



اندازه‌گیری نیروی تله لیزری نانو آنتن نوری پلاسمونیکی تحت تابش لیزر مرئی

محمد رضا محبی فر* و علی مقدسی

گروه فیزیک دانشگاه ملایر

چکیده: در این مقاله با استفاده از نانو آنتن نوری و لیزری در ناحیه مرئی بر مبنای تشدید پلاسمون سطحی موضعی، یک تله لیزری با قابلیت اعمال نیروی پیکو نیوتنی طراحی شده است. معادلات ماکسول حاکم بر سیستم به روش تفاضل محدود حوزه زمان بصورت عددی حل شده است. سپس، اثر حضور شیارهای دایره‌ای نوک این نانوآنتن را بر مقدار نیروی گرادیانی این تله لیزری مورد بررسی قرار می‌دهد و همچنین، ایجاد شیار بر نوک نانوآنتن باعث افزایش این شدت در نوک نانوآنتن می‌شود. ۵۳۳ و ۶۰۸ نانومتر رخ می‌دهد و همچنین، ایجاد شیار بر نوک نانوآنتن باعث افزایش این شدت در نوک نانوآنتن می‌شود. همچنین، نیروی وارد بر نانوذره کروی ۱۰ نانومتری در فاصله ۳ نانومتری از نوک نانوآنتن طراحی شده، برای حالت‌های بدون و با شیار به ترتیب 0.11 pN/W و 0.55 pN/W بدست آمد. یعنی نخست، نانوآنتن نوری پلاسمونیکی طراحی شده می‌تواند به عنوان تله لیزری برای نانوذرات فلزی استفاده شود. دوم، ایجاد شیار سطحی بر نوک این نانوآنتن، نیرو و در نتیجه کارایی تله لیزری را حدود ۵ برابر می‌کند.

واژگان کلیدی: تله لیزری، تشدید پلاسمون سطحی موضعی، لیزر مرئی، نانو آنتن نوری، نیرو

*mhohebifar@malayeru.ac.ir

کار را بر اساس برآیند نیروی پراکندگی نور لیزر و جاذبه انجام داد. سپس، با همین ترفند توانست سلول‌های زنده‌ای در ابعاد 0.1 تا 10 میکرومتر را با باریکه لیزر به دام بیندازد [۳ و ۴]. سرانجام با توسعه این ایده، به کمک یک نیروی گرادیانی توسط یک باریکه لیزر کانونی شده توانست یک تله سه بعدی ایجاد کند و آن را انبرک نوری نامید. انبرک نوری بر مبنای تغییر تکانه خطی نور نیروی نوری اعمال می‌کند. در واقع وقتی ذرات در نزدیکی کانون باریکه لیزر قرار می‌گیرند، نیرویی از طرف این باریکه بر آنها وارد می‌شود که دارای دو مولفه است. مولفه اول نیروی گرادیانی نوری است که در راستای گرادیان شدت میدان بوده و عامل اصلی شکل‌گیری تله لیزری است. مولفه دوم نیروی پراکندگی در جهت انتشار موج میدان است. به عبارت دیگر، از آنجا که پرتوی لیزر دارای پروفایل گوسی است و مرکز محور باریکه لیزر،

