



افزایش شدت انتشار تک جهتی پرتو پلاسمون پلاریتون سطحی (SPP) در یک نانو ساختار فلزی شکاف-شیار

بهروز افتخاری‌نیا، احمد مشاعی و سید حسن نبوی

گروه فیزیک اتمی و مولکولی، بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۷۵، تهران

چکیده - ما طرحی جدید برای نانو ساختار فلزی شکاف-شیار ارائه می‌کنیم تا شدت انتشار تک جهتی پرتو نور پلاسمون‌های سطحی را افزایش دهیم. ایده‌ی ما بر اساس ترکیب انتشار تک جهتی موج پلاسمونی در نانو ساختار فلزی شکاف-شیار معمولی با مدهای پلاسمونی معروف به مدهای هیبریدی است. نشان می‌دهیم که این ساختار جدید منجر به افزایش ۵ مرتبه‌ای شدت پرتو SPP نسبت به نانو ساختار فلزی شکاف-شیار معمولی می‌شود.

کلید واژه - پلاسمون پلاریتون سطحی (SPP)، موج پلاسمونی هیبریدی، نانو ساختار فلزی شکاف-شیار

High intensity enhancement of unidirectional propagation of a surface plasmon polariton beam in a metallic slit-groove nanostructure

Behrooz Eftekharinia, Ahmad Moshaii and Seyed Hassan Nabavi

Department of physics, Tarbiat Modares University ,P.O Box14115-175 ,Tehran ,Iran moshaii@modares.ac.ir

Abstract- We propose a new design for metallic slit-groove nanostructure to increase the propagation intensity of a unidirectional surface plasmon polariton (SPP) light beam. Our idea is based on the combination of the concept of unidirectional plasmonic wave propagation in a metallic slit-groove nanostructure with the well-known hybrid modes of a hybrid metal-dielectric waveguide. We show that this novel structure results in up to 5 times enhancement in the SPP beam intensity relative to the conventional design of slit-groove nanostructure.

Keywords: Surface plasmon polariton(SPP); Hybrid plasmonic waveguide; Metallic slit-groove nanostructure

موجبر را محاسبه می‌کنیم. نشان خواهیم داد که این طرح جدید می‌تواند شدت پرتو نور تک جهت پلاسمونی را تا حد زیادی افزایش دهد.

۲- تئوری

زمانی که نور به شکاف مرکزی نانوساختار شکل ۱ برخورد می‌کند، از میان وزنه با پراش در تمام جهت‌ها عبور می‌کند و بخشی از نور پلاسمون‌های سطحی را در دو ناحیه تحریک می‌کند: ۱- در مرز مشترک فلز- ماده با ضریب دیالکتریک پایین (Ag-SiO_2) در قسمت سمت راست شکل و ۲- در امتداد توری فلزی در سمت چپ نانوساختار. همچنین بخشی از نور به مدهای موجبر با ضریب دیالکتریک بالا (GaAs) در نانو نوار بالای فلز جفت می‌شود. در واقع مرز مشترک Ag-SiO_2 موجب تولید و انتشار مد پلاسمونی در قسمت سمت راست نانو ساختار می‌شود. موجبر با ضریب شکست بالا (GaAs) احاطه شده با ماده‌ی با ضریب شکست پایین (SiO_2) نیز موجب انتشار مدهای فوتونی می‌شود. زمانی که این مدهای پلاسمونی و فوتونی با هم جفت می‌شوند، مدهای جدیدی تولید می‌شود. ویژگی‌های انتشار این مدهای هیبریدی جدید بستگی به مدهای اولیه پلاسمونی و فوتونی دارد. بررسی دقیق و مفصل موجبرهای هیبریدی در مرجع [۱] آمده است.

زمانی که مدهای SPP از میان آرایه‌ی تناوبی شیارهای فلزی منتشر می‌شوند، در زوایای مختلف پراکنده می‌گردند. به ازای یک اندازه‌ی تناوب توری خاص امواج SPP بازتاب شده و به صورت سازنده با هم تداخل می‌کنند. در این شرایط شیارهای پشت سر هم به مانند یک آینه‌ی برآگ^۳ عمل می‌کند [۱]. شرط تداخل سازنده که موجب بیشترین بازتاب امواج SPP توسط شیارهای تناوبی می‌شود به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$K_{SPP} \cdot P = m\pi \quad (1)$$

که بدرار موج SPP، P اندازه تناوب توری و m یک عدد صحیح است. موج SPP بازتاب شده از شیارهای تناوبی با امواج SPP اولیه‌ای که به سمت راست در حال انتشاراند، تداخل می‌کند. اگر فاصله‌ی بین مرکز شکاف و

