



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



## تعیین ضخامت‌های بهینه به منظور افزایش اثر مگنتوپتیکی کر 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 کر 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 کر 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 کر برابر ۲۴/۱۷ درجه در زاویه پرتو فرودی ۴۸ درجه بدست آمده است.

کلید واژه: اثر مگنتوپتیکی کر، 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

۱- مقدمه

به منظور تحریک پلاسمون پلاریتون سطحی، بایستی مولفه  $x$  بردار موج پرتو فرودی با بردار موج پلاسمون پلاریتون سطحی برابر شود. چند راهکار برای ایجاد جفت‌شدگی وجود دارد یکی از آنها استفاده از پیکربندی کرچمن<sup>۴</sup> 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 ساختار پلاسمونیک به ازای زاویه‌ای خاص جفت‌شدگی اتفاق افتاده و موج پلاسمون پلاریتون سطحی انتشار می‌یابد.

$$k_0 \sqrt{\varepsilon_{a0}} \sin \theta = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}} \quad (3)$$

نتیجه تحریک پلاسمون پلاریتون سطحی کاهش در بازتاب نور است، در اثر مگنتوآپتیکی کر با کاهش بازتاب از ساختار افزایش اثرات مگنتوآپتیک حاصل خواهد شد [۳].

در این مقاله از روش مبتنی بر روش ماتریس انتقال  $4 \times 4$  استفاده شده است، که به وسیله آن می‌توان سیگنال کر را در ساختارهای چند لایه بررسی کرد [۴]. در این روش برای ورود به مرز لایه ماتریس  $4 \times 4$ ،  $A_i$  برای خروج از مرز لایه معکوس این ماتریس و برای انتشار نور در درون لایه ماتریس  $4 \times 4$ ،  $D_i$  تعریف می‌شود. برای ساختار طلا/نیکل ماتریس  $M$  به صورت زیر بدست می‌آید:

$$M = A_{Glass}^{-1} A_{Au} D_{Au} A_{Au}^{-1} A_{Ni} D_{Ni} A_{Ni}^{-1} A_{Air} \quad (4)$$

ماتریس  $M$  را می‌توان به صورت یک ماتریس بلوکه‌ای  $2 \times 2$  نوشت:

$$M = \begin{bmatrix} G & H \\ I & F \end{bmatrix} \quad (5)$$

در نهایت ضرایب فرنل<sup>۵</sup> به این شیوه بدست می‌آیند:

$$IG^{-1} = \begin{bmatrix} r_{ss} & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (6)$$

چرخش کر  $\theta_k$  و بیضی‌گونگی کر  $\psi_k$  برای قطبش نور فرودی  $p$  بصورت:

$$\chi_p = \frac{r_{sp}}{r_{pp}} \quad (7)$$

استفاده از اثرات مگنتوآپتیکی<sup>۱</sup> از جمله روش‌های دقیق برای مطالعه خواص مغناطیسی مواد هستند. اثر مگنتوآپتیکی کر<sup>۲</sup> 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 مگنتوآپتیکی کر 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<sup>۳</sup> بهره برد. موج پلاسمون پلاریتون 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 مگنتوآپتیکی ساختار رسید. در این حالت پدیده پلاسمونی باعث تقویت پاسخ مگنتوآپتیکی ساختار می‌شود [۱]. از عوامل مهم در افزایش اثر مگنتوآپتیکی کر، 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 پلاسمون پلاریتون سطحی برای افزایش اثر مگنتوآپتیکی کر بررسی شده است.

۲- مبانی نظری

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

$$k_{spp} = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}} \quad (1)$$

که در آن  $\varepsilon_m$  و  $\varepsilon_d$  به ترتیب گذردهی فلز و دی‌الکتریک هستند و  $k_0$  عدد موج نور در هوا است.

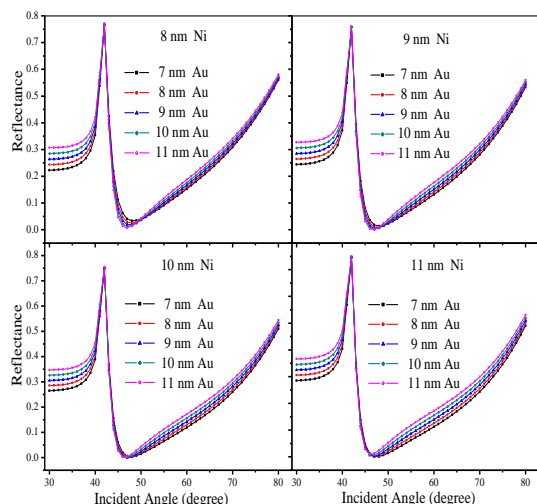
<sup>4</sup> Kretschmann Configuration

<sup>5</sup> Fresnel Coefficients

<sup>1</sup> Magneto Optic (MO)

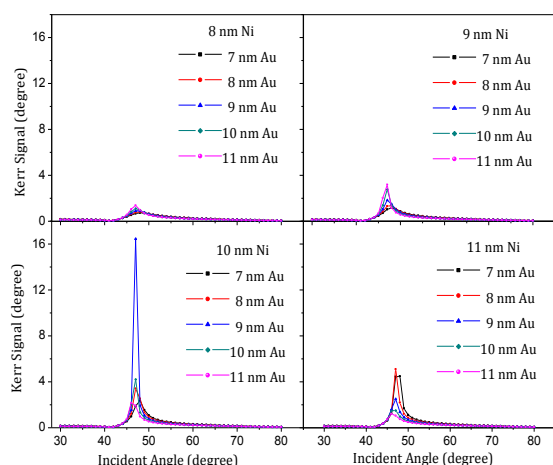
<sup>2</sup> Magneto Optic Kerr Effect (MOKE)

<sup>3</sup> Magneto-Plasmonic



شکل ۲: 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 کر در اثر تحریک پلاسمون پلاریتون سطحی سیگنال کر 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 کر بدست می‌آید. در این ساختار بیشترین سیگنال کر برای حالت ۱۰ نانومتر نیکل و ۹ نانومتر طلا بدست آمده و برابر با ۱۶/۴۶ درجه است.