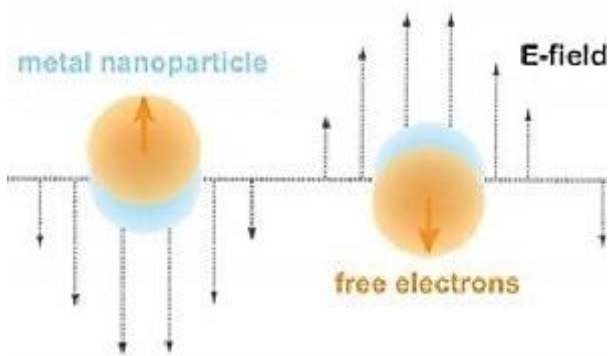
۱- مقدمه

تله‌های لیزری چیدمان‌هایی هستند که از باریکه لیزر، به منظور تولید نیروهای گرادیانی کوچکی از مرتبه چند فمتو نیوتن تا چند پیکو نیوتن برای جابجایی ذرات نانومتری و میکرومتری استفاده می‌کنند. پژوهشگران فراوانی از این قابلیت نانو فوتونیک در حوزه‌های متفاوت میکروسیالات، میکرو مکانیک، موتورهای مولکولی، و ... بهره جسته‌اند. نخستین بار آرتور اشکین در سال ۱۹۷۰ در آزمایشگاه بل نشان داد که ذرات دی الکتریک می‌توانند بوسیله فشار تابشی ناشی از موج الکترومغناطیس گیر انداخته شوند و این نخستین جرقه ایده تله لیزری بود [۱]. شانزده سال بعد، در سال ۱۹۸۶ او توانست کره‌هایی شفاف از جنس لیتکس را با استفاده از یک باریکه لیزر را در آب معلق نگه دارد [۲]. او این

نانوآنتن، اثر حضور شیارهای سطحی دایره‌ای بر نوک نانوآنتن بر مقدار نیروی گرادیانی این تله لیزری مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تئوری

نانوآنتن‌های نوری ابزار اصلی پیشرفت علم نانو فوتونیک هستند که بر مبنای تشدید پلاسمون سطحی موضعی (LSPR) کار میکنند. پلاسمون سطحی، برانگیختگی نوسانات جمعی بار در فصل مشترک فلز و دی الکتریک است. در واقع به نوسان الکترونیهای آزاد در مرز مشترک فلز-دی الکتریک، پلاسمون سطحی می‌گویند. امواج پلاسمون سطحی در مرز مشترک فلز-دی الکتریک منتشر شده و عمود بر مرز مشترک به طور نمایی میرا می‌شوند. وقتی این پلاسمون‌ها توسط یک منبع نوری با طول موج خاص (لیزر) برانگیخته شوند، تشدید پلاسمون سطحی رخ می‌دهد [۱۴-۱۶]. شکل (۱) نوسان الکترون‌های سطحی و میدان الکتریکی اطراف آنها را نشان می‌دهد [۱۵].



شکل ۱: نوسان الکترون‌های سطحی و میدان الکتریکی اطراف آنها [۱۵]

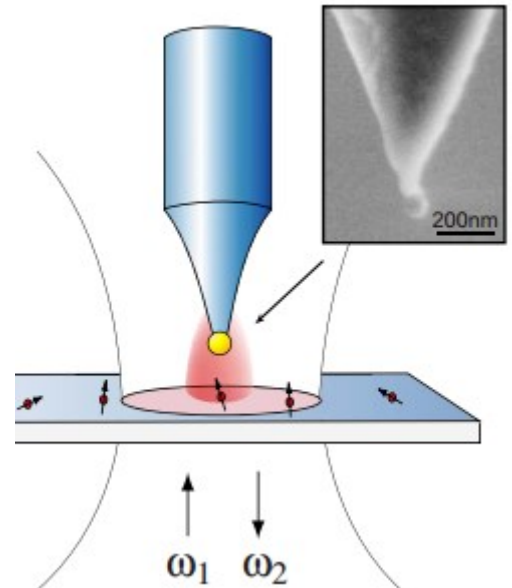
در واقع زمانی که فرکانس نوسان پلاسمون ایجاد شده با امواج الکترومغناطیسی فرودی یکسان باشد، پدیده تشدید پلاسمون سطحی موضعی اتفاق می‌افتد. این پدیده باعث می‌شود تا این وسیله قابلیت کنترل نور در ابعاد نانومتری را پیدا کند و بتواند نور را به طور موضعی تقویت نموده و دوباره جهت دهد. از آنجایی که نانو آنتن‌های نوری دارای مدهای پلاسمونیک هستند، می‌توان این مدها را به گونه‌ای تنظیم کرد که در حالت تشدید گذارهای الکترونیکی مولکولهای مجاور خود باشند. زاویه نشر نور به هندسه نانوآنتن و مد پلاسمونیک آن بستگی دارد. با تنظیم هندسه،

پر شدت ترین بخش باریکه است، ذره مورد نظر به نقطه تمرکز باریکه لیزر منحرف شده و در یک مختصات سه بعدی گیر انداخته می‌شود. به پاس پژوهشهای گسترده و کاربردی آرتور اشکین، جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۸ به او داده شد.

