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

تعیین ضخامت‌های بهینه به منظور افزایش اثر مگنتواپتیکی کِر بوسیله تحریک پلاسمون پلاریتون سطحی در بلور مگنتوپلاسمونیک طلا/نیکل

مهرداد مرادی، داود رضوانی و سامان محمودی

پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان

چکیده – کریستال‌های مگنتوپلاسمونیک از قرار گرفتن یک فلز نجیب در کنار لایه‌های مغناطیسی ساخته می‌شوند. ضخامت‌های مناسب در بلور مگنتوپلاسمونیک طلا/نیکل برای افزایش اثر کِر به طور نظری مورد بررسی قرار گرفته است. در این ساختار از طلا به عنوان فلز پلاسمونیک و از نیکل به عنوان ماده‌ی مغناطیسی استفاده شده است. در ضخامت‌های ۹ و ۱۰ نانومتر به ترتیب برای طلا و نیکل در ساختار شیشه/طلا/نیکل بیشینه‌ی سیگنال کِر برابر ۱۶/۴۶ درجه در زاویه تابشی ۴۷ درجه به دست آمده است. در ضخامت‌های ۷ و ۱۳ نانومتر به ترتیب برای طلا و نیکل برای ساختار شیشه/نیکل/طلا بیشینه‌ی سیگنال کِر برابر ۲۴/۱۷ درجه در زاویه پرتو فرودی ۴۸ درجه بدست آمده است.

کلید واژه : اثر مگنتواپتیکی کِر، پلاسمون پلاریتون سطحی، مگنتوپلاسمونیک

Determination of the Optimum Thicknesses for amplifying the Magneto-Optical Kerr Effect using Surface Plasmon Polariton Resonance in Au/Ni Magneto-plasmonic Crystal

M. Moradi, D. Rezvani, S. Mahmoodi

Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract- Magneto-plasmonic crystals formed by a plasmonic layer near a magnetic layer. In this paper, the optimal thicknesses of magneto-plasmonic crystal Au/Ni for enhancement of magneto-optical Kerr effect (MOKE) have been investigated theoretically. In Glass/Au/Ni structure gold and nickel used as plasmonic and magnetic materials respectively. The maximum Kerr signal 16.46 degree was obtained by 9 nm thick film of gold and 10 nm thick of nickel layer in Glass/Au/Ni structure at 47 degree of incident angle. Also, the maximum Kerr signal 24.17 degree was obtained by 7 nm thickness of Gold layer and 13 nm thickness of Nickel layer in Glass/Ni/Au structure at 48 degree of incident angle.

Keyword: Magneto-optical Kerr effect, Surface plasmon polariton, Magneto plasmonic

[Downloaded from opsi.ir on 2026-05-31]

۱- مقدمه

استفاده از اثرات مگنتواپتیکی[1] از جمله روش‌های دقیق برای مطالعه خواص مغناطیسی مواد هستند. اثر مگنتواپتیکی کِر[2] با محاسبه بستگی ضرایب اپتیکی سطح ماده مغناطیسی به اندازه و جهت مغناطش ماده امکان مطالعه دینامیک میدان اعمالی بر حوزه‌های مغناطیسی را فراهم می‌کند. اثر مگنتواپتیکی کِر به صورت معمول ضعیف است و برای بهره‌گیری از آن برای مطالعه مواد مغناطیسی باید بدون تغییر در مغناطش ماده آن را تقویت کرد. پلاسمون به صورت کوانتای نوسانات الکترون‌های آزاد تعریف می‌شود. از یک فلز پلاسمونی می‌توان برای ایجاد ساختار مگنتوپلاسمونی[3] بهره برد. موج پلاسمون‌پلاریتون سطحی زمانی انتشار می‌یابد که نوسانات پلاسمون با امواج الکترومغناطیسی جفت شوند. با انتخاب مناسب خصوصیات ساختار می‌توان به بهینه حالت رفتار همزمان پلاسمونیک و مگنتواپتیکی ساختار رسید. در این حالت پدیده پلاسمونی باعث تقویت پاسخ مگنتواپتیکی ساختار می‌شود [۱]. از عوامل مهم در افزایش اثر مگنتواپتیکی کِر، دستیابی به بیشترین جفت‌شدگی و تحریک تشدید پلاسمون پلاریتون سطحی است. این امر با بدست آوردن ضخامت بهینه لایه‌ها محقق می‌شود. در این مقاله ضخامت بهینه‌ی لایه‌ها محاسبه و تاثیر ترتیب لایه‌ها برای تحریک پلاسمون‌پلاریتون سطحی برای افزایش اثر مگنتواپتیکی کِر بررسی شده است.

