مشاهده تجربی پدیده شفافیت القایی پلاسمونی (PIT) در ساختار سه لایه فلز-دی‌الکتریک-فلز (MIM)

آمنه رضاییان، دکتر محمود حسینی فرزاد

دانشگاه شیراز-دانشکده علوم-بخش فیزیک

چکیده - در این مقاله بطور تجربی پدیده شفافیت القایی پلاسمونی (PIT) در یک نانوساختار فلز-دی‌الکتریک-فلز (Ag-Al_2 O_3-Ag) بر پایه روش تضعیف بازتاب کلی مشاهده خواهیم کرد. در این پدیده انرژی گرفته شده از پرتو فرودی که صرف تحریک پلاسمون پلاریتون-های سطحی (SPPs) روی نانو لایه فلزی می‌شود توسط یک مکانیزم فیزیکی که قابلیت جفت‌شدگی با SPP دارد، به نور فرودی بازگردانده می‌شود. در عمل می‌بایست فرورفتگی مورد انتظار در منحنی بازتاب از ساختار سه لایه بر حسب زاویه ورودی تبدیل به برآمدگی در زاویه مینیمم بازتابش شود. برای این کار، ابتدا پدیده PIT را بوسیله نرم‌افزار کامسول برای نانو ساختار Ag-Al_2 O_3-Ag شبیه‌سازی کرده و ضخامت بهینه لایه‌ها که این پدیده برای آن‌ها اتفاق می‌افتد را بدست می‌آوریم. سپس این سه لایه با ضخامت‌های بهینه را روی منشور از جنس شیشه پلکسی با ضریب شکست ۱/۴۸۸ لایه‌نشانی می‌کنیم. با برپایی یک چیدمان آزمایشگاهی، منحنی بازتاب از لایه‌ها بر حسب زاویه ورودی برای لیزر هلیم-نئون با طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر و قطبش TM اندازه گیری می‌کنیم. نتایج این اندازه‌گیری، پیش-بینی‌های برآمده از شبیه‌سازی را تأیید می‌کند.

کلید واژه- پدیده شفافیت القایی پلاسمونی (PIT)، روش تضعیف بازتاب کلی، ساختار فلز-دی‌الکتریک-فلز

Experimental observation of Plasmonic-Induced-Transparency (PIT) in Metal-Insulator-Metal (MIM) for a three-layer structure

Amene Rezaeian, Mahmood Hosseini Farzad (PH.D)

Shiraz University-College of Science-Department of Physics

Abstract- In this paper we experimentally demonstrate a Plasmonic-Induced-Transparency (PIT) in a metal-insulator-metal (Ag-Al_2O_3-Ag) nanostructure based on the attenuated total reflection (ATR) method. In this phenomenon, the taken energy from incident light which is used to excite surface plasmon polaritons (SPPs) on metallic nonolayer, returned to the incident light by a physical mechanism that has ability to coupled the SPPs. In practice, the expected dip in the reflectivity curve with respect to angle of incident light from three layers structure should be transformed to a peak in the angle of minimum reflectivity. For this work, at first; we simulate Plasmonic-Induced-Transparency (PIT) for Ag-Al_2O_3-Ag nanostructure by comsol software and obtain the optimal thickness of the layers that this phenomenon occurs for them. Then, we deposit these three layers with optimal thicknesses on a plexi glass prism with refractive index 1.488. By a laboratory setup, we measure the reflectivity curve from layers with respect to incident angle by a He-Ne laser with wavelength 632.8nm and TM polarization. Results of this measurement confirm the prediction of the simulation.

