بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

# تشدید پلاسمون سطحی با باریکه‌ی شدیداً کانونی شده

**محمدرضا عقدائی[۱]، داریوش عبداله‌پور[۱]، جعفر مصطفوی امجد[۱] و رامین محمدخانی[۲]**

**[۱] دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، دانشکده فیزیک**

**[۲] دانشگاه زنجان، دانشکده علوم**

dabdollahpour@iasbs.ac.ir

**چکیده –پدیده‌ی تشدید پلاسمون سطحی دارای کاربردهای فراوانی از جمله در علم مواد، تولید دارو، تشخیص بیماری و تشخیص تغییرات اقلیمی است. تشدید پلاسمون سطحی یکی از روش‌های سنجش ضریب شکست مواد مختلف به طور ویژه، مایعات است. تاکنون روش‌های مختلفی برای آشکار سازی این پدیده پیشنهاد شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است که همگی بر پایه‌ی جاروب طول‌موج یا جاروب زاویه‌ی فرود به حسگر با تک طول‌موج است که هر دو روش دارای پیچیدگی‌هایی هستند. در این مقاله روشی ارائه می شود که با استفاده از باریکه‌ی شدیداً کانونی شده بدون نیاز به جاروب زاویه و جاروب طول‌موج می‌توان تشدید پلاسمون سطحی را آشکارسازی نمود. همچنین نتایج تجربی ارائه شده کارآمدی روش معرفی شده را تایید می‌کنند.**

کلید واژه- تشدید پلاسمون سطحی، باریکه‌ی شدیداً کانونی شده ، میکروسکوپی.

# Surface plasmon resonance with tightly focused beam

Mohammad Reza Aghdaee[1], Daryoush Abdollahpour[1], Jafar Mostafavi Amjad[1] and Ramin Mohamadkhani[2]

[1] Department of physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran
[2] Department of sciences, Zanjan university, Iran

dabdollahpour@iasbs.ac.ir

Abstract- surface plasmon resonance (SPR) phenomenon has various applications in martial sciences, pharmaceutical products, clinical diagnostics and detecting environmental changes. Surface plasmon resonance can be utilized for measuring refractive indices of different media specially liquids. Several configurations have been so far used for such measurement, and most of them are either based on scanning incidence angle or wavelength which lead complications for practical use. In this article we propose a method for SPR detection using tightly focused beam without the need for angle or wavelength scanning. Presented experimental results sufficiently verify the efficiency of the reported method.

Keywords: Surface plasmon resonance, Tightly focused beams, Microscopy.



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

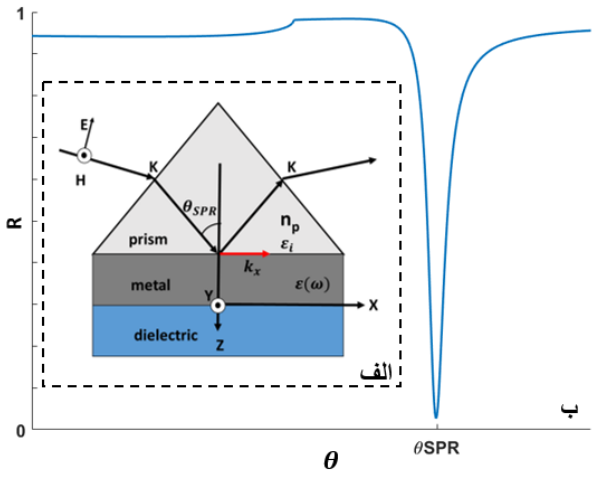
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19 ]

## مقدمه

جفت‌شدگی نور به الکترون‌های پلاسمون سطحی مواد، در شرایطی، می‌تواند باعث تشدید پلاسمون سطحی شود این پدیده برای اولین بار توسط وود(Wood) مشاهده شده است. از آنجایی که وقوع این پدیده به ضخامت و ضریب شکست ماده وابسته است می‌توان از آن به عنوان حسگر ضریب شکست استفاده کرد. این نوع از حسگرها شامل حداقل یک لایه فلز و یک لایه دی‌الکتریک است.