۲- مبانی نظری

بردار موج پلاسمون پلاریتون سطحی به صورت زیر تعریف می‌شود[۲]:

$$k_{spp} = k_0\sqrt{\frac{\varepsilon_m\varepsilon_d}{\varepsilon_m+\varepsilon_d}} \qquad (۱)$$

که در آن ε_m و ε_d به ترتیب گذردهی فلز و دی‌الکتریک هستند و k_0 عدد موج نور در هوا است.

به منظور تحریک پلاسمون‌پلاریتون سطحی، بایستی مولفه x بردار موج پرتو فرودی با بردار موج پلاسمون‌پلاریتون سطحی برابر شود. چند راهکار برای ایجاد جفت‌شدگی وجود دارد یکی از آنها استفاده از پیکربندی کرچمن[4] است. در این حالت نور قبل از اینکه به ساختار پلاسمونی برسد از منشور عبور می‌کند. با توجه به رابطه (۳) برای لایه دی‌الکتریک (منشور) با ضریب شکست بزرگتر از ضریب شکست لایه دی‌الکتریک ساختارپلاسمونیک به ازای زاویه‌ای خاص جفت‌شدگی اتفاق افتاده و موج پلاسمون پلاریتون سطحی انتشار می‌یابد.

$$k_0\sqrt{\varepsilon_{d0}}\sin\theta = k_0\sqrt{\frac{\varepsilon_m\varepsilon_d}{\varepsilon_m+\varepsilon_d}} \qquad (۳)$$

نتیجه تحریک پلاسمون‌پلاریتون سطحی کاهش در بازتاب نور است، در اثر مگنتواپتیکی کِر با کاهش بازتاب از ساختارافزایش اثرات مگنتواپتیک حاصل خواهد شد [۳].

در این مقاله از روش مبتنی بر روش ماتریس انتقال ۴×۴ استفاده شده است، که به وسیله آن می‌توان سیگنال کِر را در ساختارهای چند لایه بررسی کرد [۴]. در این روش برای ورود به مرز لایه ماتریس ۴×۴، A_i برای خروج از مرز لایه معکوس این ماتریس و برای انتشار نور در درون لایه ماتریس ۴×۴، D_i تعریف می‌شود. برای ساختار طلا/نیکل ماتریس M به صورت زیر بدست می‌آید:

$$M = A_{Glass}^{-1}A_{Au}D_{Au}\,A_{Au}^{-1}A_{Ni}D_{Ni}A_{Ni}^{-1}A_{Air} \qquad (۴)$$

ماتریس M را می‌توان به صورت یک ماتریس بلوکه‌ای۲×۲ نوشت:

$$M = \begin{bmatrix} G & H \\ I & F \end{bmatrix} \qquad (۵)$$

در نهایت ضرایب فرنل[5] به این شیوه بدست می‌آیند:

$$IG^{-1} = \begin{bmatrix} r_{ss} & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{pp} \end{bmatrix} \qquad (۶)$$

چرخش کِر θ_k و بیضی‌گونگی کِر ψ_k برای قطبش نور فرودی p بصورت:

$$\chi_p = \frac{r_{sp}}{r_{pp}} \qquad (۷)$$

[1] Magneto Optic (MO)
[2] Magneto Optic Kerr Effect (MOKE)
[3] Magneto-Plasmonic
[4] Kretschmann Configuration
[5] Fresnel Coefficients