۱- مقدمه

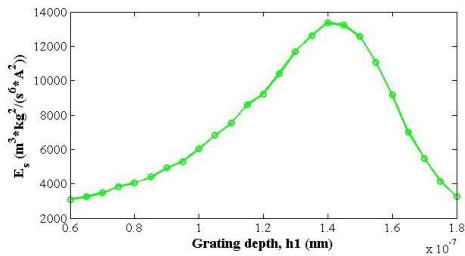
زمینه‌ی جدید پلاسمونیک امیدوارکننده‌ترین جایگزین سیستم‌های فوتونیکی برای دستکاری نور در مقیاس زیر طول موج است. زیرا در مقایسه با موجبرهای فوتونی، در موجبرهای پلاسمونی محصورسازی نور توسط محدودیت پراش محدود نمی‌شود. با این وجود تلفات انتشار ذاتی در موجبرهای پلاسمونی زیاد است و در نتیجه شدت نور پلاسمون پلاریتون سطحی (SPP) ضعیف است [۱، ۲]. پس چالش اساسی که برای توسعه سیستم‌های پلاسمونی فشرده باید حل شود مسئله‌ی افزایش شدت نور پلاسمونی است.

طبق نظریه‌ی پراش کلاسیک، زمانی که نور بر روی یک شکاف زیر طول موجی می‌افتد، در همه‌ی جهت‌ها پراکنده می‌شود [۳، ۴]. نشان داده شده است که قرار دادن آرایه‌ای تناوبی از شیارها در طرف خروجی شکاف یک ساختار فلز- دیالکتریک منجر به انتشار تک جهتی پرتو SPP می‌شود [۵، ۶، ۷]. این اثر پرتوی تک جهتی که توسط لزک^۱ و همکارانش معرفی شد [۳، ۴]، برای طراحی نانو ساختارهای فلزی شکاف- شیار معمولی به کار رفته و منجر به افزایش چشمگیر شدت پرتو پلاسمونی شده است [۸، ۹].

موجبرهای پلاسمونی هیبریدی که امواج پلاسمونی و موجبرهای دیالکتریکی را با هم ترکیب می‌کنند، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۱، ۲]. در مرجع [۱۱]، یک موجبر هیبریدی معرفی شده است که قادر به محصورسازی مد پلاسمونی در مساحت مدد صد مرتبه کوچک‌تر از اندازه‌ی مد حد پراش است.

در این مقاله، ما یک طرح جدید برای نانو ساختار فلزی شکاف- شیار برای افزایش شدت انتشار پرتو نور SPP پیشنهاد می‌کنیم. ما یک نانو نوار نیمه هادی با ضریب شکست زیاد را بالای یک سطح فلزی قرار می‌دهیم تا در سمت راست نانو ساختار فلزی شکاف- شیار یک موجبر دیالکتریکی تشکیل شود (شکل ۱). با استفاده از نرم افزار مهندسی کامسول^۲ شدت موج پلاسمونی منتشره در

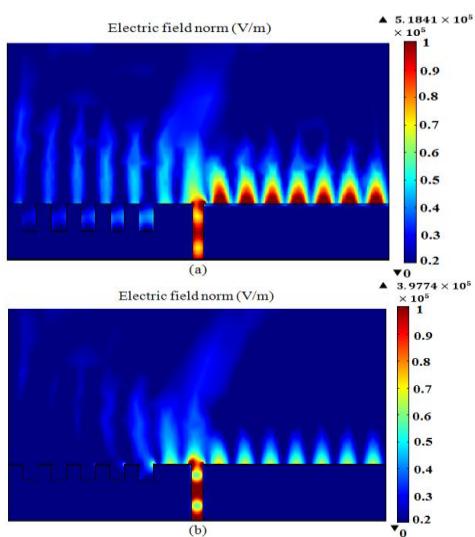
فاصله‌ی بین مرکز شکاف و اولین شکاف را برابر با nm در نظر می‌گیریم. در این صورت بین امواج SPP که به سمت راست می‌روند و امواج SPP بازتابیده از شیارها تداخل سازنده اتفاق می‌افتد.



شکل ۲- تغییرات انرژی میدان الکتریکی بر حسب پارامتر عمق توری، h_1 بر روی خط محاسباتی تعریف شده.