شکل ۳: سیگنال کر در پیکربندی کرچمن برای ساختار شیشه/طلا/نیکل در ضخامت‌های مختلف طلا و نیکل به ازای زاویه‌های ۳۰ 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

$$\theta_k^p = \left(\frac{1}{2}\right) \tan^{-1}(2\text{Re}(\chi_i)/1 - |\chi_i|^2) \quad (8)$$

$$\psi_k^p = \left(\frac{1}{2}\right) \sin^{-1}(2\text{Im}(\chi_i)/1 + |\chi_i|^2)$$

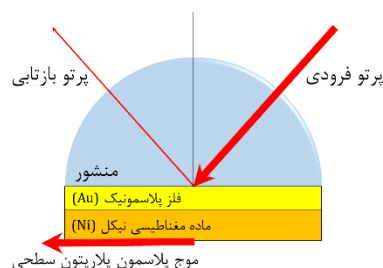
بدست می‌آیند [۵]. ضرایب شکست مواد و ضریب مگنتوآپتیکی نیکل [۶، ۷] که در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول ۱ آمده‌اند.

جدول ۱: ضرایب شکست و ضریب مگنتوآپتیکی مواد در طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر.

ماده	ضریب شکست	ضریب مگنتوآپتیکی
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 طول موج 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 طول موج 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 پلاسمون پلاریتون سطحی می‌باشد.

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

پلاسمون پلاریتون اتفاق افتاده در نتیجه بیشینه سیگنال کِر ۲۴/۱۷ درجه بدست آمده است که ۸/۸۵ برابر حالت بدون اثرات پلاسمونیک است.

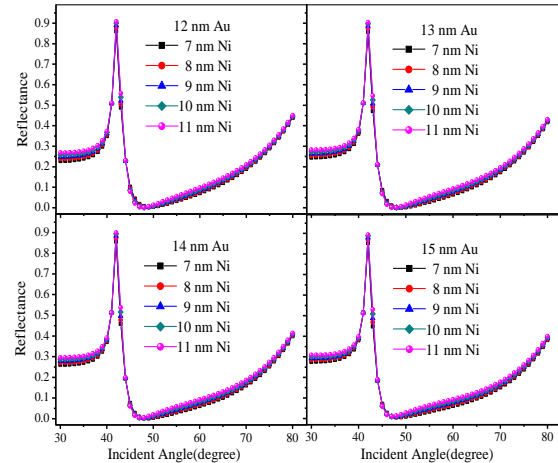
#### ۴- بحث و نتیجه گیری

محاسبات بیشینه سیگنال کِر ۱۶/۴۶ درجه 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 پرتو فرودی ۵۱ درجه نشان داد. در ساختار شیشه/طلا/نیکل بیشینه سیگنال کِر به مقدار ۲۲/۸۶ برابر حالت بدون 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 پلاسمون پلاریتون سطحی در ساختار مگنتوپلاسمونیک است. همچنین مشاهده شد که در ساختار شیشه/نیکل/طلا، به این دلیل که لایه طلا در مجاورت لایه دی الکتریک یعنی هوا قرار گرفت بیشینه سیگنال کِر بزرگتری نسبت به حالت شیشه/طلا/نیکل بدست آمد.

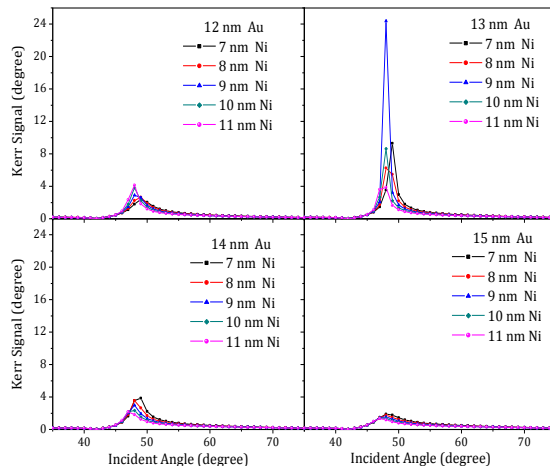
#### ۵- مراجع

- [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 Tracts in 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, and Pd*, **Phys Rev B**, 9 (1974) 5056.
- [7] Palik, Edward D., *Handbook of Optical Constants of Solids*, **Academic Press Boston**, 1985.

بررسی قرار می گیرد. بازتاب از ساختار شیشه/نیکل/طلا مورد بررسی قرار گرفته بازتاب از آن برای ضخامت های مختلف از لایه های 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 ضخامت های مختلف طلا و نیکل به ازای زاویه های مختلف تابش فرودی. بررسی ساختار ادامه یافته برای تمامی ساختارهای شکل (۴) سیگنال کِر بر حسب زاویه پرتو فرودی در ضخامت های مختلف لایه نیکل و طلا محاسبه شده و نتایج در شکل (۵) نمایش داده شده است.



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

مشاهده می شود که در زاویه فرودی که تحریک پلاسمون پلاریتون سطحی اتفاق افتاده افزایش سیگنال کِر اتفاق افتاده است. مشاهده می شود در ساختار شیشه/نیکل (۱۳ نانومتر)/طلا (۷ نانومتر) تحریک شدید موج