[Downloaded from opsi.ir on 2026-05-31]

$$\theta_k^p = (\frac{1}{2})\, tan^{-1}(2Re(\chi_i)/1-|\chi_i|^2)$$
$$\psi_k^p = (\frac{1}{2})\, sin^{-1}(2Im(\chi_i)/1+|\chi_i|^2) \quad (۸)$$

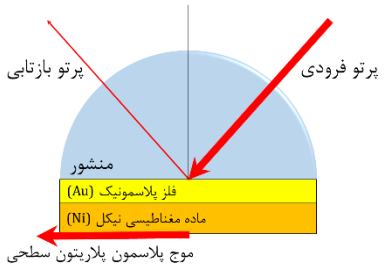
بدست می‌آیند [۵]. ضرایب شکست مواد و ضریب مگنتواپتیکی نیکل [۶، ۷] که در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول ۱ آمده‌اند.

جدول۱: ضرایب شکست و ضریب مگنتواپتیکی مواد در طول‌موج ۶۳۲/۸ نانومتر.

ماده	ضریب شکست	ضریب مگنتواپتیکی
شیشه	۱/۵۱۵	۰
طلا	۰/۱۹۷۱ + ۳/۰۸۹۹ i	۰
نیکل	۲/۰۲ + ۳/۸۲ i	۰/۰۰۵۶ − ۰/۰۰۲۴ i
هوا	۱	۰

۳- انجام محاسبات

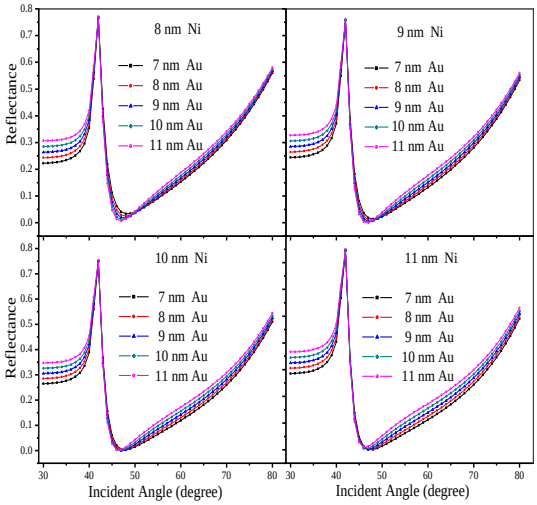
در این مقاله محاسبات در هندسه قطبی و با نور فرودی دارای قطبش p با طول‌موج ۶۳۲/۸ نانومتر در پیکربندی کرچمن انجام شده است. شکل (۱) این پیکربندی را به صورت طرحوار نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ضخامت شیشه نسبت به طول‌موج نور بسیار بزرگ است، در محاسبات فرض شده است، که نور در محیط شیشه با ابعاد بی‌نهایت انتشار می‌یابد.



شکل ۱: کریستال مگنتوپلاسمونیک بر پایه پیکربندی کرچمن.

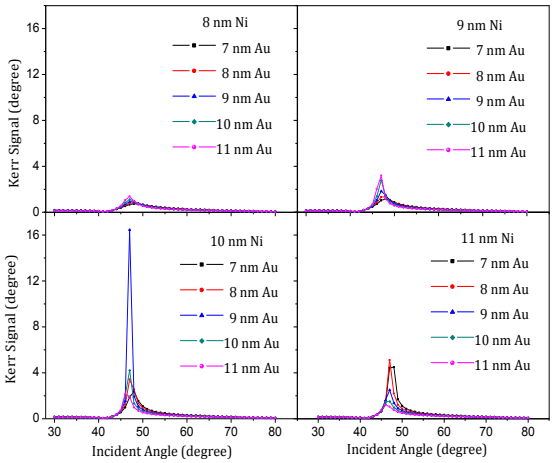
بازتاب از ساختار شیشه/طلا/نیکل برای ضخامت‌های مختلف از لایه‌های طلا و نیکل به ازای زوایای تابشی مختلف محاسبه شده نتایج در شکل (۲) نمایش داده شده است. با دقت در شکل در تمامی حالات یک کمینه بازتاب در حوالی زاویه تابشی ۴۶ درجه پرتو تابشی مشاهده می‌شود. این کمینه بازتاب ناشی از تحریک پلاسمون‌پلاریتون سطحی می‌باشد.