از سوی دیگر، با توجه به اینکه سازوکار تله‌های لیزری بدون تماس مکانیکی است. پس ابزاری موفق در تحقیقات پزشکی و بیولوژی برای جابجایی و دستکاری سلولهای میکرومتری می‌باشند. در این موارد معمولاً از لیزرهای فروسرخ نزدیک با بازه طول موجی ۷۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر به منظور جلوگیری از آسیبهای تابشی استفاده می‌شود. در این زمینه پژوهش گسترده‌ای شامل گیراندازی سلولها و باکتری‌ها [۳ و ۴]، اندازه‌گیری نیروهای تولید شده با موتورهای مولکولی مانند میوزین یا کینسین [۵]، مطالعه ویژگی‌های مکانیکی رشته‌های تک DNA [۶] از قبیل اندازه‌گیری ویژگی الاستیک آنها، گرفتن کروموزوم [۷] و برش آن به اجزای کوچکتر، اندازه‌گیری ویژگی غشاء نرونی و ... انجام شده است. پروفیسور کارل اسوآبادا استاد دانشگاه هاروارد در مقاله مروری [۸]، به تفصیل کاربردهای زیستی گیراندازهای متفاوت نوری را بیان کرده است.

نانو آنتن نوری ابزار دیگری است که می‌توان به کمک آن تله لیزری ایجاد کرد. رسالت اصلی نانو آنتن نوری تبدیل انرژی موج الکترومغناطیس فرودی به انرژی موضعی است که در آن از ویژگی منحصر بفرد نانوذرات فلزی استفاده می‌شود. نانو آنتن نوری بر اساس پدیده پلاسمونیک کار می‌کند. در پدیده پلاسمونیک، الکترون‌ها در سطح فلز بر اثر تابش نور، به گونه‌ای تحریک می‌شوند که بصورت امواج پلاسمونیک شروع به حرکت تناوبی می‌کنند. افزون بر، کاربرد نانوآنتن‌های نوری در حوزه تله‌های لیزری، آنها در زمینه‌های دیگری از قبیل میکروسکوپ نوری روبشی میدان نزدیک (NSOM) [۹]، سامانه‌های پلاسمونیک [۱۰-۱۲]، طیف‌سنجی رامان افزایش یافته نوک (TERS) [۱۳] و ... نیز بکار می‌روند. در این بررسی، با استفاده از یک نانو آنتن نوری و لیزری در ناحیه مرئی، یک تله لیزری با قابلیت اعمال نیروی نوری پیکو نیوتنی طراحی شده است. معادلات ماکسول حاکم بر سامانه به روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) و با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی لومریکال بصورت عددی حل شده است. سپس، با تابش لیزری مرئی بر این

جنس و جهت نانوآنتن، می‌توان نور را در هر جهت دلخواهی هدایت کرد. شکل (۲) نمونه‌ای از نانوآنتن نوری و تصویر SEM نمونه ساخته شده آن را نشان می‌دهد که در [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲: نمونه‌ای از نانو آنتن نوری و تصویر SEM آن [۱۷]

واژه آنتن نوری به این دلیل است که این آنتن‌ها دارای عملکردی شبیه آنتن‌های متداول است ولی به جای جمع‌آوری امواج رادیویی، نور را جمع‌آوری می‌کنند. واژه نانو هم بدلیل ابعاد نانومتری این سامانه‌ها است. از سوی دیگر با توجه به اینکه در این نانوآنتن‌های پلاسمونیک نانو ساختارهای فلزی به یکدیگر نزدیک می‌شوند، اثرات تداخلی سطوح آنها منجر به بروز طیف‌های تیزی می‌شوند که به آنها رزونانس فانو گفته می‌شود [۱۸]. هرگونه تغییر در نزدیکی نانو ساختارها مانند افزودن چند مولکول یا تغییر دما، می‌تواند بر رزونانس بسیار حساس فانو تاثیرگذار باشد. این تغییر را می‌توان رصد کرد و از آن در حسگرهای فوق حساس استفاده کرد.

