

زمینه محاسبات آنتن نوری

میکروسکوپ نوری نزدیک میدان مبتنی بر آنتن و طیف‌سنجی از زمینه نوری افزایش یافته به صورت محلی برای ایجاد نزدیکی نانوساختارهای فلزی-لیزر به عنوان prob محلی استفاده می‌کند. با استفاده از شبیه‌سازی سه بُعدی بر اساس روش عنصر محدود، به مطالعه میدان‌های الکترومغناطیسی نزدیک آنتن مختلف نوری می‌پردازیم و توپولوژی آن را به منظور استخراج یک بهبود قوی در یک محدوده فرکانس انتخاب‌شده، بهینه‌سازی می‌کنیم. نتایج ما دستورالعمل روشنی برای ساخت کارآمد ساختار آنتن و برای بهبود حساسیت طرح میکروسکوپ نزدیک میدان ارائه می‌کند.

کلمات کلیدی: آنتن نوری، میکروسکوپ نوری نزدیک میدان، طیف‌سنجی با سطح پیشرفته، پلاسمونیک، نانو ذرات، Nanorods.

1. معرفی

آنتن‌ها قطعاتی برای دریافت و انتقال امواج الکترومغناطیسی هستند. در حالی که آنتن‌ها دستگاه‌های اولیه در برنامه‌های کاربردی فرکانس رادیویی برای مدت طولانی هستند، مفهوم آنتن نوری نسبتاً جدید است. به طور یکسان، آنتن‌های نوری اجزای طراحی شده برای انتقال سیگنال‌های بهینه‌ی نوری هستند. محدوده‌ی کاربرد سیگنال جایی است که در آن آنتن نوری به احتمال زیاد به عنوان امواج رادیویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیش از این یک منطقه کاربردی ایجاد شده برای آنتن نوری، میکروسکوپ نوری نزدیک میدان و طیف‌سنجی است. بنابراین آنتن به طور موثر انرژی یک موج الکترومغناطیسی را به انرژی موضعی تبدیل می‌کند. مفهوم آنتن نه تنها برای افزایش قدرت سیگنال و حل دوباره‌ی آن استفاده شده است بلکه برای نفوذ نرخ واپاشی تابش‌مولکول‌ها نیز استفاده شده است. در مرور اجمالی میکروسکوپ

نوری نزدیک میدان (SNOM)، آنتن‌های نوری اغلب شامل نوک برش فلز هستند، که توسط یک پرتو لیزی مشخص می‌شوند. نوک به انرژی پرتو لیزر ورودی متمرکز شده است درحالی‌که نور به یک منطقه بسیار موضعی که ابعاد آن اساساً توسط هوشیاری از نوک (در حال حاضر پایین تر از 10 نانومتر) تعریف شده است تمرکز دارد. سپس اثرات فیزیکی چند برابر می‌شود و اغلب تعیین آن سخت است: اثرات ثابت مانند اثر رعدوبرق و همچنین اثرات پویا مانند سطح پلاسمون پلاریتون (SPP). برای مثال، با توجه به اثر رعدوبرق، هر هندسه تیز باید به عملکرد بالایی در الکتروسیسته دست یابد، اما در عمل تنها نیمی از راهنمایی‌ها افزایش خوب میدان الکتریکی را نشان می‌دهد حتی اگر آن‌ها به همان اندازه تند باشند. به‌علاوه، افزایش زمینه بستگی به محیط محلی، در شکل نوک و همچنین در آزمایش (شرایط نور) دارد. اخیراً تنها آزمایش‌های فلورسانس مولکول این چالش‌ها را نشان داده‌اند: راهنمایی‌های طلایی برای افزایش فلورسانس ضعیف به دلیل اثر غالب رفع فلورسانس در فواصل کوتاه یافت شده است. یک آنتن نوری خوب قادر به افزایش یک میدان محلی قوی و انرژی پراکندگی پایین است. اخیراً، آنتن نوری خوب برای کاربردهای فلورسانس توسط ذرات کلوئیدی طلا متصل به الیاف شیشه ارائه شده است. اما محلی‌سازی و توان افزایش زمینه در حد متوسط است. Anger و همکارانش وابستگی کل فلورسانس را در بررسی فاصله‌ی مولکول اندازه‌گیری کردند. همان‌گونه که مولکول فاصله کاهش می‌یابد، ابتدا نرخ فلورسانس با توجه به افزایش تأثیر زمینه افزایش می‌یابد و پس از آن، در فواصل کوچک‌تر از 5 نانومتر، قطره‌ها به دلیل انرژی غیرتابشی به ذره انتقال می‌یابند. برای بهبود افزایش میدان، spheroids یا Nanorods می‌تواند استفاده شود. همان‌گونه که بعداً نشان خواهیم داد، nanorod مانند آنتن دو قطبی شناخته شده از تئوری آنتن کلاسیک عمل می‌کند. باین‌حال، در فرکانسهای نوری، خواص فلزات تفاوت قابل توجهی با رفتار آن‌ها در امواج رادیو یا مایکرو پیدا می‌کند. علاوه بر تشخیص با واکنش‌های آنی به حرکت میدان خارجی الکترون‌ها در فلز مانند یک پلاسما محدود توسط توپولوژی خاصی رفتار می‌کند. در نتیجه، رزونانس یک آنتن نوری ساخته شده از فلزات واقعی، انتقال سریع با توجه به تشدید یک فلز کامل دارد. Muhlschlegal و همکارانش تشدید طلا دو قطبی در آنتن‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. طول آنتن در رزونانس به گونه چشمگیری کمتر از نیمی از تحریک طول موج است. میدان قوی را می‌توان در فاصله آنتن دو قطبی یافت. ساختار آنتن مشابه آنتن bow-tie

