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

بررسی تشدید پلاسمون سطحی در لایه‌ی طلا با استفاده از هندسه‌ی کرشمن: رویکرد محاسباتی-تجربی

حسین گودرزی و سیده مهری حمیدی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده - این مقاله درصدد یافتن پاسخ زاویه ای پلاسمون های سطحی در مرز فلز-دی الکتریک است که با استفاده از منشور کرشمن به عنوان دی الکتریک و طلا به عنوان فلز می توان نمودار انعکاس بر حسب زاویه را ترسیم و زاویه ی تشدید را یافت که نتایج حاصل از محاسبات، به کمک چیدمان تجربی مورد تایید قرار گرفت. محاسبات تئوری بر پایه روش ماتریس مشخصه لایه ها انجام گردیده و وابستگی تشدید پلاسمون سطحی به ضخامت لایه طلا مورد بررسی قرار گرفت. چیدمان کرشمن به کمک لیزر هلیوم-نئون و منشور *BK7* حاوی لایه های کروم و طلا برپاگردید و تطابق خوبی بین نتایج تئوری و تجربی مشاهده شده است.

کلید واژه- پاسخ زاویه ای، تشدید پلاسمون سطحی، ماتریس عبور مشخصه.

Investigation of Surface Plasmon Resonance in Gold layers based on the kretschmann configuration: Theoretical and experimental approach

Hossein Goudarzi and Seyyedeh Mehri Hamidi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran.

Abstract- In this study we attempt to obtain the angular response of surface plasmons in Metal-Dielectric interface. By use of a prism (BK7) as dielectric and Gold thin film as a metal, an abrupt dip is observed in reflectance-incident angle diagram that the corresponding angle of dip in reflectance is "resonance angle". Our theoretical investigation has been carried out on the dependence of resonance angle on the thicknesses of Gold thin films based on Characteristic Transmission Matrix method. Contrary in experimental configuration, we use a He-Ne polarized laser as light source. Our results show the good agreement between theoretical and experimental result.

Keywords: angular response, Characteristic Transmission Matrix, surface plasmon resonance

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-21]

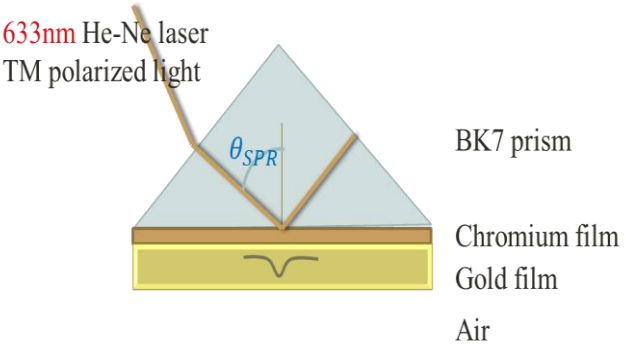
۱- مقدمه

تشدید پلاسمون های سطحی در لایه های فلزی برای سالهای متمادی از دهه ی ۱۹۷۰ به عنوان یک تکنیک مهم در مطالعات شیمیایی و حسگرهای زیستی کاربرد دارد[۱-۳]. روش های مختلفی برای ایجاد این تشدید موجود است از جمله استفاده از موجبرها، توری های پراش و منشور، که در استفاده از منشور دو هندسه ی اتو و کرشمن[1] بسیار پرکاربرد هستند. اساس کار در این مطالعه بر روی هندسه ی کرشمن استوار است که با استفاده از یک منشور که بر روی آن فلز با هر کیفیت دلخواهی لایه نشانی شده است پلاسمون های سطحی تحریک شده و با تغییرات زاویه ی فرود به فصل مشترک منشور-فلز میتوان زاویه ای را که در آن نور فرودی با پلاسمون های سطحی جفت می شود را بدست آورد. در این زاویه که به «زاویه ی تشدید» موسوم است نمودار انعکاس بر حسب زاویه ی فرود دارای یک افت عمیق ناگهانی است و این به معنای آن است که در زاویه تشدید، نور فرودی به فصل مشترکِ فلز-دی الکتریک جذب شده و انرژی آن صرف ایجاد نوسانات پلاسمونی شده است. این نور فرودی حتما باید دارای قطبش TM باشد تا شرط جفت شدگی بین مولفه ی مماسِ بردار موج نور و مولفه ی مماسِ بردار موج پلاسمون های سطحی را فراهم آورد. برای یافتن انعکاس کافی است که یک آشکارساز نوری بر سر راه نور پراکنده شده از سطح فلز قرار بدهیم و یک آشکارساز نوری دیگر را مامور اندازه گیری نور فرودی اولیه نماییم و با کم کردن این دو مقدار از هم می توان به توان دقیق بازتابی دست یافت.

