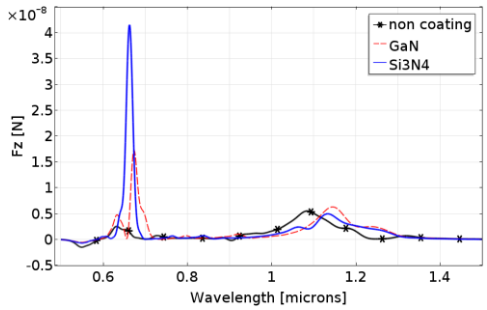


شکل ۲: نیروی اعمالی بر یک نانو ذره نقره ۱۰ نانومتری در راستای z برای سه حالت بدون پوشش بیرونی، پوشش ۳ نانومتری نقره و سیلیکون نیترید.



شکل ۳: نیروی اعمالی بر یک نانو ذره طلا-نقره در راستای z.

در ساختار بعدی یک نانوذره پلاسمونیکی از جنس طلا و دی اکسید تیتانیوم (Tio2) با شعاع های ۸ و ۱۰ نانومتر را به صورت هسته و پوسته در انتهای شیار قرار می دهیم. همانطور که مشاهده می‌شود، با استفاده از این ساختار نیروی نوری در حالتی که از پوشش سیلیکون نیترید استفاده شده تا ۸ برابر افزایش پیدا کرده و نکته حائز اهمیت این است که ما یک نیروی کششی بزرگ داریم که می‌تواند ذره‌ی ما را در موجبر جابجا کند.



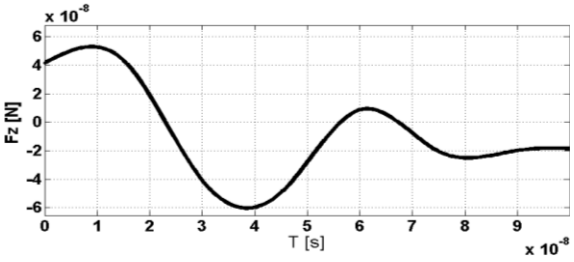
شکل ۴ : مولفه‌ی Z نیروی اعمالی بر روی نانوذره پلاسمونیکی طلا – دی اکسید تیتانیوم

برای کندن نانو ذره از انتهای شیار با توجه به اطلاعات شکل۴، ما یک موج تک رنگ را با طول موج حدودا ۶۶۳

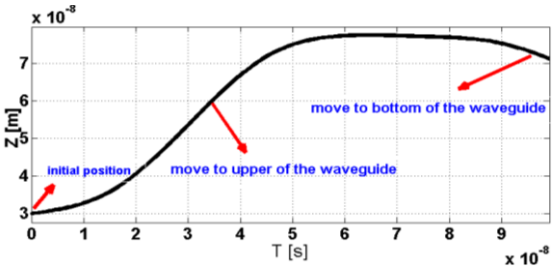
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

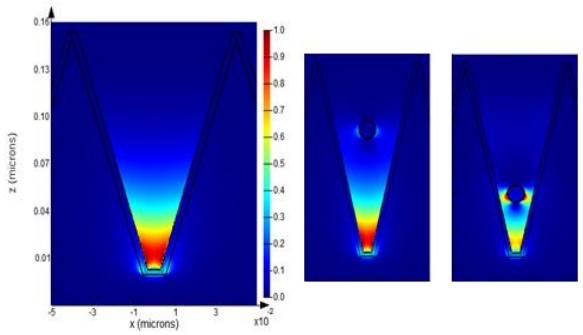
نانومتر و با همان شدت قبلی به صورت موج پیوسته(CW) به نانو ذره اعمال می کنیم. در شکل۵ نیروی نوری که در راستای z در طول موج فوق الذکر بر حسب زمان بر نانوذره وارد می شود ترسیم شده است و در شکل۶ جابجایی نانوذره را بر حسب زمان در موجبر مشاهده می کنید و شکل۷ نشان می دهد با بالا رفتن نانو ذره در ساختار و تغییر گرادیان میدان در اثر تغییر توزیع فضایی شدت میدان الکتریکی، رزونانس های مجزا برای نانو ذره در طول موج ۶۶۳ نانومتر رخ می دهد که باعث تغییر قطبش و در نهایت تغییر علامت نیروهای نوری می شود و هر چه ذره بالاتر می رود ، طبیعتا دهنه شیار بزرگتر می‌شود و گرادیان میدان تحت تاثیر منبع ورودی قرار می‌گیرد و نیروهای نوری منفی به وجود آمده ذره را به سمت پایین ساختار هل می دهند.



شکل۵: نیروی وارد بر نانوذره طلا – دی اکسید تیتانیوم در جهت Z



شکل۶:حرکت نانوذره طلا-دی اکسیدتیتانیوم که در مکان اولیه درانتهای موجبر قرار گرفته است.



شکل۷ : توزیع شدت میدان الکتریکی، در حضور و بدون حضور ذره در سطح مقطع موجبر در صفحه XZ .

۳- نتیجه‌گیری

رزونانس پلاسمونیکی هنگامی که نانو ذره در انتهای ساختار قرار دارد فقط به تغییر طول موج بستگی دارد و امکان تغییر علامت قطبش هم بسته به تغییر طول موج امکان پذیر است. اما در یک طول موج ثابت ، در اثر نیروی کششی ذره از انتهای شیار حرکت می کند و توزیع فضایی میدان الکتریکی در ساختار عوض می شود که باعث تغییر گرادیان میدان الکتریکی می شود و این موضوع سبب رزونانس های پلاسمونیکی مجزا می شود که تغییر علامت قطبش نانو ذره را به همراه دارد و به تبع آن سبب تغییر علامت نیروی نوری مولفه Z می شود.یکی از دلایل اصلی استفاده از موجبرهای پلاسمونیکی v شکل تامین نیروی کششی اولیه لازم برای کنده شدن نانو ذره ار انتهای شیار می باشد. همچنین نانوذره با پوسته دی الکتریک مانع از چسبیدن نانوذره به دیواره موجبر می شود. ما با ارائه یک موجبر از جنس طلا و یک لایه پوشش نازک سیلیکون نیترید توانستیم نیروی اعمالی بر یک نانوذره پلاسمونیکی را افزایش دهیم و با اعمال یک موج تخت تک طول موج CW نانو ذره را در ساختار جابجا کنیم.

مراجع

[1] Smith et al., "*Gap and channeled plasmons in tapered grooves:a review*", Nanoscale., Vol. 7, pp. 9355-9386, 2015.
[2] Stockman, "*Nanofocusing of Optical Energy in Tapered Plasmonic Waveguides*", Phys. Rev.Lett, Vol. 93, pp.137404, 2004.
[3] Shalin et al., "*Optical forces in plasmonic nanoantennas*", Quantum Electronics, Vol. 42, 2012.
[4] Shalin et al., "*Nano-opto-mechanical effects in plasmonic waveguides*", Laser & Photonics Reviews,Vol.8, pp.131-136, 2014.
[5] Novotny et al., *Principles of Nano-Optics. Cambridge*: Cambridge University Press, 2006.
[6] Mishchenko et al., *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
[7] Dennis M. Sullivanl., *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*. Wiley-IEEE Press, 2013.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]