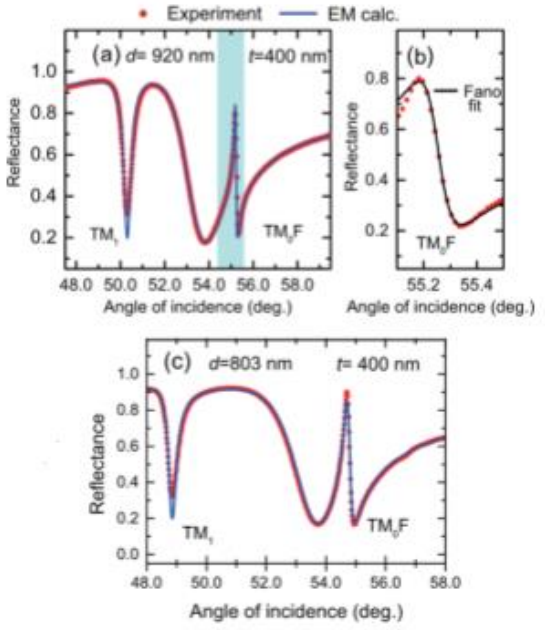
Keywords: Plasmonic-Induced-Transparency (PIT), Attenuated Total Reflection (ATR) method, Metal-Insulator-Metal (MIM) structure.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-13]

۱- مقدمه

نوسان‌های دسته جمعی الکترون‌های آزاد در سطح فلز بوسیله امواج الکترومغناطیسی، پلاسمون سطحی (SP)[۱] نامیده می‌شود[۱]. پلاسمون‌های سطحی در مرز مشترک فلز-دی‌الکتریک بوجود آمده و در امتداد مرز بصورت نمایی میرا می‌شوند. شرط ایجاد پلاسمون‌های سطحی این است که بردار موج نور ورودی با بردار موج نوسان الکترون‌های سطحی یکسان شود. این وضعیت تنها زمانی ارضا می‌شود که تحت زاویه مشخص برخورد، کاهش در بازتابش نور از ساختار مشاهده شود. برهم‌کنش نور ورودی با پلاسمون‌های سطحی بوجود آمده در مرز مشترک فلز-دی‌الکتریک، امواج پلاسمون پلاریتون سطحی (SPP)[۲] را بوجود می‌آورد. امواج پلاسمون پلاریتون سطحی در ساختارهای سه لایه پلاسمونی از جمله فلز-دی‌الکتریک-فلز نیز قابل مشاهده هستند. این امواج در هر دو مرز فلز-دی‌الکتریک تحریک می‌شوند و هنگامی که فاصله بین مرزهای مجاور در حدود و یا کمتر از طول میرایی یا عمق نفوذ مد مرزی باشد، واکنش‌های میان SPPها به تزویج میان آن‌ها می‌انجامد. از طرف دیگر در ساختار فلز-دی‌الکتریک-فلز با تنظیم ضخامت لایه دی‌الکتریک می‌توان آن را بعنوان موجبر (WG)[۳] در نظر گرفت. تحت این شرایط اگر مد تشدیدی SPP با مد تحریکی WG جفت شود در منحنی بازتاب بر حسب زاویه ورودی SPP، مینیمم بازتابش جای خود را به ماکسیمم بازتابش می‌دهد. اگر زاویه‌های تحریک دو مد SPP و WG بر هم منطبق شوند ماکسیمم بازتابش نسبت به دو مینیمم کناری خود متقارن ظاهر شده، به آن پدیه شفافیت القایی پلاسمونی (PIT)[۴] گفته می‌شود[۲]. در صورتی که زاویه تحریک مد WG از زاویه تشدید مد SPP به مقدار اندکی کوچکتر یا بزرگتر باشد، ماکسیمم بازتابش نسبت به دو مینیمم کناری خود نامتقارن ظاهر شده، پدیده فانو رزونانس رخ می‌دهد[۲]. شکل (۱)، قسمت‌های (a) و (b) پدیده فانو رزونانس و قسمت (c) پدیده PIT را برای ساختار prism/Ag/Cytop/PMMA با موجبر PMMA نشان می‌دهند. از پدیده‌های فانو رزونانس و PIT برای بالا بردن حساسیت حسگرها استفاده می‌شود، بطوریکه حسگر فانو حساسیتی ۱۰۰۰ برابر بیشتر از حسگر SPR معمولی دارد [۳].