است، که اخیراً توسط Schuck همکارانش مورد مطالعه قرار گرفته است. لبه‌های تیز منجر به نور بهتر در مرکز ساختار می‌شود. ساختار مشابه با یک لیزر دیود تجاری توسط Cubukcu و همکارانش یکپارچه شده است. اگرچه برای SNOM یک آنتن مورد نیاز است، که در آن حداکثر میدان الکتریکی در راس یک پروب نوری واقع شده باشد. با استفاده از این محدودیت، استراتژی‌های مختلف برای رسیدن به یک میدان قوی محلی را بررسی می‌کنیم. همه‌ی شبیه‌سازی‌ها و نتایج ارائه‌شده در این مقاله با استفاده از COMSOL چند فیزیکی، یک ابزار بر اساس روش المان محدود (FEM)، انجام شده است.

2. نانو ذرات طلا

به دلیل توپولوژی ساده‌ی آن، یک ذره فلز یک نمونه آنت ساده است. راه‌حل تحلیل شناخته شده است و مقایسه کمی با داده‌ها مستقیماً تجربی است. پراکندگی نور توسط یک دی الکتریک برای اولین بار توسط Mie تحلیل شد. برای ذرات کوچک (در حد شبه استاتیک)، در توزیع میدان خارجی برق را می‌توان با میدان‌های دو قطبی واقع در مرکز توصیف کرد. میدان الکتریکی کل می‌تواند به عنوان یک برهم‌نهی میدان حاصل و میدان پراکنده با استفاده از تخمین دو قطبی باشد.

$$E_{\text{tot}} = E_0 + \frac{\omega^2 e^{-ika}}{k^2} \varepsilon_0 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} E_0 \quad (1)$$

که در آن ε پیچیدگی مجاز است. برای تمام محاسبات ε از Johnson و Christy گرفته شده است. به دلیل وجود یک راه‌حل تحلیلی برای این مشکل، سیستم کاملاً برای اعتبار عددی روش مورد استفاده در این مطالعه مناسب است. بنابراین درمی‌یابیم که نتایج عددی FEM در شرایط تقریباً کامل با راه‌حل تحلیلی (1) است و از این رو کد FEM می‌تواند با قابلیت اعتماد به ساختار آنتن پیچیده‌تر اعمال شود. برای تحریک طول موج برابر با 650 نانومتر حداکثر شدت افزایش در سطح کره 12.5 است.

در مرحله بعد کره‌ی دومی را در فاصله‌ی اولین متغیر معرفی کردیم. در مقایسه با افزایش میدان یک کره تک، پیشرفت بسیار قوی در فاصله بین دو حوزه ایجاد شده است. علاوه بر این، تغییرات رزونانس متمایل به سرخ است. ما هر دو حوزه

را جدای از هم بررسی کردیم. همانگونه که در شکل 1 نشان داده شده است یک تفاوت مهم بین این دو مورد وجود دارد: یک دو قطبی در ساختارهای متصل وجود دارد، در حالی که در مورد دوم، یک دو قطبی در هر کره وجود دارد. دو قطبی القا شده از دو حوزه‌ی جدا از هم باهم تعامل می‌کنند و چون نشانه‌های مختلف در سطح نزدیکترین حوزه وجود دارد تراکم بار متقابل سطح بالا است. بازده ازدحام خطوط میدان الکتریکی بین دو حوزه بالاست و از این رو افزایش میدان در فاصله نزدیک حوزه‌ها بسیار قوی می‌شود.

