بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

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، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی ۱۷۵-۱۴۱۱۵، 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)، موجبر 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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

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 توسعه‌ی 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 [۱]، یک موجبر هیبریدی معرفی شده است که قادر به محصورسازی مد پلاسمونی در مساحت مد 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 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 روزنه 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 نانو ساختار. 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 مختلفی 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 براگ[۳] عمل می‌کند [۱]. شرط تداخل سازنده که موجب بیشترین بازتاب امواج SPP توسط شیارهای تناوبی می‌شود به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$K_{sp}.P = m\pi \qquad (1)$$

که K_{SPP} بردار 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

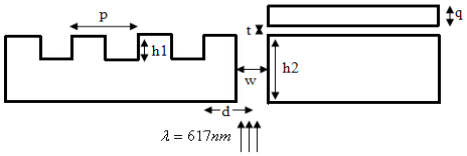
[۱] Lezec
[۲] Comsol
[۳] Bragg Mirror

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

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

$$\varphi = 2K_{SP}.d + m\pi \qquad (2)$$

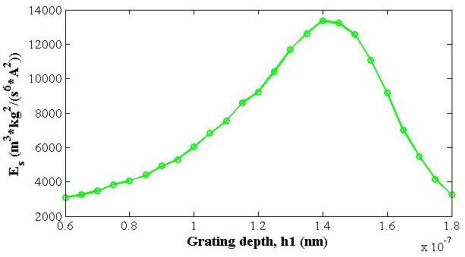
تداخل سازنده یا غیرسازنده زمانی اتفاق می‌افتد که φ ضریبی زوج یا فرد از π باشد. این با پارامتر d تعیین می‌شود. بنابراین در این بررسی با دو نوع جفت شدگی بین امواج سر و کار داریم. یکی جفت شدگی بین امواج SPP در مرز فلز- دی‌الکتریک در دو طرف نانو ساختار و دیگری جفت شدگی بین مد فوتونی در موجبر دی الکتریکی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



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

۳-شبیه سازی و بحث

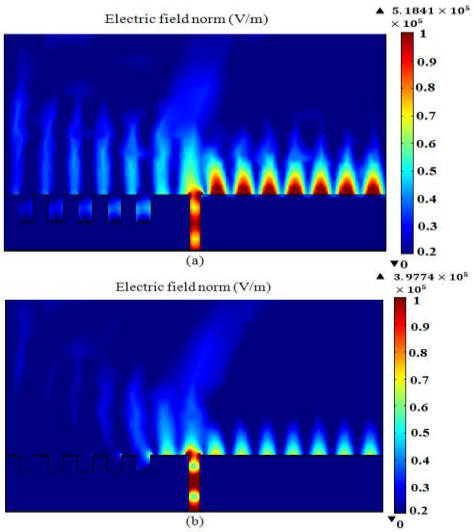
ما می‌خواهیم از ترکیب دو مفهوم موجبری هیبریدی پلاسمونی و آینه‌ی براگ در نانو ساختارهای شکاف- شیار استفاده کرده تا بتوانیم موجبری ساختار را بهبود ببخشیم. به این دلیل و بنابر آنچه که در بخش تئوری گفته شد بر روی لایه‌ی فلزی سمت راست ساختار معمولی شکاف- شیار لایه‌ی دی‌الکتریک را قرار می‌دهیم تا موجبر هیبریدی 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 ۶۱۷nm از پایین به بالا بر شکاف زیر طول موجی فرود می‌آید. گذردهی الکتریکی نقره در این طول موج ۰/۲۸۹۴j-۱۷/۵۵۲۳- و ضخامت آن ۳۰۰nm است. تعداد ۵ شیار با کسر پرشدگی ۰/۵ در نظر گرفته شده است که اندازه تناوب توری آن‌ها p=۲۰۰nm است. این مقدار p شرط معادله‌ی (۱) را بر آورده می‌کند. پهنای شکاف w=۹۰ nm در نظر گرفته شده است. با کمک رابطه‌ی (۲) که صحت آن قبلا به صورت تئوری و تجربی نشان داده شده است [۱۰]، مقدار فاصله‌ی بین مرکز شکاف و اولین شکاف را برابر با nm ۳۰۰ 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 ۶۰nm تا ۱۸۰nm 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=۱۴۰nm به دست می‌آید. در ادامه محاسبات برای این مقدار h_1 انجام می‌شود.

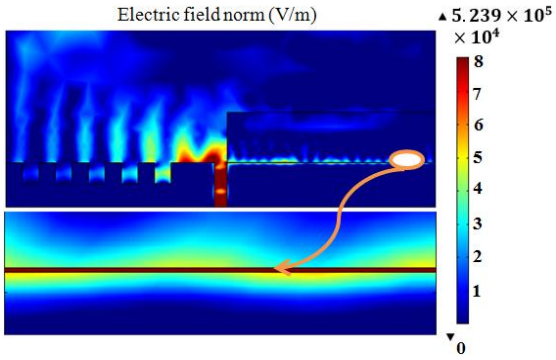
شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی برای h_1=۱۴۰nm و h_1= ۸۰nm را نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود اندازه‌ی میدان الکتریکی در ناحیه‌ی میدان نزدیک برای مورد h_1 = ۱۴۰nm بسیار بزرگتر از اندازه‌ی آن در h_1= ۸۰nm است.



شکل ۳- پروفایل میدان الکتریکی برای نانو ساختار معمولی در a) h_1=۱۴۰nm و b) h_1=۸۰nm.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی برای اندازه‌ی میدان الکتریکی نانو ساختار جدید را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود میدان الکتریکی شدیدا 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/۲ 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=۳۴۰nm و t=۲nm تقریبا ۵ برابر میزان آن برای ساختار شکاف- شیار معمولی است. در حالی که این نسبت برای q=۱۰۰nm و t=۲nm برابر ۳ است.



شکل ۴- پروفایل میدان الکتریکی برای ساختار ترکیبی جدید به ازای q=۳۴۰nm و t=۲nm. ناحیه‌ی بسیار باریک با ضریب دی الکتریک پایین برای 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 متشکل 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. این نتایج را می‌توان برای کنترل نور محصور شده در سیستم‌های پلاسمونی در بازه‌ی گسترده‌ای 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 sub-wavelength 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. Quidant, *Design and properties of dielectric surface plasmon Bragg mirrors*, **Optics Express, 18** (2010) 14496–14510.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]