برای آنکه تاثیر عمق توری‌ها بر روی شدت پرتو SPP را ببینیم، بقیه‌ی پارامترها را ثابت نگه داشته و اندازه‌ی h_1 را از 60 nm تا 180 nm تغییر می‌دهیم. برای محاسبه‌ی انرژی میدان الکتریکی $E_s = \int E^2 dl$ یک خط محاسباتی بر روی مرز Ag-SiO_2 تعریف می‌کنیم. نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است. برای نانو ساختار بدون نانو نوار دی الکتریکی مقدار بهینه‌ی E_s به ازای $h_1=140\text{ nm}$ به دست می‌آید. در ادامه محاسبات برای این مقدار h_1 انجام می‌شود.

شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی برای $h_1=140\text{ nm}$ و $h_1=80\text{ nm}$ را نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود اندازه‌ی میدان الکتریکی در ناحیه‌ی میدان نزدیک برای مورد $= 140\text{ nm}$ h_1 بسیار بزرگ‌تر از اندازه‌ی آن در $h_1=80\text{ nm}$ است.

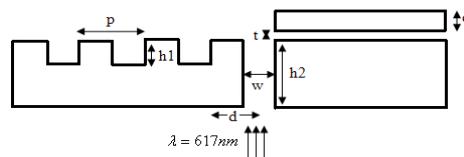


شکل ۳- پروفایل میدان الکتریکی برای نانو ساختار معمولی در (a) $h_1=80\text{ nm}$ و (b) $h_1=140\text{ nm}$.

اولین شیار با d بیان شود، اختلاف فاز بین این امواج SPP به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\varphi = 2K_{SPP}d + m\pi \quad (2)$$

تداخل سازنده یا غیرسازنده زمانی اتفاق می‌افتد که ضربی زوج یا فرد از π باشد. این با پارامتر d تعیین می‌شود. بنابراین در این بررسی با دو نوع جفت شدگی بین امواج سر و کار داریم. یکی جفت شدگی بین امواج SPP در مرز فلز- دیالکتریک در دو طرف نانو ساختار و دیگری جفت شدگی بین مد فوتونی در موجبر دی الکتریکی و مد پلاسمونی منتشره در مرز Ag-SiO_2 در قسمت سمت راست نانو ساختار. این جفت شدگی‌ها ویژگی‌های محصور شدگی مدی و شدت پرتو تک جهت پلاسمونی را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد.



شکل ۱- نانو ساختار شکاف- شیار که با نانو نوار دی الکتریکی در بالای سطح فلز ترکیب شده است.

۳- شبیه‌سازی و بحث

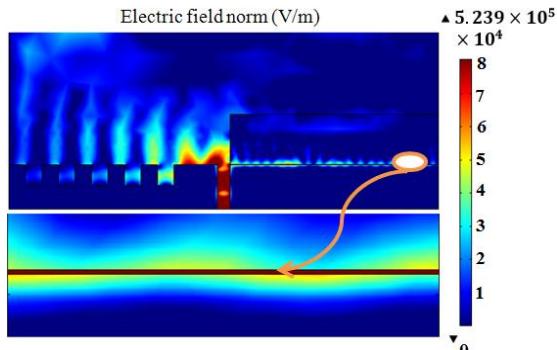
ما می‌خواهیم از ترکیب دو مفهوم موجبری هیبریدی پلاسمونی و آینه‌ی برآگ در نانو ساختارهای شکاف-شیار استفاده کرده تا بتوانیم موجبری ساختار را بهبود بخشیم. به این دلیل و بنابر آنچه که در بخش تئوری گفته شد بر روی لایه‌ی فلزی سمت راست ساختار معمولی شکاف-شیار لایه‌ی دیالکتریک را قرار می‌دهیم تا موجبر هیبریدی تشکیل شود. بنابراین عبور نور از میان ساختار ترکیبی شکل ۱ را شبیه‌سازی و نتایج را با طرح معمولی نانو ساختار شکاف-شیار بدون نانو نوار دی الکتریکی مقایسه کرده‌ایم. فرض می‌کنیم که موج قطبیده تخت TM با طول موج 617 nm از پایین به بالا بر شکاف زیر طول موجی فرود می‌آید. گذردهی الکتریکی نقره در این طول موج $J_0/2894 - J_0/5523$ و ضخامت آن 300 nm است. تعداد ۵ شیار با کسر پرشدنگی $0/5$ در نظر گرفته شده است که اندازه تناوب توری آن‌ها $p=200\text{ nm}$ است. این مقدار p شرط معادله (۱) را بر آورده می‌کند. پهنه‌ی شکاف $nm = 90$ در نظر گرفته شده است. با کمک رابطه‌ی (۲) که صحت آن قبلاً به صورت تئوری و تجربی نشان داده شده است [۱۰]، مقدار

این نتایج را می‌توان برای کنترل نور محصور شده در سیستم‌های پلاسمونی در بازه‌ی گستره‌های از کاربردها از جمله در اپتیک مجتمع و نانولیتوگرافی استفاده کرد.