برای موارد دیگر از دو کره‌ی به هم پیوسته یک دو قطبی در کل ساختار القا می‌شود. در نتیجه طول موج رزونانس در مقایسه با دو مورد بسیار طولانی است. جالب توجه است که، یک یکتایی در توزیع میدان الکتریکی را می‌توان در لبه‌های دنداندار یافت، که منجر به یک ناپیوستگی چگالی بار سطحی می‌شود و از این رو میدان بسیار بالا است. با انتخاب اندازه میدان مختلف، عدم تقارن را می‌توان معرفی کرد و جابجایی توزیع میدان الکتریکی به سمت میدان‌های کوچک‌تر پدیدار می‌شود. اگر نسبت بالایی از شعاع منجر به پیشرفت میدان الکتریکی به دو انتهای کره شود، حداکثر شدت میدان تمایل به اختلاف اندازه بین افزایش میدان دارد. فاصله همپوشانی تحت تأثیر میدان الکتریکی کل قرار می‌گیرد. با تغییر شعاع و فاصله همپوشانی، طول کل تغییر می‌یابد و از این رو تغییرات طول موج رزونانس رنگ آبی متمایل می‌شود. اگرچه طول موج رزونانس نیز بستگی به پارامترهای دیگر، مانند شعاع کره و همپوشانی از راه دور دارد.

3. آنتن خود مشابه

با تعمیم آنتن دو میدان نامتقارن به میدان‌های متعدد ما می‌توانیم به یک آنتن خود مشابه برسیم، Li و همکاران. در حال حاضر یک آرایش خود مشابه از میدان برای افزایش و بومی‌سازی میدان نوری پیشنهاد کرده‌اند. آنتن خود مشابه را می‌توان با توجه به رابطه‌ی زیر ساخت:

$$r_1 = \kappa r_0 \quad (2)$$

$$d_1 = \kappa d_0 \quad (3)$$

که در آن k ثابت پوسته پوسته شدن و r_1 و r_0 شعاع دو کره مجاور هستند. طراحی Li و همکارانش از یک پارامتر هم پوشانی مثبت d استفاده می کند، درحالی که در طراحی ما پارامتر d منفی است. اثر ضرب را می توان برای لنز خود مشابه نیز مشاهده کرد: هر یک از میدان ها توسط میدان مجاور خود تحت تأثیر قرار می گیرد. برای تقریب اول، نفوذ میدان های کوچک تر بر روی کره بزرگ تر بعدی را می توان نادیده گرفت (k کوچک تر، تقریب بهتری است). میدان الکتریکی برای میدان کوچک مجموع میدان های موج الکترومغناطیسی است.