سیگنال کِر که عامل بسیار مهم در اندازه‌گیری تجربی اثر کِر می‌باشد و به صورت $S = \sqrt{\theta^2 + \psi^2}$ تعریف می‌شود.



شکل۲: بازتاب از ساختار شیشه/طلا/نیکل در پیکربندی کرچمن در ضخامت‌های مختلف طلا و نیکل به ازای زاویه‌های ۳۰ تا ۹۰ درجه تابش فرودی.

به منظور تحقیق افزایش اثر کِر در اثر تحریک پلاسمون‌پلاریتون سطحی سیگنال کِر بر حسب زوایای تابشی مختلف در ضخامت‌های مختلف طلا و نیکل محاسبه شده در شکل (۳) نمایش داده شده است. در زاویه تابشی که منحنی بازتاب کمینه بازتاب را نشان می‌داد بیشینه سیگنال کِر بدست می‌آید. در این ساختار بیشترین سیگنال کِر برای حالت ۱۰ نانومتر نیکل و ۹ نانومتر طلا بدست آمده و برابر با ۱۶/۴۶ درجه است.

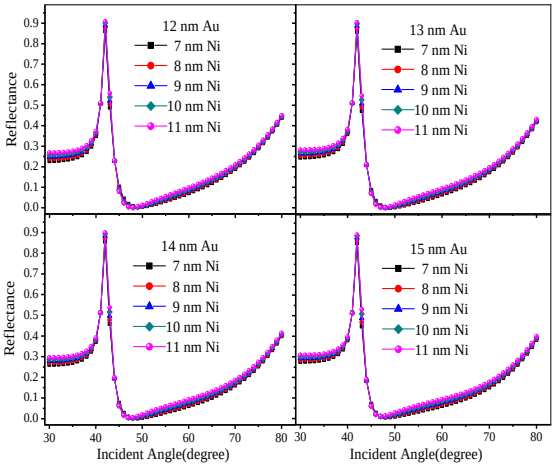


شکل۳ : سیگنال کِر در پیکربندی کرچمن برای ساختار شیشه/طلا/نیکل در ضخامت‌های مختلف طلا و نیکل به‌ازای زاویه‌های۳۰ تا ۹۰ درجه تابش فرودی رسم شده است.

برای بررسی تاثیر ترتیب لایه‌های و اهمیت قرار گرفتن لایه پلاسمونیک در معرض لایه دی‌الکتریک محاسبات دوباره تکرار شده این بار ساختار منشور/نیکل/طلا مورد

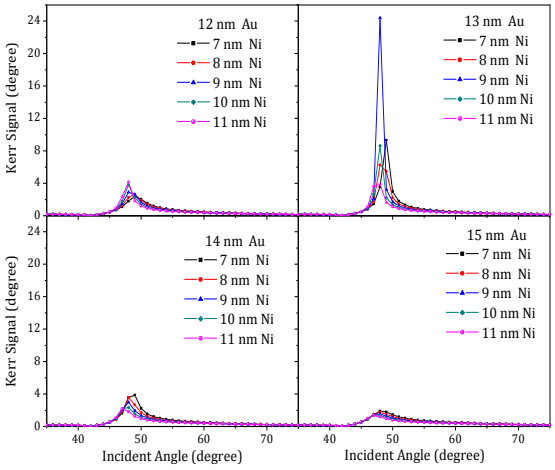
[Downloaded from opsi.ir on 2026-05-31]

بررسی قرار می‌گیرد. بازتاب از ساختار شیشه/نیکل/طلا مورد بررسی قرار گرفته بازتاب از آن برای ضخامت‌های مختلف از لایه‌های نیکل و طلا در زوایای تابشی مختلف محاسبه شده نتایج در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل ۴: بازتاب از ساختار شیشه/نیکل/طلا در پیکربندی کرچمن در ضخامت‌های مختلف طلا و نیکل به ازای زاویه‌های مختلف تابش فرودی.