۳- شبیه‌سازی و نتایج

یکی از روش‌های عددی بسیار دقیق برای شبیه‌سازی انتشار امواج الکترومغناطیس و حل معادلات ماکسول روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) است. این روش ابتدا معادله دیفرانسیل مورد نظر را به معادله تفاضل جزئی تبدیل می‌کند. پس از این عملیات، در حوزه مکان و زمان معادله‌ها گسسته شده و در یک

فرایند تکراری شدت موج در هر مکان و زمان محاسبه می‌شود. محققان از این روش برای حل مسائل متفاوتی از قبیل پراکندگی امواج الکترومغناطیس از فلزات، دی الکتریک‌ها، آنتن‌ها، پلازما‌ها، حل معادله شرودینگر و ... استفاده کرده‌اند [۱۹-۲۴]. نرم افزار لومریکال از نرم افزارهای قدرتمند شبیه‌سازی عددی در حوزه نوری، الکترونیک و فوتونیک برای حل معادلات الکتریکی و مغناطیسی است که در سال ۲۰۰۳ به جامعه علمی معرفی شد. این بسته نرم افزاری در چهار بخش متفاوت به نام‌های FDTD Solutions, Mode Solution, Device و Interconnect قادر به حل مسایل فوتونیک متفاوتی است. بخش FDTD Solutions این نرم افزار، با حل سه بعدی معادلات ماکسول با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD)، به تحلیل و بررسی ادوات متفاوت فوتونیک در بازه‌های متفاوت طول موجی می‌پردازد.

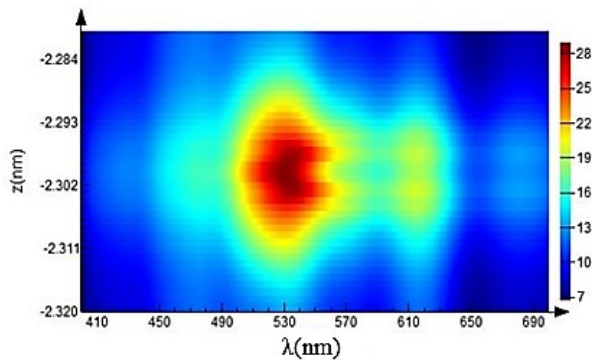
مطالعات متفاوتی در مورد افزایش میدان الکتریکی در اطراف نانوآنتن‌های نوری نوک مخروطی شده است [۲۵-۲۷]. به این منظور می‌بایست نوک این نانوآنتن مخروطی در راستای محور آن تحت تابش باریکه لیزر قرار گیرد. بردارهای میدان الکتریکی \vec{E} و دو قطبی \vec{P}_p مربوط به یک نانو ذره که تحت تابش میدان الکتریکی \vec{E}_0 قرار گیرد به صورت روابط (۱) و (۲) در می‌آید که در [۱۷] به تفصیل آمده است.

$$\vec{E} = \left\{ \vec{I} + \frac{k^2}{\epsilon_0} \alpha(\omega) \vec{G}(r_0, r_p, \omega) \right\} \vec{E}_0 \quad (1)$$

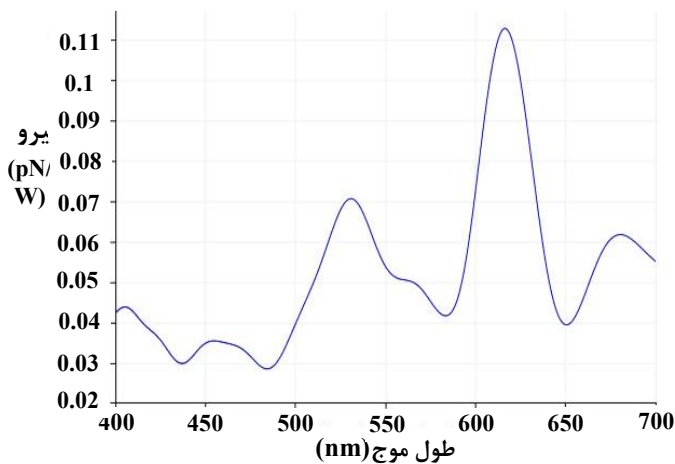
$$\vec{P}_p = \frac{k^2}{\epsilon_0} \alpha_p(\omega) \vec{G}(r_p, r_0, \omega) \vec{E}_0 \quad (2)$$

که در این رابطه α قطبش پذیری، \vec{I} شدت تابش فرودی، ϵ_0 ثابت گذردهی خلا، \vec{G} تابع گرین فضای آزاد و ω فرکانس می‌باشد. از سوی دیگر عدد موج مربوط به پلاریتون‌های پلاسمون سطحی ای که با باریکه لیزر تحریک شده‌اند در نوک مخروطی شیاردار آن، به صورت رابطه (۳) است [۲۸].