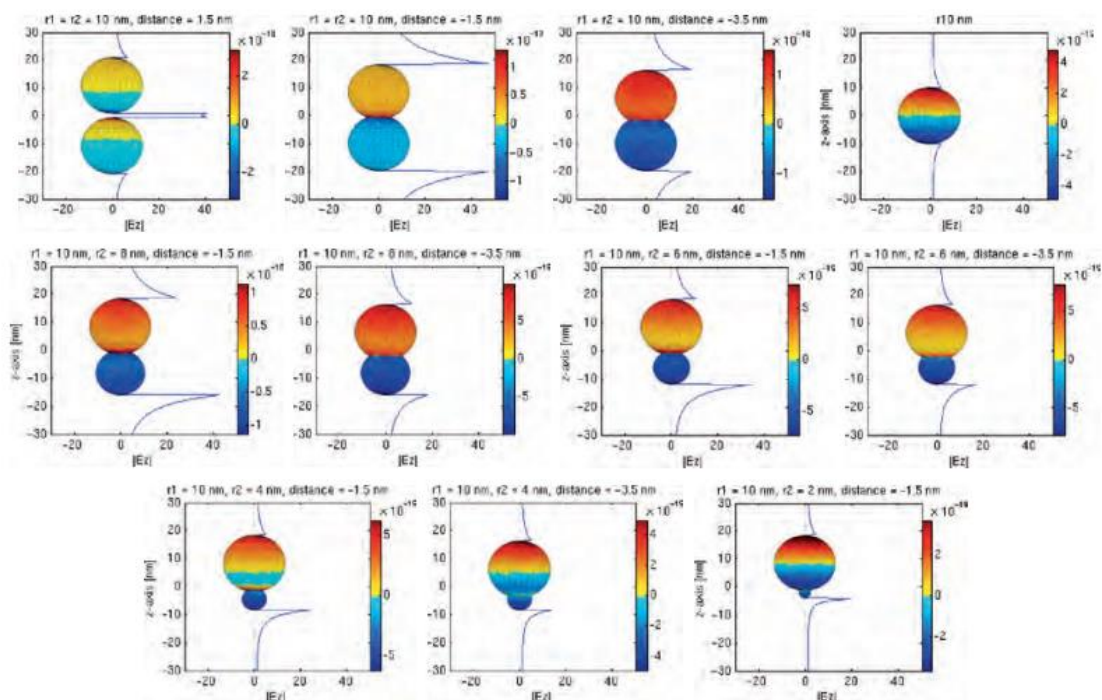


Fig. 1. Surface charge density and the field distribution along the symmetry axis are depicted for various arrangements of two spheres excited at resonance. The overlap distance increases from left to right and the radius of the second sphere is decreased from the top to the bottom.

اگر چه این تصویر ساده محدودیت های آشکاری دارد: نمونه شدت میدان برابری را در هر دو پایان از کوچک ترین و میدان قبلی پیش بینی می کند، اما محاسبات نشان می دهد که میدان قوی درست در فاصله بین کوچک ترین و متمرکز میدان بزرگ تر بعدی است.

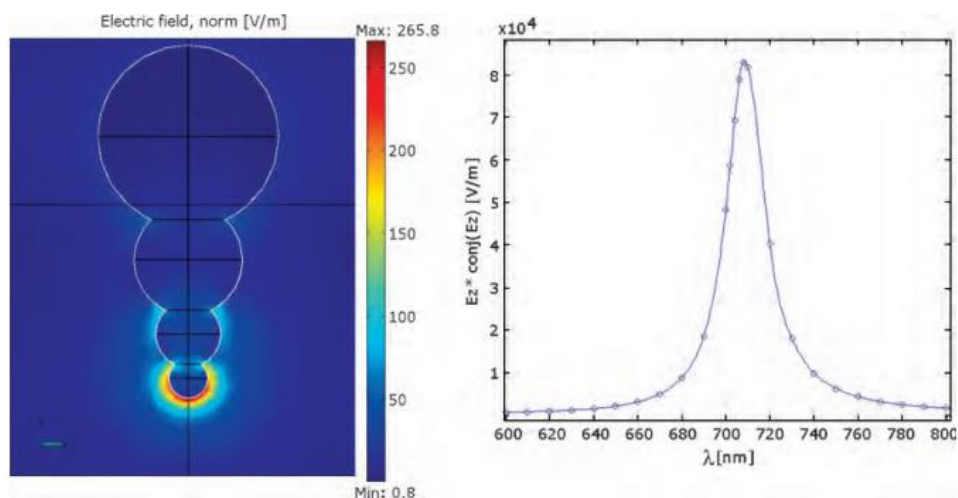


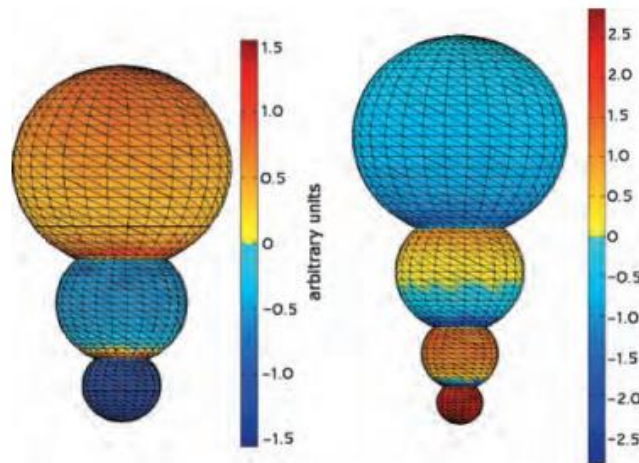
Fig. 2. Left: the field strength ($|E|$) is plotted for the resonance condition $\lambda = 708$ nm for a self-similar antenna based on four gold spheres ($r_0 = 10$ nm, $d_0 = 1.5$ nm, $\kappa = 0.7$). Right: the maximum field enhancement (at the surface of the smallest sphere on the z -axis) is plotted versus the excitation wavelength for the self-similar antenna depicted on the left.