در ساده‌ترین نوع این حسگرها برای اندازه‌گیری محیط سنجش از ساختار کریشمن بر اساس بازتاب کلی استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۱ الف نشان داده شده است، ساختار کریشمن شامل یک زیرلایه دی‌الکتریک ، یک لایه نازک فلزی و محیط سنجش است. در بازتاب کلی در ناحیه‌ی زاویه‌های بزرگتر از زاویه‌ی حد، شدت نور بازتابی با شدت نور فرودی برابر بوده و ضریب بازتاب برابر یک خواهد بود. در صورتی که جفت‌شدگی نور فرودی به پلاسمون‌های لایه فلزی رخ دهد، ضریب بازتاب به مقدار کمتر از یک تقلیل می‌یابد. بنابراین تغییرات ضریب بازتاب به صورت تابعی از زاویه‌ی فرود خواهد بود (شکل ۱ ب). نمودار بازتاب بر حسب زاویه‌ی فرود، طیف زاویه ای بازتاب نامیده می‌شود. در صورت بروز تشدید طیف بازتاب در زاویه‌ی خاصی، که به آن زاویه‌ی تشدید پلاسمون سطحی گفته می‌شود، به مقدار کمینه خود می‌رسد. زاویه تشدید و پهنای طیف تشدید به ضریب شکست محیط سنجش وابسته است. در این روش برای آشکار سازی تشدید، جاروب زاویه‌ی فرود ضروری است. علی‌رغم سادگی چیدمان فوق، جاروب زاویه زمانبر بوده و برای بررسی نمونه‌های دارای تحول زمانی مناسب نیست.

در این مقاله روشی برای آشکارسازی تشدید پلاسمون سطحی معرفی می‌شود که در آن نیازی به جاروب زاویه‌ی فرود وجود ندارد. اساس این روش بر پایه‌ی میکروسکوپی با باریکه‌ی شدیداً کانونی شده استوار است. در روش معرفی شده تابش نور فرودی در بازه‌ی بزرگی از زاویه‌ها، به صورت همزمان انجام شده و به طور مشابه شدت نور بازتابی در تمامی زاویه‌ها به صورت همزمان آشکارسازی می‌شود. بنابراین امکان سنجش نمونه‌های مختلف به صورت بر خط زمانی میسر است.




شکل ۱الف: ساختار حسگر کریشمن بر پایه‌ی تشدید پلاسمون سطحی.شکل ۱ب: طیف پلاسمون سطحی برای تشدید در زاویه‌ی $\theta_{spr}$.

## مبانی تشدید پلاسمون سطحی

تشدید پلاسمون بر مبنای نوسان پلاسمون‌های سطحی توسط امواج الکترومغناطیسی عرضی در فصل مشترک فلز-دی‌الکتریک ایجاد می‌شود که آن را موج پلاسمون سطحی می‌نامند. در تشدید پلاسمون سطحی جهت قطبش نور نقش مهمی در تحریک پلاسمون سطحی دارد. در ساختار کریشمن اگر مولفه مماسی بردار موج فرودی ($k_x$) با بردار موج پلاسمون سطحی($k_{spr}$) برابر باشد، تشدید رخ خواهد داد(شکل ۱ الف).

در مرز مشترک فلز-دی‌الکتریک بردار موج پلاسمون سطحی از رابطه‌ی ۱ قابل محاسبه است. در این رابطه $\varepsilon_1$ ثابت دی‌الکتریک زیرلایه ، $\varepsilon(\omega)$ تابع دی‌الکتریک محیط فلزی ، $\omega$ فرکانس نور فرودی و $c$ سرعت نور در خلا است



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19 ]

$$k_{spr} = \frac{\omega}{c}\left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon(\omega)}{\varepsilon_1+\varepsilon(\omega)}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