شکل۱: (a) پدیده فانو رزونانس، (b) انطباق فانو رزونانس بر شکل خط asymmetric و (c) پدیده PIT برای نانوساختار پلاسمونی prism/Ag/Cytop/PMMA با موجبر PMMA نشان می‌دهد. t و d به ترتیب ضخامت Cytop و PMMA هستند. TM1 و TM0f مدهایی هستند که در موجبر به وجود آمده‌اند، مد TM0f بر مد SPP منطبق شده است[۴].

۲- شبیه‌سازی و ساخت نانوساختار پلاسمونی $Ag-Al_2O_3-Ag$

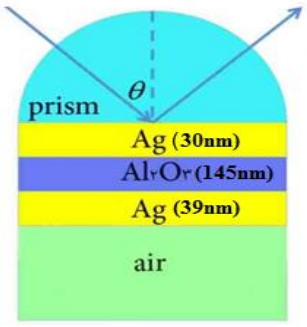
ما در این مقاله بطور تجربی پدیده شفافیت القایی پلاسمونی (PIT) در یک نانوساختار فلز-دی‌الکتریک-فلز ($Ag-Al_2O_3-Ag$) بر پایه روش تضعیف بازتاب کلی مشاهده خواهیم کرد. برای این کار، ابتدا پدیده PIT برای نانوساختار پلاسمونی $Ag-Al_2O_3-Ag$ که شماتیک آن در شکل (۲) نشان داده شده است را بوسیله نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی کرده و ضخامت بهینه‌ی لایه‌های مورد نظر که این پدیده برای آن‌ها اتفاق می‌افتد را بدست می‌آوریم. این ضخامت‌های بهینه بصورت زیر انتخاب می‌شوند: $prism/t(Ag)=30nm/t(Al_2O_3)=145nm/t(Ag)=39nm.$ منحنی بازتاب بر حسب زاویه ورودی و توزیع میدان الکتریکی شبیه‌سازی شده در شکل (۳) نشان داده شده

[۱] Surface plasmon
[۲] Surface plasmon polariton
[۳] Waveguide
[۴] Plasmonic-Induced-Transparency

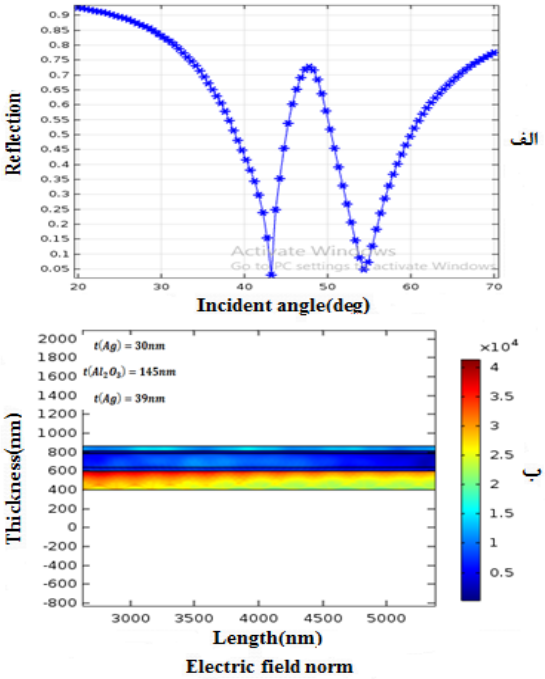
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-13]

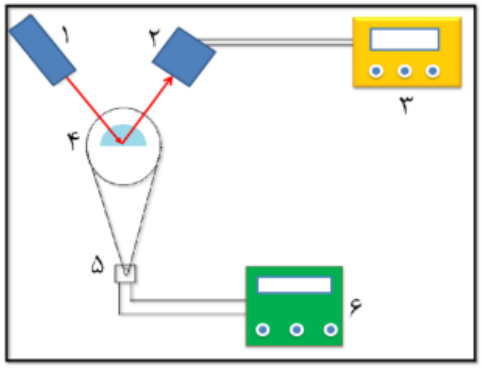
است. سپس ضخامت‌های بهینه بدست آمده را به روش تفنگ الکترونی روی منشور از جنس شیشه پلکسی با ضریب شکست ۱/۴۸۸ لایه نشانی می‌کنیم. با استفاده از چیدمان آزمایشگاهی که شماتیک آن در شکل (۴) نشان داده شده است، منحنی بازتاب بر حسب زاویه ورودی برای این ساختار بصورت تجربی برای لیزر هلیم-نئون با طول‌موج ۶۳۲/۸ نانومتر و قطبش TM اندازه‌گیری می‌کنیم. شکل (۵) منحنی بازتاب بر حسب زاویه ورودی حاصل از نتایج تجربی را نشان می‌دهد.