شکل 2 توزیع میدان خود مشابه آنتن ساخته شده از سه کره (D منفی) را نشان می‌دهد. بنابراین بالاترین میدان الکتریکی را می‌توان در راس یک شرط کلیدی برای تصویربرداری میدان نوری نزدیک یافت. دیدگاه دیگری توسط تراکم بار سطحی در شکل 3 برای دو آنتن خود مشابه ارائه شده است. حوزه خارجی صرفاً دارای شارژ مثبت یا منفی خواهد بود. بنابراین، رفتار کلی دو قطبی از خود نشان خواهد داد. مجدداً، لبه مقعر تیز موجب گسستگی توزیع بار سطحی و جدایی صفحات از هم می‌گردد.

به دلیل اثر میله رعد و برق، به نظر می‌رسد که بالاترین پیشرفت در کوچک‌ترین شعاع به دست آمده است. با این حال، برای یک کره با اندازه نسبتاً بزرگ، داشتن جفت بسیار حائز اهمیت است (شکل 1). ما بهترین رفتار را در حالت 0.7 یافتیم. بنابراین، حوزه فرضی ما از بزرگ‌ترین به کوچک‌ترین کره است.

12 Hafner et al و 13 Esteban et al، یک آنتن نوری به شکل یک ذره مخروطی ارائه نمودند که در شکل 4 نشان داده شده است. این آنتن مشابه با آنتن نشان داده شده در شکل 2 هست که فقط شکاف‌های آن برداشته شده است. ما دو آنتن و حداکثر افزایش میدان الکتریکی را تا 135 برای آنتن مخروطی و 270-1180 برای آنتن خود مشابه در نظر گرفته‌ایم. ظاهراً به وسیله افزودن شکاف به آنتن مخروطی بتوان میزان شدت الکتریکی را افزایش داد، اما این مورد برای موجب هزینه‌های اضافی می‌گردد (به متن بالا مراجعه کنید). این آنتن‌ها دارای شکاف‌های منحصر به فردی هستند. این شکاف‌ها نیز برای به دست آوردن ارزشی مطلق و قابلیت اعتماد بالا می‌باشند. وضوح تصاویر در

میدان‌های به دست آمده در طی آزمایش‌ها بسیار بالا بود. ما ساختار ابزارهای نرم‌افزاری را با روش‌های مختلف بررسی کرده و نقاط نفوذ را به آسانی کشف کردیم. روش‌های مختلفی برای انجام این کار وجود دارند که درعین حال که دشوار هستند، برای تعیین دقیق افزایش زمینه کارایی فراوانی دارند.



شکل 3. نقاط سطح تراکمی نشانگر رفتار کلی آنتن خود مشابه دو قطبی هستند. دو قطب دیگر معکوس همدیگر هستند و توسط شکافی از هم جدا شده‌اند. توجه داشته باشید که سطح تراکم بر روی بیضی توزیع نشده است و بیضی کوچک‌تر دارای میدان الکتریکی بالایی در راس آنتن است.

برای آنتن‌هایی که در شکل 2 نشان داده شده است، طول موج رزونانس برابر است با $RES=708$ نانومتر. در حالی که طول موج رزونانس ذرات مخروطی آنتن دارای مقدار بیشتری هستند. در حدود $RES=610$ نانومتر. طول موج رزونانس دارای قابلیت طولانی مدت است که ذرات مخروطی را می‌توان به راحتی در آن نمایش داد. رزونانس دیگر، طول موج آنتن خود مشابه برای ایجاد شکاف بین مسیر از بالا تا پایین است (apex). تقسیم عددی بر ضرب مرتبه بالا تأثیر جزئی در شرایط تشدید و انتقال رزونانس دارد.