نشان داده شده است. همانطور که گفته شد، عامل اصلی تله لیزری فراهم کردن نیرو (ناشی از گرادیان شدت میدان) است. شکل (۵) محاسبات نیرویی که نانواُنتن نوری بدون شیار بر نانوذره کروی همسانگردی به شعاع ۱۰ نانومتر وارد می کند را نشان می دهد. فاصله بین نوک نانواُنتن با این نانوذره ۳ نانومتر در نظر گرفته شده است.



شکل (۴) توزیع شدت میدان الکتریکی در اطراف نانواُنتن مخروطی شکل بدون شیار بر حسب طول موج



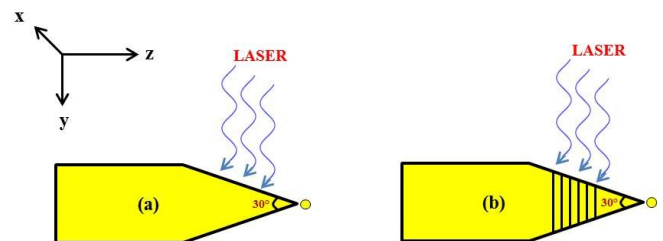
شکل (۵) نیروی وارد بر نانو ذره کروی در فاصله ۳ نانومتری از نوک نانواُنتن بدون شیار بر حسب طول موج

در مرحله بعدی، با ایجاد شیارهای دواری به صورت تناوبی در نوک مخروطی این نانواُنتن شبیه‌سازی ها انجام شد. نوک مخروط ۳۰ درجه، دوره تناوب این شیارها ۲۰۰ نانومتر، عمق شیارها ۳۰ نانومتر، و فاصله آخرین شیار از نوک نانواُنتن ۱ میکرو متر در نظر گرفته شد. این مقادیر با استفاده از بهینه سازی های انجام شده در تحقیقات عددی و آزمایشگاهی مربوط به ساخت نانواُنتن نوری انتخاب شده است [۱۰، ۱۳، ۱۷، ۲۷ و ۲۸]. نتایج

$$k = \frac{1}{\gamma} \{2\pi m + \gamma k_0 \sin(\varphi) \varepsilon_d^{1/2}\} = \left(\frac{k_0^2 \varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d} \right)^{1/2} \quad (3)$$

در این رابطه ε_m گذردهی فلز، ε_d گذردهی دی الکتریک، φ زاویه فرود باریکه لیزر، γ فاکتور میرایی و k_0 عدد موج باریکه لیزر فرودی است که با رابطه $2\pi/\lambda_{\text{Laser}}$ به طول موج لیزر مرتبط می شود.

در این مقاله یک نانوسیم با نوک مخروطی با هندسه و ابعاد خاصی را به عنوان نانواُنتن نوری پیشنهاد داده ایم. دو حالت را برای این نانو آنتن نوری در نظر گرفته، شبیه سازی ها را برای این دو حالت انجام داده و نهایتاً نتایج محاسبات آنها را با هم مقایسه کرده ایم. حالت اول با وجود شیارهای دایره ای در نوک مخروطی نانو آنتن و حالت دوم بدون چنین شیارهایی. شکل (۳) طرحواره این دو حالت را نشان می دهد.



شکل ۳: طرحواره ای از نانو آنتن نوری با نوک مخروطی تحت تابش باریکه لیزر در دو وضعیت (a) بدون شیار و (b) با شیار

ابتدا شبیه سازی ها برای یک نانو آنتن نوری از جنس طلا با نوک مخروطی و با زاویه ۳۰ درجه انجام شد. همچنین فرض کردیم لیزری در ناحیه مرئی (۴۰۰-۷۰۰ نانومتر) و به صورت ۹۰ درجه بر نوک این مخروط فرود آید. برای این شرایط ذکر شده، گیراندازی لیزری نانوذره کروی در ناحیه میدان نزدیک (Near field) نوک این نانواُنتن مورد بررسی قرار گرفت. این چیدمان بر مبنای پدیده تشدید پلاسمون سطحی موضعی، منجر به وارد کردن نیروی نوری به نانوذرات و در نتیجه گیراندازی آنها می گردد. از این رو، از این چیدمان می توان به عنوان تله لیزری استفاده کرد.