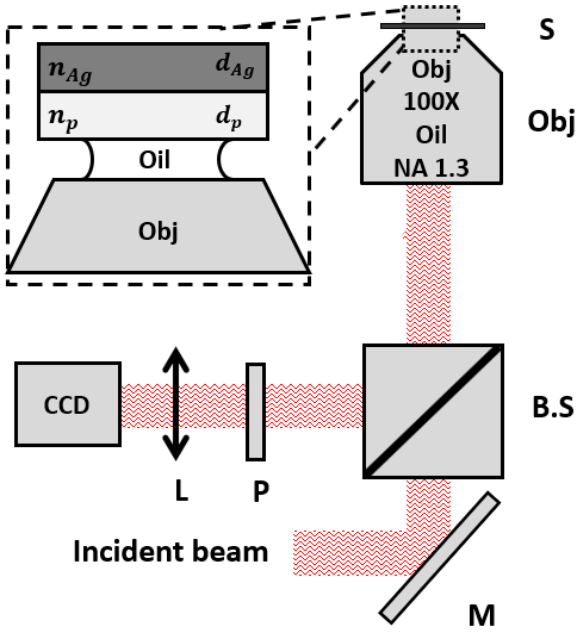
مولفه مماسی بردار موج نورفرودی برای زیرلایه‌ای با ضریب شکست $n_p$ به صورت $k_x = n_p \frac{\omega}{c}\sin\theta$ محاسبه می‌شود. در تشدید پلاسمون سطحی با مساوی قرار دادن $k_x$ و $k_{spr}$ زاویه‌ی تشدید را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\sin\theta_{spr} = \frac{1}{n_p}\left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon(\omega)}{\varepsilon_1+\varepsilon(\omega)}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

در ساختار کریشمن که از سه لایه تشکیل شده است با اعمال شرایط مرزی مناسب می‌توان $\theta_{spr}$ را با روشی مشابه محاسبه کرد. در این حالت زاویه‌ی تشدید، تابعی از ضخامت لایه‌ی فلزی، ضریب شکست زیرلایه و ضریب شکست محیط سنجش است[۲].

## تشدید پلاسمون سطحی با استفاده از عدسی شیئی میکروسکوپی

از آنجایی که تشدید پلاسمون سطحی در یک زاویه‌ی منحصر به فرد، $\theta_{spr}$، رخ می‌دهد بجای جاروب زاویه فرود از یک عدسی شیئی با گشودگی عددی بالا استفاده می‌شود. در این مقاله از یک عدسی شیئی روغنی با گشودگی عددی (NA) ۱/۳ و بزرگنمایی ۱۰۰x بهره گرفته شده است که می‌تواند زاویه‌ی فرودی در محدودی ۰ تا ۶۰ درجه را پوشش دهد. شکل ۲ طرحواره کلی چیدمان میکروسکوپی مورد استفاده را نمایش می‌دهد که در آن حسگر از یک لایه دی‌الکتریک سودا لایم با ضریب شکست ۱/۵۱۸ ($n_p$) و ضخامت ۱۲۰ میکرومتر ($d_p$) و لایه‌ی فلزی نقره با ضریب شکست $0/056+4/27i$ ($n_{Ag}$) به ضخامت ۵۰ نانومتر ($d_{Ag}$) استفاده شده است. چیدمان استفاده شده شامل یک لیزر هلیوم نئون با طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر و قطبش بیضوی با نسبت قطر بزرگ به کوچک ۱۰ به ۱ است باریکه لیزر به صورت موازی شده به قطر ۷ میلیمتر (پهنای کامل در نصف بیشینه) به باریکه‌شکن برخورد کرده و سپس وارد عدسی شیئی شده و به حسگر تابیده می‌شود. نور بازتابیده از سطح حسگر به باریکه‌شکن برخورد کرده و پس از انعکاس از آن و عبور از یک تحلیلگر قطبشی به سیستم تصویرساز می‌رسد. سیستم تصویرساز از یک عدسی با فاصله کانونی ۵۵ میلیمتر و یک دوربین ۱۲ بیتی (Basler) تشکیل شده است که در فاصله‌ی ۵۰ میلیمتری از هم قرار گرفته‌اند.