Alluding با اشاره به Boyd et al 14، فاکتور تقویت محلی L را به عنوان محصولی شبیه به LQS و $LSPPRR$ ارائه کردند:

$$L = L_{LR}L_{QS}L_{SPPR} \quad (4)$$

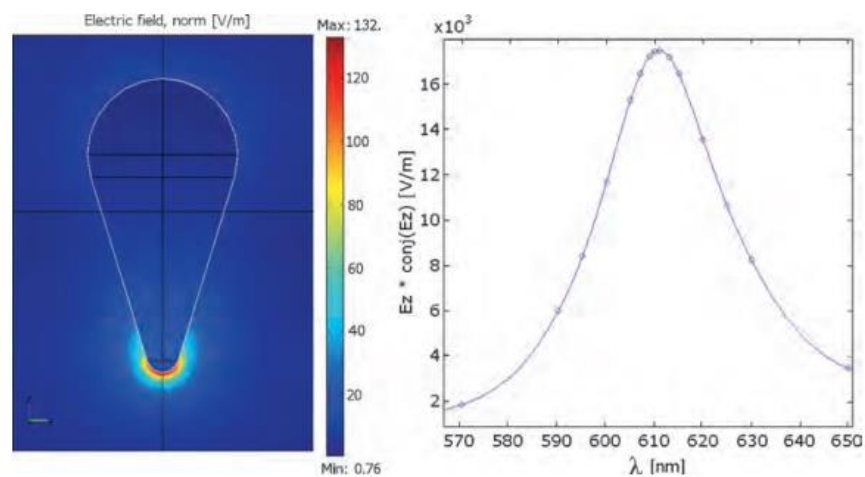
به منظور به دست آوردن پیشرفت بالا، لازم است داده‌ها پیوسته بیشینه گردند. به هر حال، برای ساختارهای فلزی با ابعادی که کوچک‌تر از عمق فلز هست، می‌توان رزونانس پلاسما را تحت سلطه گاز الکترون آزاد قرار داد.

4. گوی‌های حفاظت شده توسط پوشش طلایی Silver

در شبه استاتیک، محاسبه رزونانس پلاسما ذرات کروی به سادگی توسط تعیین قطب ذرات ایجاد می‌گردند.

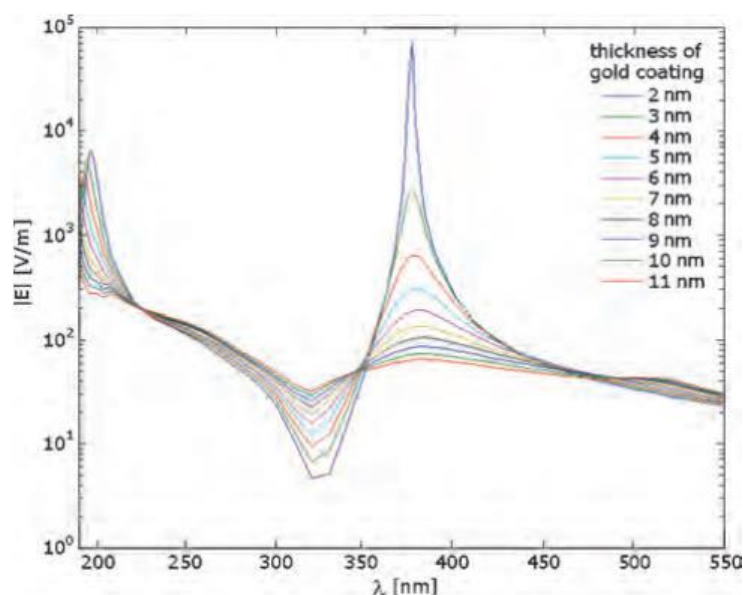
$$\alpha = 4\pi a^3 \epsilon_0 \frac{\epsilon_{\text{metal}} - \epsilon_{\text{insulator}}}{\epsilon_{\text{metal}} + 2\epsilon_{\text{insulator}}} \quad (5)$$

برای ذرات نقره در هوا، رزونانس پلاسما نزدیک به $RES=379$ خواهد بود. آنتن خود مشابه دارای ساختاری مشابه با طول موج و رزونانس شیفت یافته به سمت رنگ قرمز و به عنوان طول موج موثر است. بنابراین ترکیب ذرات در اندازه‌های مختلف نقره‌ای با هم ترکیب شده و رزونانس UV را خواهند ساخت. متأسفانه، نقره دارای یک ماده شیمیایی ناپایداری است که سطح محافظت آن بسیار پایین است. یک لایه پوشش کره طلا با نقره ایجاد می‌گردد تا پوشش شیمیایی ذرات نقره، آسیبی به آن نزنند. درک نتیجه چنین کاری موجب ایجاد زمینه‌ای می‌گردد که در آن باید در مورد آنتن‌های نوری و رزونانس پلاسما نقره اطلاعات بیشتری در دست باشد.