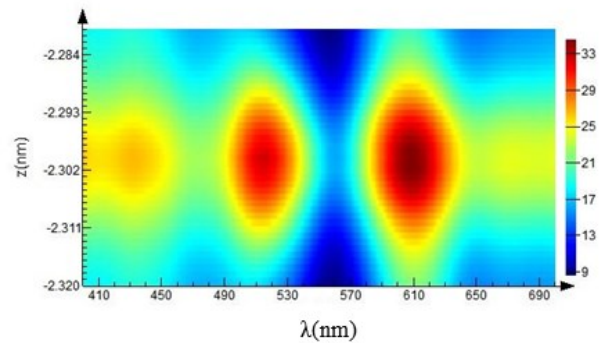
شکل (۴) نمودار توزیع شدت میدان الکتریکی در اطراف نوک مخروطی نانو آنتن طلا برای حالت بدون شیار، بر حسب محور Z

همچنین، ایجاد شیار بر نوک نانو آنتن منجر به افزایش اندازه شدت میدان الکتریکی شده است. همچنین، نیروی وارد بر نانوذره کروی ۱۰ نانومتری که در فاصله ۳ نانومتری از نوک نانوآنتن قرار دارد، برای حالت نانوآنتن بدون شیار 0.11 pN/W و برای حالت با شیار برابر با 0.55 pN/W است. یعنی ایجاد شیار سطحی بر نوک مخروطی نانوآنتن، نیروی و در نتیجه کارایی تله لیزری پلاسمونیک را حدود ۵ برابر می کند. در واقع از آنجایی که فرکانس پلاسمون سطحی موضعی فلز طلا در ناحیه مرئی است، تابش لیزری در این ناحیه طیفی منجر به ایجاد تشدید در فرکانس پلاسمون سطحی در ناحیه میدان نزدیک شده است. نهایتاً مقدار بالای گرادیان میدان امواج محو شونده منجر به ایجاد یک نیروی نوری در ناحیه میدان نزدیک نوک نانو آنتن می شود. حضور شیارهای دوار با مشخصات یاد شده در نوک مخروطی این نانو آنتن باعث افزایش گرادیان میدان شده و در نتیجه افزایش حدود ۵ برابری نیروی نوری را در بر دارد.

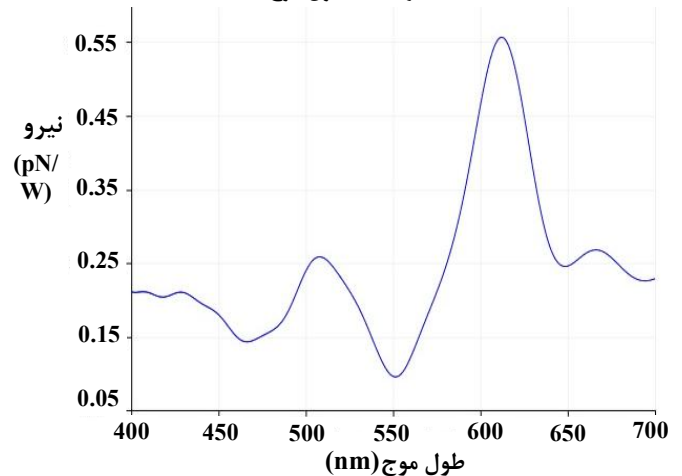
۴- نتیجه گیری

چیدمانی متشکل از نانوآنتن نوری با نوک مخروطی و یک لیزر مرئی به منظور استفاده به عنوان تله لیزری طراحی شد. حل معادلات ماکسول مربوط به نانو آنتن شیاردار با نوک مخروطی ۳۰ درجه ای، دوره تناوب شیار ۲۰۰ نانومتری و با عمق ۳۰ نانومتر به روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) نشان داد ایجاد شیار بر نوک نانوآنتن باعث افزایش شدت میدان الکتریکی در ناحیه میدان نزدیک این نانو آنتن می گردد. ایجاد شیار بر نانو آنتن منجر به شیفت طول موجی بیشینه شدت میدان الکتریکی از ۵۳۳ به ۶۰۸ نانومتر منجر می شود. در نهایت، نیروی وارد بر نانوذره کروی ۱۰ نانومتری در فاصله ۳ نانومتری از نوک نانوآنتن طراحی شده، برای حالت های بدون و با شیار به ترتیب 0.11 pN/W و 0.55 pN/W بدست آمد. یعنی این نانوآنتن نوری پلاسمونیک طراحی شده می تواند به عنوان تله لیزری برای نانوذرات فلزی استفاده شود. همچنین، ایجاد شیار سطحی بر نوک این نانوآنتن، نیروی نوری و در نتیجه کارایی تله لیزری را حدود ۵ برابر می کند.