۲- پایه های تئوری

۲--۱هندسه ی کرشمن

همانکونه که پیش از این گفته شد تشدید پلاسمون های سطحی پدیده ای است که با نور قطبش یافته ی TM به وجود می آید و همان نوسانات دسته جمعی الکترون ها در مرز فلز-دی الکتریک است و هندسه ی کرشمن مطابق شکل ۱ عبارت است از بهره گیری از یک منشور به عنوان دی الکتریک و لایه نشانی فلز بر روی یکی از رئوس منشور. لازم به توضیح است که هندسه ی اتو نیز شبیه همین هندسه است با این تفاوت که بین منشور و فلز یک فاصله تعبیه شده که با هوا پر می شود.



شکل۱: هندسه ی کرشمن در چیدمان تجربی

با حل معادلات ماکسول و اعمال شرایط مرزی، مهم ترین شرطی که برای ایجاد این پدیده در قطبش TM به دست می آید شرطی است که ایجاب می کند توابع دی الکتریک فلز و دی الکتریک مختلف العلامه باشند:

$$\frac{k_{zs}}{\varepsilon_s} = -\frac{k_{zm}}{\varepsilon_m} \qquad (۱)$$

که k_{zm} و k_{zs} به ترتیب مولفه های عمود بر مرزِ بردار موج و ε_m و ε_s توابع دی الکتریک فلز و دی الکتریک هستند. در اینجا دی الکتریک همان منشور BK7 و فلز طلا است.

همچنین شرط دوم برای ایجاد جفت شدگی، برابر شدن مولفه های مماسی بردار موج در دو محیط است، بطوریکه:

$$k_{xs} = k_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_p \sin\theta \qquad (۲)$$

$$k_{xm} = k_{SP} = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_p}{\varepsilon_m + \varepsilon_p}} \qquad (۳)$$

که باید این دو با هم برابر باشند تا تشدید رخ دهد:

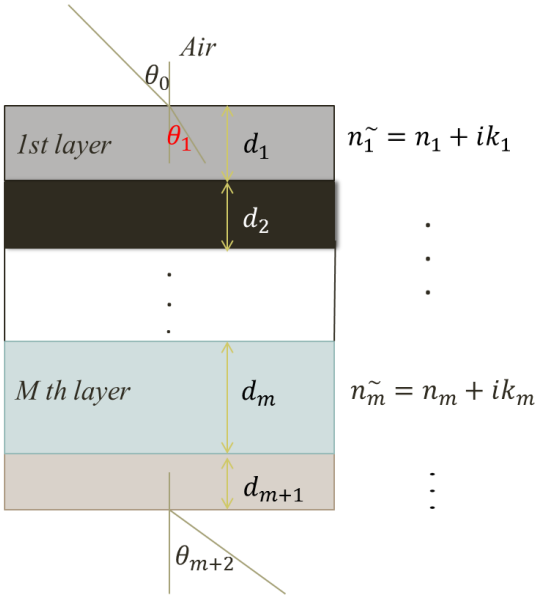
$$\theta = \theta_{SP} = \sin^{-1}\sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_p}{\varepsilon_p(\varepsilon_m + \varepsilon_p)}} \qquad (۴)$$

[1] Otto & Kretschmann configuration

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-21]

اندیس های p و m به ترتیب مربوط به منشور و فلز می باشند و θ_{SP} زاویه ی تشدید پلاسمون های سطحی است.