بررسی ساختار ادامه یافته برای تمامی ساختارهای شکل (۴) سیگنال کِر بر حسب زاویه پرتو فرودی در ضخامت‌های مختلف لایه نیکل و طلا محاسبه شده و نتایج در شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل ۵ : سیگنال کِر در پیکربندی کرچمن برای ضخامت‌های مختلف نیکل و طلا به ازای زاویه‌های ۳۰ تا ۹۰ درجه تابش فرودی رسم شده است.

مشاهده می‌شود که در زاویه فرودی که تحریک پلاسمون‌پلاریتون سطحی اتفاق افتاده افزایش سیگنال کِر اتفاق افتاده است. مشاهده می‌شود در ساختار شیشه/نیکل (۱۳ نانومتر)/طلا (۷ نانومتر) تحریک شدید موج پلاسمون‌پلاریتون اتفاق افتاده در نتیجه بیشینه سیگنال کِر ۲۴/۱۷ درجه بدست آمده است که ۸/۸۵ برابر حالت بدون اثرات پلاسمونیک است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

محاسبات بیشینه سیگنال کِر ۱۶/۴۶درجه را در ساختار شیشه/طلا (۹ نانومتر)/نیکل (۱۰ نانومتر) در زاویه پرتو فرودی ۴۷ درجه و بیشینه سیگنال کِر را ۲۴/۱۷ درجه در ساختار شیشه/نیکل (۷ نانومتر)/طلا (۱۳ نانومتر) در زاویه پرتوفرودی ۵۱ درجه نشان داد. در ساختار شیشه/طلا/نیکل بیشینه سیگنال کِر به مقدار ۲۲/۸۶ برابر حالت بدون قرار گرفتن طلا و در ساختار شیشه/نیکل/طلا بیشینه سیگنال کِر به مقدار ۸/۸۵ برابر حالت بدون قرار گرفتن طلا بدست آمد. این افزایش به دلیل حضور طلا و ایجاد موج پلاسمون‌پلاریتون سطحی در ساختار مگنتوپلاسمونیک است. همچنین مشاهده شد که در ساختار شیشه/نیکل/طلا، به این دلیل که لایه طلا در مجاورت لایه دی‌الکتریک یعنی هوا قرار گرفت بیشینه سیگنال کِر بزرگتری نسبت به حالت شیشه/طلا/نیکل بدست آمد.

۵- مراجع

[1] E. Ferreiro-Vila, J. B. González-Díaz, R. Fermento, M. U. González, A. García-Martín, J. M. García-Martín, A. Cebollada, and G. Armelles, *Intertwined magneto-optical and plasmonic effects in Ag/Co/Ag layered structures*, **Phys Rev B**, 80 (2009) 125132.

[2] H. Raether, *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*, **Springer Tractsin Modern Physics**, 111(1988) 4-39.

[3] Y. Demidenko, D. Makarov, O. G. Schmidt, and V. Lozovski, *Surface plasmon-induced enhancement of the magneto-optical Kerr effect in magnetoplasmonicheterostructures*,**J. Opt. Soc. Am. B**, 28 (2011) 2115.

[4] J. Zak, E. R. Moog, C. Liu and S. D. Bader, *Universal Approach to Magneto-Optics*, **J. Magn. Magn. Mater.** 89 (1990) 107.

[5] Chun-Yeol You, Sung-Chul Shin, *Generalized analytic formulae for magneto-optical Kerr effects*, **J. Appl. Phys**. 84 (1998) 541.

[6] Johnson, P. B. and Christy, R. W., *Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, andPd*, **Phys Rev B**, 9 (1974) 5056.

[7] Palik, Edward D., *Handbook of Optical Constants of Solids*,**Academic Press Boston**, 1985.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-05-31]