حاصل از توزیع شدت میدان الکتریکی در نزدیکی نانو آنتن شیاردار مورد نظر در طول موجهای متفاوت و در راستای محور Z در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین، با محاسبه نیرو برای هندسه ذکر شده و با فرض تابش عمودی لیزری در ناحیه مرئی بر نوک شیاردار نانو آنتن، گیراندازی لیزری نانو ذره کروی ۱۰ نانومتری در فاصله ۳ نانومتری از نوک این نانو آنتن مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۷) نمودار این نیرو را بر حسب طول موج نشان می دهد.



شکل (۶) توزیع شدت میدان الکتریکی در اطراف نانوآنتن مخروطی شکل با شیار بر حسب طول موج



شکل (۷) نیروی وارد بر نانو ذره کروی در فاصله ۳ نانومتری از نوک نانوآنتن با شیار بر حسب طول موج

همانطور که از نتایج شبیه سازی (شکل های (۴) تا (۷)) مشخص است، برای حالت نانوآنتن بدون شیار، بیشینه شدت مربوط به طول موج ۵۳۳ نانومتر است در حالی که، در حالت با شیار بیشینه شدت در طول موج ۶۰۸ نانومتر بدست آمده است. دلیل این شیفت طول موجی برانگیختگی پلاسمون های سطحی است.

- [11]. P. Matthew, J. Aizpurua, G. Bryant, "Metal-nanoparticle plasmonics", *Laser & Photonics Reviews*, 2, 136-159, 2008.
- [12]. J.N. Farahani, D.W. Pohl, H.J. Eisler, B. Hecht, "Single quantum dot coupled to a scanning optical antenna: a tunable superemitter", *Physical Review Letters*, 95, 82-90, 2005.
- [13]. I. Maouli, A. Taguchi, Y. Saito, S.Kawata, and P. Verma, "Optical antennas for tunable enhancement in tip-enhanced Raman spectroscopy imaging", *Applied Physics Express*, 8, 032401, 2015.
- [14]. S. Zeng; Baillargeat, Dominique; Ho, Ho-Pui; Yong, Ken-Tye, "Nanomaterials enhanced surface plasmon resonance for biological and chemical sensing applications". *Chemical Society Reviews*. 43 (10), 3426–3452, 2014.
- [15]. D. Sevenler, N. Lortlar Ünlü, and M. Selim Ünlü, "Nanobiosensors and Nanobioanalyses". Chapter 5, 85–88, 2015.
- [16]. D. Guan Xiang; M. Tetsuji; S. Michiaki; Saito, Shin; Fukuda, Hiroaki; Takahashi, Migaku. "Evidence of localized surface plasmon enhanced magneto-optical effect in nanodisk array". *Appl. Phys. Lett.* 96 (8): 081915, 2010.
- [17]. L. Novotny, P. Bharadwaj, Deutsch B "Optical antennas". *Adv Opt Photon* 1(3):438–483, 2009.
- [18]. D. Vittorini-Orgeas,; A. Bianconi, , "From Majorana Theory of Atomic Autoionization to Feshbach Resonances in High Temperature Superconductors". *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. Springer Science and Business Media LLC. 22 (3): 215–221, 2009.
- [1]. A. Ashkin, "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 24, 156-159, 1970.
- [2]. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu, "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles", *Opt. Lett.* 11, 288-290, 1986.
- [3]. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, T. Yamane, "Optical Trapping and Manipulation of Single Cells Using Infrared Laser Beams", *Nature* 330, 769-771, 1987.
- [4]. A. Ashkin, J.M. Dziedzic, "Optical Trapping and Manipulation of Viruses and Bacteria", *Science* 235,1517-1520, 1987.
- [5]. S.C. Kuo, M.P. Sheetz: Force of single kinesin molecules measured with optical tweezers, *Science* 260:232-234,1993.
- [6]. S. Chu: Laser Manipulation of Atoms and Particles, *Science* 253:861-866,1991.
- [7]. H. Liang, W.H. Wright, W. He, M.W. Berns, "Micromanipulation of mitotic chromosomes in PTK-2 cells using laser-induced optical forces ("optical tweezers")", *Exp. Cell Res.* 197, 1 -35, 1991.
- [8]. K. Svoboda, S. M. Block: "Biological applications of optical forces", *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.* 23, 147-285, 1994.
- [9]. A. Höppener, R. Beams, L. Novotny, "Background suppression in near-field optical imaging", *Nano letters*, 1, 903-908, 2009.
- [10]. M. Zohrabi, M. R. Mohebbifar, "Electric field enhancement around gold tip optical antenna", *Plasmonics*, 10, 887–892, 2015.