۲-۲- روش ماتریس عبور مشخصه



شکل۲: طرحواره ای از یک چندلایه ای فیلم نازک با ضرایب شکست مختلط و ضخامت های مختلف

اساس کار این روش استفاده از ماتریس ها برای بدست آوردن ویژگی های اپتیکی یک سیستم چندلایه ای است . همانگونه که در شکل ۲ ملاحظه می شود هرلایه یک ضریب شکست n و یک ثابت میرایی k با ضخامت معین d دارد . برای هر لایه یک ماتریس عبورِ M_m به شکل زیر تعریف می شود:

$$M_m = \begin{pmatrix} \cos\beta_m & \frac{-i}{q_m}\sin\beta_m \\ \frac{+i}{q_m}\sin\beta_m & \cos\beta_m \end{pmatrix} \qquad (۵)$$

در این صورت برای یک سیستم N لایه ای خواهیم داشت:

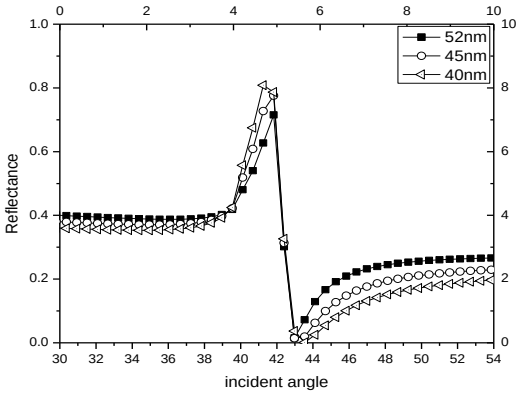
$$M_{tot} = \prod_{m=1}^{N} M_m \qquad (۶)$$

که در این روابط $q_m = \frac{n_m}{\cos\theta_m}$ و $\beta_m = k_0 q_m$ می باشند..همچنین روابط زیر برای ضریب فرنل بازتاب r و ضریب انعکاس R قابل استخراج هستند:

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12}q_f)q_i - (M_{21} + M_{22}q_f)}{(M_{11} + M_{12}q_f)q_i + (M_{21} + M_{22}q_f)} \qquad (۷)$$

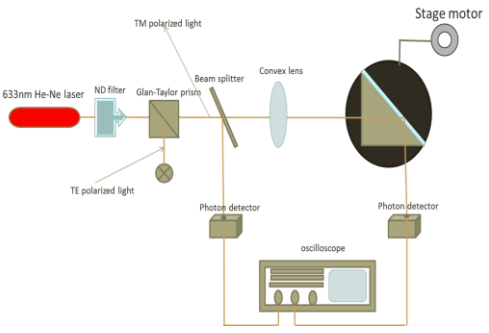
$$R = rr^* \qquad (۸)$$

در این روابط q_i و q_f پارامترهای محیط های اول و آخر هستند که در این بررسی محیط اول منشور و محیط آخر(محیط چهارم) هوا است. شکل ۴ انعکاس را بر حسب زاویه ی فرود ترسیم نموده است. قابل مشاهده است که زاویه تشدید پلاسمون سطحی در نمونه به ازای تغییر در ضخامت لایه طلا تغییر یافته و برای نمونه ای با ضخامت ۵۲ نانومتر، این تشدید در زاویه ۴۲/۸ درجه رخ داده است.