مراجع

- [1] R. F. Oulton, V. J. Sorger, D. A. Genov, D. F. P. Pile, and X. Zhang, *A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation*, **Nature Photonics**, 2(2008), 496–500.
- [2] M. Z. Alam, J. Meier, J. S. Aitchison, and M. Mojahedi, *Propagation characteristics of hybrid modes supported by metal-low-high index waveguides and bends*, **Opt. Express**, 18(2010), 12971–12979.
- [3] H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux, R. A. Linke, L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, and T. W. Ebbesen, *Beaming light from a subwavelength aperture*, **Science** 297(2002), 820–822.
- [4] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, *Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays*, **Nature**, 391(1998) 667–669.
- [5] D.-Z. Lin, T.-D. Cheng, C.-K. Chang, J.-T. Yeh, J.-M. Liu, C.-S. Yeh, and C.-K. Lee, *Directional light beaming control by a subwavelength asymmetric surface structure*, **Optics Express**, 15(2007), 2585–2591.
- [6] H. Kim and B. Lee, *Unidirectional Surface Plasmon Polariton Excitation on Single Slit with Oblique Backside Illumination*, **Plasmonics**, 4 (2009) 153–159.
- [7] Y. Lee, K. Hoshino, A. Alù, and X. Zhang, *Tunable directive radiation of surface-plasmon diffraction gratings*, **Optics express**, 21 (2013), 2748–2756.
- [8] P. Chen, Q. Gan, F. J. Bartoli, and L. Zhu, *Near-Field-Resonance-Enhanced Plasmonic Light Beaming*, **IEEE Photonics Journal**, 2 (2010), 8–17.
- [9] F. López-Tejeira, S. G. Rodrigo, L. Martín-Moreno, F. J. García-Vidal, E. Devaux, T. W. Ebbesen, J. R. Krenn, I. P. Radko, S. I. Bozhevolnyi, and M. U. González, *Efficient unidirectional nanoslit couplers for surface plasmons*, **Nature Physics**, 3(2007), 324–328.
- [10] S. Randhawa, M. U. González, J. Renger, S. Enoch, and R. Quindant, *Design and properties of dielectric surface plasmon Bragg mirrors*, **Optics Express**, 18 (2010) 14496–14510.

شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی برای اندازه‌ی میدان الکتریکی نانو ساختار جدید را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود میدان الکتریکی شدیداً در ناحیه‌ی بسیار باریک با ضریب دی الکتریک پایین بین نانو نوار دی الکتریکی و فلز محصور شده است. این منجر به انتشار مد پلاسمونی شدید با طول انتشار زیاد و محصور شدگی بالا می‌شود. برای مقایسه‌ی نانو ساختار معمولی و طرح جدید ارائه شده، اندازه‌ی میدان الکتریکی را در امتداد یک خط محاسباتی به فاصله‌ی $t/2$ از سطح فلزی اندازه گیری کرده‌ایم. دامنه‌ی میدان الکتریکی بستگی به شرایط تشدید بین مدهای دی الکتریکی و مد پلاسمونی دارد. بنابراین این جفت شدگی بستگی به پارامترهای هندسی ساختار مثل ضخامت نانو نوار دی الکتریکی، q و فاصله‌ی بین فلز و نوار دی الکتریکی، t دارد. به عنوان مثال مقدار انرژی میدان الکتریکی، E_s در امتداد خط محاسباتی برای $q=340\text{ nm}$ و $t=2\text{ nm}$ تقریباً ۵ برابر میزان آن برای ساختار شکاف-شیار معمولی است. در حالی که این نسبت برای $q=100\text{ nm}$ و $t=2\text{ nm}$ برابر ۳ است.



شکل ۴- پروفایل میدان الکتریکی برای ساختار ترکیبی جدید به ازای $t=2\text{ nm}$ و $q=340\text{ nm}$ پایین نمایش بهتر در پایین شکل به صورت برجسته نشان داده شده است.

۴-نتیجه گیری

عبور نور از یک شکاف زیر طول موج در یک ساختار مرکب متشكل از ساختار فلزی شکاف-شیار معمولی و موجبر هیبریدی پلاسمونی مطالعه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نه تنها شدت پرتو تک جهت SPP افزایش می‌یابد، بلکه پرتو نوری در یک ناحیه‌ی بسیار باریک با ضریب شکست پایین محصور می‌شود. پارامترهای هندسی موجبر دی الکتریکی و توری فلزی روی میزان بهبود ویژگی‌های انتشار مدی تاثیر می‌گذارد.