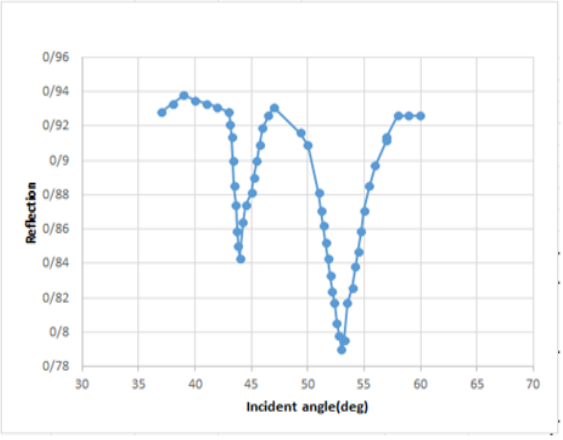
شکل ۲: شماتیک ساختار Ag-Al_2O_3-Ag فرض شده برای شبیه‌سازی



شکل ۳: (الف) و (ب) به ترتیب نمودار بازتاب (محور عمودی) بر حسب زاویه ورودی (محور افقی) و بزرگی میدان الکتریکی شبیه سازی شده بوسیله نرم‌افزار کامسول برای پدیده PIT برای نانوساختار پلاسمونی Ag-Al_2O_3-Ag را نشان می‌دهند. سمت مرز Ag-air بعلت تداخل سازنده حاصل از تشعشع نور از ساختار و بازتابش نور ورودی، توان بازتابی افزایش می‌یابد.



شکل۴: طرحواره‌ای از چیدمان آزمایشگاهی مشاهده پدیده PIT با استفاده از روش کرشمن، ۱- لیزر ۲- آشکارساز ۳- مولد آشکارساز ۴- منشور و صفحه چرخاننده ۵- موتورالکتریکی گیربکس‌دار ۶- مولد موتور الکتریکی.



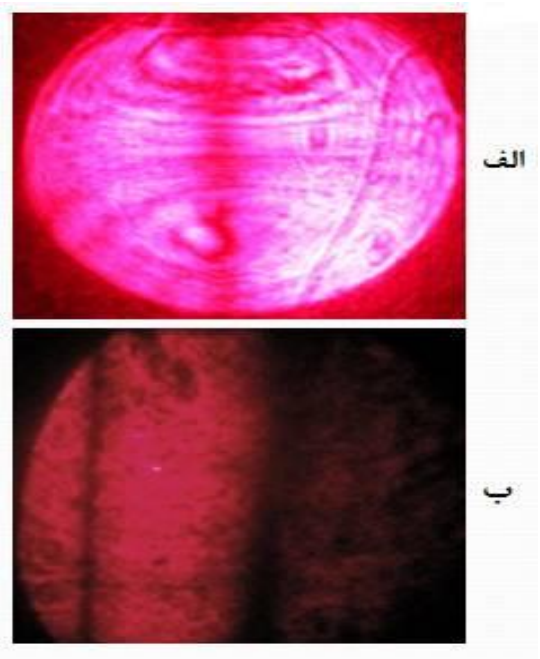
شکل ۵: منحنی بازتاب (محور عمودی) بر حسب زاویه ورودی (محور افقی) حاصل از نتایج تجربی برای پدیده PIT برای نانوساختار Ag-Al_2O_3-Ag را نشان می‌دهد.

با مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی، اختلاف ناچیزی در منحنی‌های بازتاب بر حسب زاویه ورودی آن‌ها مشاهده می‌شود. علت آن ریشه در تهیه نمونه و عدم کنترل دقیق ضخامت لایه‌ها در لایه‌نشانی دارد. اگر ضخامت لایه‌ها در لایه نشانی چند نانومتر با مقدارهای بدست آمده از شبیه-سازی اختلاف داشته باشد، تقارن قله ایجاد شده در منحنی بازتاب بر حسب زاویه ورودی شکسته شده، پدیده PIT تبدیل به پدیده فانو رزونانس می‌شود. از طرف دیگر، یک تست سریع و آسان برای اثبات وجود پلاسمون پلاریتون سطحی و پدیده شفافیت القایی پلاسمونی استفاده از چیدمان اپتیکی است. شکل (۶)، قسمت‌های (الف) و (ب) تصویر اپتیکی روی پرده برای پرتوهای واگرا شده بعد از برهم‌کنش لیزر همگرای فرودی به ترتیب با

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-13]

نانوساختارهای پلاسمونی تک لایه Ag-air با ضخامت ۵۰ نانومتری نقره و سه لایه $Ag-Al_2O_3-Ag$ را نشان می‌دهد. نوار تاریک در شکل (۵-الف) نشان دهنده تحریک SPP در تک لایه فلز Ag-air و دو نوار تاریک اطراف نوار روشن در شکل (۵-ب) وقوع پدیده PIT برای نانوساختار سه لایه مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۶: الف) نوار تاریک نشانگر مینیمم بازتابش و تحریک پلاسمون پلاریتون سطحی است. ب) نوار روشن میان دو نوار تاریک نشانگر ماکسیمم بازتابش و وقوع پدیده PIT است.

۳- نتیجه‌گیری

نتیجه اساسی این مقاله مشاهده پدیده PIT در ساختار سه لایه پلاسمونی فلز-دی‌الکتریک-فلز $Ag-Al_2O_3-Ag$ می‌باشد که بصورت شبیه‌سازی و تجربی این پدیده جالب که قبلاً برای ساختاری با این لایه‌ها گزارش نشده بود، مشاهده شد. این بررسی نشان می‌دهد که ضخامت لایه دی‌الکتریک بین دو لایه فلز برای وقوع این پدیده بسیار حائز اهمیت است، چرا که این لایه می‌بایست بصورت یک موجبر تخت دی‌الکتریک عمل کند تا پدیده PIT مشاهده شود. از طرف دیگر پدیده شفافیت القایی پلاسمونی (PIT) مانند پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی (EIT) عمل می‌کند. درحالیکه پدیده EIT در فراماد که طراحی و تهیه آن‌ها مشکل است دیده می‌شود، در این مقاله پدیده PIT در یک ساختار ساده پلاسمونی مشاهده شده است.

مراجع

[1] H. R. Gwon, S. H. Lee, "Spectral and Angular responses of surface plasmon resonance based on the Kretschmann configuration", Express Regular Article., Vol. 51, No. 6, pp. 1150-1155, 2010.

[2] Y. Neo, T. Matsumoto, T. Watanabe, M. Tomit, H. Mimo, " Transformation from plasmon induced transparency to induced absorption through the control of coupling strength metal0insulator-metal structure", Optics Express., Vol. 24, No. 23, pp. 26201-26208, 2016.

[3] S. Hayashi, D. V. Nesterenko, Z. Sekkat,. " Waveguide coupled surface plasmon resonance sensor structure: Fano line shape engineering for ultrahigh resolution", Appl. Phys., Vol. 48, pp. 325303-325313, 2015.

[4] Z. Sekkat, S. Hayashi, D. V. Nesterenko, A. Rahmouni, S. Refki, H. Ishitobi, Y. Inouye, S.Kawata, " Plasmonic coupled modes in metal-insulator-metal multilayer structure: Fano resonance and giant field enhancement", Optic Express., Vol. 24, pp. 20080-20088, 2016.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-13]