شکل۴: مشاهده ی نظری تشدید پلاسمون سطحی در زاویه ی۴۲.۸ درجه

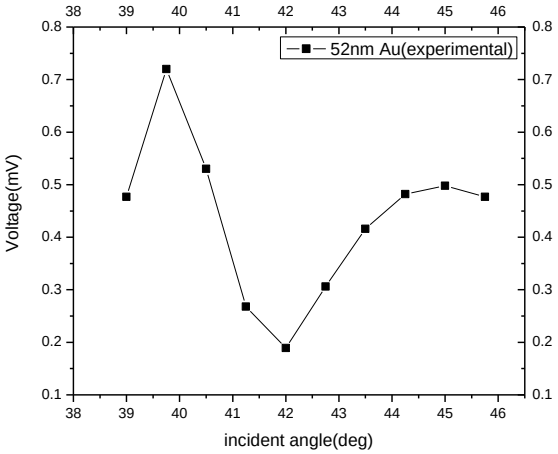
۳- پیکربندی تجربی و تکنیک اندازه گیری



شکل۵: چیدمان تجربی سامانه ی حساسیت سنجی تشدید پلاسمون سطحی هندسه ی کرشمن در تعدیل سازی زاویه ای

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-21]

مطابق شکل۵ شدت نور لیزرِ هلیوم-نئون با استفاده از یک جاذب نور کم می شود. سپس یک منشور گلن-تیلور[۲] برای جداسازی قطبش های TM و TE مورد استفاده قرار می گیرد که ما تنها از قطبش TM استفاده می نماییم. دونیم کننده ی پرتو باید به گونه ای قرار گیرد که نیمی از نور فرودی را عبور و نیم دیگر را به آشکار ساز اول منعکس کند تا یک شاخص دقیق برای مقایسه ی شدت نور رسیده به آشکار ساز دوم در دست داشته باشیم و عدسی کوژ نیز برای متمرکز کردن بیشتر پرتو به منشور می باشد.



شکل۶: مشاهده ی تجربی تشدید پلاسمون سطحی در زاویه ی ۴۲.۲درجه

با اتصال دو آشکارساز به دستگاه نوسان نما می توان شدت نور بازتابی از منشور را آنالیز نمود. همچنین با استفاده از یک موتور چرخاننده ی دو محوری باید منشور و آشکارساز دوم را همزمان با هم چرخاند.

ضخامت	ضریب میرایی	ضریب شکست	
۲۵ میلی متر	صفر	۱.۵۶	منشور BK7

۵ نانومتر	۴.۳۶۲	۳.۷۱۹	کروم
۵۲ نانومتر	۲.۱۶۲	۰.۱۳۰	طلا
∞	صفر	۱	هوا

جدول۱: اطلاعات چندلایه ای مورد استفاده در چیدمان تجربی

۴- بحث و نتیجه گیری

روشی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته به تعدیل سازی زاویه ای معروف است که تنها زاویه ی فرود تغییر می یابد و بقیه ی پارامترها نظیر طول موج، شدت و فاز نور فرودی ثابت هستند. از نمودارها می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت لایه‌های طلا مقدار بیشینه ی انعکاس کاهش می‌یابد و در عوض در زوایای بزرگتر از زاویه ی تشدید بازیابی نمودار سریعتر انجام می‌شود. این تیزیِ زاویه ای به عنوان یک پارامتر مهم برای یافتن زاویه و ضخامت بحرانی که متناظر با حساسیت بیشینه هستند قابل بررسی است. نمودارهای تئوری و تجربی توافق خوب این دو را با هم نشان می دهند و همچنین ضخامت بحرانی را حدود ۵۲ نانومتر برای طلا به دست می دهد که بیشترین حساسیت و کمترین پهنا در نیمه ی بیشینه را دارا است و بهترین استفاده در امورات حساسیت سنجی در این ضخامت است که انجام می پذیرد. زاویه ی متناظر با کمینه ی شدت انعکاس در حدود ۴۲ درجه می باشد که از مشخصه های طلا به شمار می رود.

مراجع

[1] I. Pockrand, J. D. Swallen, J. G. Gordon and M.R. Philpott: Surf. Sci.74 (1978) 237–244.
[2] B. Liedberg, C. Nylander and I. Lunstro¨m: Sensor. Actuator. B 4 (1983) 299–304.
[3] A. Brecht and G. Gauglitz: Biosens. Bioelectron. 10 (1995) 923–936.
[4] H. R. Gwon and S. H. Lee: Materials Transactions, Vol. 51, No. 6 (2010) pp. 1150 to 1155

[2] Glan-Taylor prism

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-21]