- [27]. M. Zohrabi, M.R. Mohebbifar, “Influence of Grating Parameters on the Field Enhancement of an Optical Antenna under Laser Irradiation”, *Journal of Optoelectrical Nanostructures*. 4, 65-80, 2019.
- [28]. S.S Kharintsev, G.G. Hoffmann, A.I. Fishman and M. Kh. Salakhov, “Plasmonic optical antenna design for performing tip-enhanced Raman spectroscopy and microscopy”, *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, 145501, 2013.
- [19]. R.M.S. De Oliveira, “CLSS Computational Environment for Simulating Lightning Strokes in a Power Substation by Finite-Difference Time-Domain Method”, *IEEE Trans Electromagn Compat* 51(4):995–1000, 2009.
- [20]. B. Chaudhury, J.P. Boeuf, “Computational Studies of Filamentary Pattern Formation in a High Power Microwave Breakdown Generated Air Plasma”. *IEEE Trans Plasma Sci* 38(9): 2281–2288, 2010.
- [21]. F. Moxley, T. Byrnes, F. Fujiwara, “A generalized finite-difference time-domain quantum method for the N-body interacting Hamiltonian”. *Comput Phys Commun* 183(11):2434–2440, 2012.
- [22]. F. Moxley, D.T Chuss, W. Dai, “ A generalized finite-difference time-domain scheme for solving nonlinear Schrödinger equations”. *Comput Phys Commun* 184(8):1834–1841, 2013.
- [23]. Siriwitpreecha A, Rattanadecho P, Wessapan T, “The influence of wave propagation mode on specific absorption rate and heat transfer in human body exposed to electromagnetic wave”. *Int J Heat Mass Transfer* 65:423–434, 2013.
- [24]. Y. Okazaki, K. Suzuki, Y. Enomoto, “Superconducting microstrip resonator investigated by FDTD electromagnetic field simulator”. *IEEE Trans Appl Supercond* 9((2):3034–3037, 1999.
- [25]. J.M. Gerton, L.A Wade, G.A Lessard, Z. Ma, Quake SR, “Tip enhanced fluorescence microscopy at 10 nanometer resolution”, *Phys Rev Lett* 93(18):180801, 2004.
- [26]. Y.C. Martin, H.F. Hamann, Wickramasinghe HKT “Strength of the electric field in apertureless near-field optical microscopy”, *J Appl Phys* 89:5774–5778, 2001.



Measurement of plasmonic laser trap force under visible laser radiation

M. Mohebifar*, A. Moghadasi

Department of Physics, Malayer University

Abstract:

In this paper, a laser trap with the ability to generate pico-Newtonian force is designed using optical nano-antenna and visible-range laser based on localized surface plasmon resonance (LSPR). The Maxwell equations of this system are solved numerically by the time domain finite difference (FDTD) method. Then, we investigate the effect of circular surface grooves at the tip of this nano-antenna on the gradient force of this laser trap. The simulation results showed that the maximum of electric field intensity for the non-grooved and grooved nano-antenna occurred at the wavelengths of 533 and 608 nm, respectively, and also the groove on the tip of nano-antenna increases electric field intensity. Also, the force applied to the 10 nm spherical nanoparticles at 3 nm from the nano-antenna tip was obtained 0.11 pN/W and 0.55 pN/W, respectively. That is, firstly, this plasmonic optical nano-antenna can be used as a laser trap for metallic nanoparticles. Secondly, creating a surface groove on the tip of this nano-antenna increases the force and consequently efficiency of the laser trap about 5 times.

Keywords: Laser trap, Localized surface plasmon resonance, Visible-range laser, Optical nano-antenna, Force