شکل 4. توزیع درست و افزایش زمینه برای یک آنتن مخروطی شکل. این شکل از آنتن خود مشابه در شکل 2 با حذف notchها ایجاد شده است. گراف نشانگر حداکثر میدان الکتریکی در برابر طول موج آن است. توجه داشته باشید که در مقایسه با آنتن شکل 3، رزونانس این مورد تا تقریباً 100 نانومتر است.

نتایج شبیه سازی در شکل 5 نشان داده شده است. هر چند تعداد هسته‌های نقره‌ای که توسط لایه طلا احاطه شده‌اند محدود است، اما پوشش طلای استفاده شده دارای ضخامت کمتری هست. رزونانس طلا در حالت ترکیبی هوا و طلا کاهش یافته و میدان میرایی را در رزونانس طلا نمایش می‌دهد. جالب است بدانید که طول موج رزونانس دارای ضخامت بیشتری است و نتایج ارائه شده برای پوشش نقره، ذرات بیشتری را از طلا می‌یابد.



شکل 5. افزایش ذره نقره تا 40 نانومتر با روکش طلا و لایه محافظ. طول موج رزونانس ذرات نقره دارای سطح تأثیر بیشتری نسبت به بقیه موارد هستند. اما هوا دارای تأثیر کمتری است. این ضعف رزونانس در هوا تا حدود 350 نانومتر خواهد بود.

Nanorod.5

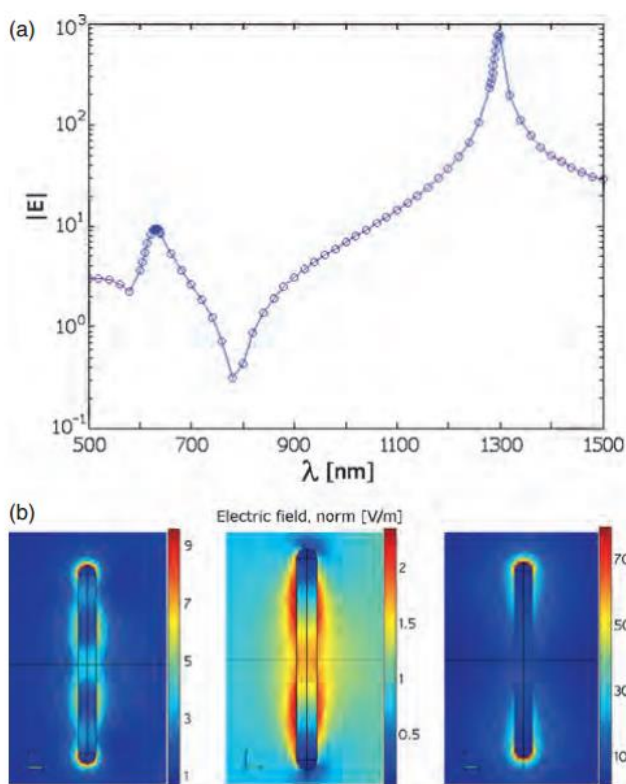
ساده ترین روش برای تعیین آنتن امواج رادیویی این است که شعاع آن را بر عدد دو تقسیم نموده و یا آنتن را از نوع آنتن سیمی در نظر بگیریم. تقسیم آن بر عدد دو موجب ایجاد فرمول زیر می‌گردد:

$$l = \left(n + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad (6)$$

در مطالعه رفتار آنتن نوری می‌توان از محاسبات نانو میله‌ای با مجموع طول 220 نانومتر و یا 20 نانومتر استفاده کرد. قطر شبکه در شکل 6 (a) نشانگر افزایش میدان الکتریکی در مقابل توزیع تحریک هست. شکل 6 (b)، نشانگر رزونانس

پایین است. معادله (6) نشانگر یافتن حالت نانومتر است: هیچ یک از این موارد برای طلا در نظر گرفته نشده بود و صرفاً می‌توان موارد مربوط به محاسبه رزونانس را در آن دخیل کرد. این محاسبات طول رزونانس را از 440 نانومتر تا 1298 نانومتر در نظر گرفته‌اند.

16 Calander and Willander، نشان دادند که می‌توان برای محاسبه دقیق نرخ طلا و نقره از رزونانس حدود 100 نانومتر تا 200 نانومتر استفاده نمود. اما رزونانس 300 تا 400 نانومتر می‌تواند پذیر است و یک شبه کره هندسی ایجاد خواهد گردید. نرخ بالا در ابعاد بزرگ‌تر نشان می‌دهد که شعاع محوری میله‌ها را می‌توان به راحتی افزایش و یا کاهش داد تا نانو میله‌ها به راحتی محاسبه گردند.



شکل 6. (a) وابستگی طیفی با افزایش میدان در حدود 220 نانومتر از طلا و نقره با قطر 20 نانومتر. (b) توزیع طول موج برای سه اکست ریم از منحنی. (a) برای تقریباً 1300 نانومتر توزیع میدان (سمت راست) و حدود 650 نانومتر در سمت چپ و حدود 780 نانومتر در حالت تقارن.

6. نتیجه‌گیری

ما نشان دادیم که ساختارهایی همانند آنتن‌های خود مشابه را می‌توان توسط نفوذ حوزه آنتن نوری کارآمد برای میکروسکوپ نوری میدان نزدیک انجام داد. ما تأثیر پلاسمون را نیز مورد بررسی قرار داده و رزونانس را در هر دو حالت شبه استاتیک و عقب‌مانده یافتیم که بالاترین پیشرفت را در رژیم عقب‌مانده به دست آوردیم. به عنوان مثال، زمانی که آنتن به دست آمده دارای طرحی مشابه با طول موج موثر دارد که توسط تفلیس و Willander، 16 مورد بررسی قرار گرفته است. ما مشاهدات چشمگیری در طول موج رزونانس برای نانو میله‌ها نسبت به میله‌های کلاسیک آنتن به دست آوردیم. در این زمینه، استفاده از پلاسمون و رزونانس افزایش چشمگیری داشته است. طول L توسط یک عامل n_{res} با توجه به تغییرات رنگ قرمز به این صورت خواهد بود:

$$\lambda_{res} = \lambda_o n_{res} \quad (7)$$

به طوری که O طول موج رزونانس یک آنتن ساخته شده است و λ_o ثابت انتشار موج بر در امتداد بی‌نهایت به عنوان یک شاخص سطح موثر در نظر گرفته شده است.

References

1. N.Anderson, A.Bouhelier, and L.Novotny, J. Opt. A: Pure and Appl. Opt. 8, S227 (2006).
2. P.Anger, P.Bharadwaj, and L.Novotny, Phys. Rev. Lett. 96, 113002 (2006).
3. P.Mühlschlegel, H.Eisler, O.Martin, B.Hecht, and D.Pohl, Science 308, 1607 (2005).
4. P.J.Schuck, D.P.Fromm, A.Sundaramurthy, G.S.Kino, and W.E. Moerner, Phys. Rev. Lett. 94, 017402 (2005).
5. E.Cubukcu, E.Kort, K.Crozier, and F.Capasso, Appl. Phys. Lett. 89, 093120 (2006).
6. G.Mie, Ann. Phys. Leipzig 25, 377 (1908).
7. M.Born and E.Wolf, Principles of Optics, 7th edn.Cambridge University Press (1999).
8. L.Novotny and B.Hecht, Principles of Nano-Optics, Cambridge University Press (2006).
9. P.B.Johnson and R.W.Christy, Phys. Rev. B 6, 4370 (1972).
10. I.Romero, J.Aizpurua, G.Bryant, and F.Garcia de Abajo, Opt. Express 14, 9988 (2006).
11. K.Li, M.Stockman, and D.Bergman, Phys. Rev. Lett. 91, 227402 (2003).
12. Ch.Hafner and J.Smajic, Maxwell Solvers for Optics, Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology, edited by Michael Rieth and Wolfgang Schommers, American Scientific Publishers, Stevenson Ranch, CA (2006), Vol.1.
13. R.Esteban, R.Vogelgesang, and K.Kern, Nanotechnology 17, 475 (2006).
14. G.Boyd, Th.Rasing, J.Leite, and Y.Shen, Phys. Rev. B. 30, 519 (1984).
15. N.R.Jana, Roy. Soc. Chem. 128, 954 (2003).
16. N.Calander and M.Willander, J. Appl. Phys. 92, 4878 (2002).
17. L.Novotny and Ch.Hafner, Phys. Rev. E 50, 4094 (1994).
18. M.I.Stockman, Phys. Rev. Lett. 93, 137404 (2004).