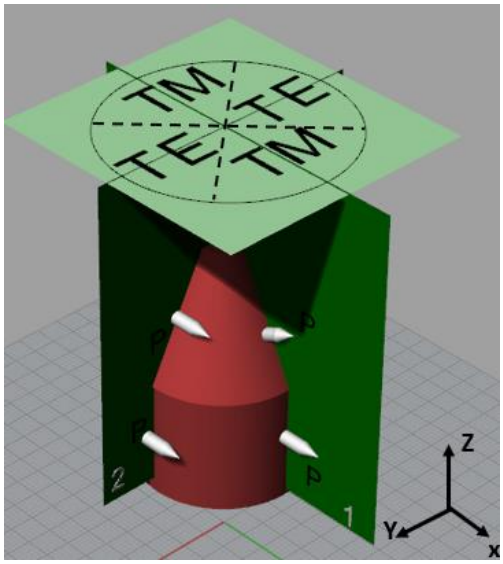

شکل ۲: طرحواره کلی چیدمان میکروسکوپی. عدسی شیئی (Obj)، باریکه‌شکن (B.S)، آینه (M)، عدسی (L)، تحلیلگر(P) و نمونه (S).

همانطور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، اگر $z$ راستای انتشار و قطبش در راستای $x$ باشد، بعد از عدسی شیئی قطبش در صفحه عرضی شامل هر دو مولفه‌ی TE و TM خواهد بود. چرا که قطبش در صفحه ۱ موازی صفحه تابش و در صفحه ۲ عمود بر صفحه تابش است. قطبش نور در صفحات دیگر، ترکیبی از هر دو قطبش TMو TE خواهد بود [۳]. بنابراین، انتظار می‌رود که با توجه به وقوع تشدید فقط با قطبش TM، تقارن استوانه‌ای طرح از بین رفته و طرح شدت بازتابی در ناحیه‌ای هلالی کمینه شود (مانند طرحی که در ستون دوم شکل ۴ الف نشان داده شده است).



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19 ]

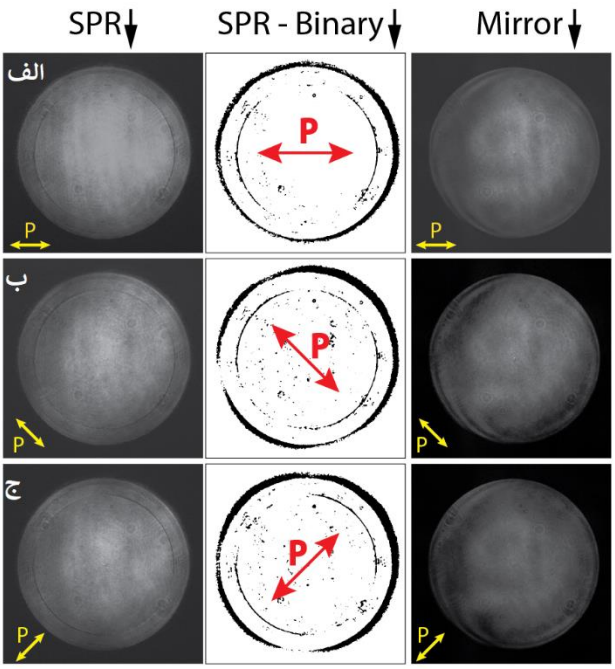



شکل ۳: تحول قطبش در عدسی شیئی. P جهت قطبش نور را نشان می‌دهد

از سویی، اگر قطبش نور فرودی بیضوی باشد، انتظار می‌رود طرح هلالی با دوران قطبش نور آشکارسازی شونده، بوسیله تحلیلگر قطبشی، دوران یابد. نتایج تجربی تشدید با نور قطبیده بیضوی فرودی برای سه زاویه تحلیلگر قطبشی ۰، ۴۵ و ۴۵- درجه به ترتیب در شکل‌های ۴ الف-ج نشان داده شده‌اند. به راحتی می‌توان دید که تشدید باعث ظاهر شدن یک الگوی هلالی می‌شود که با دوران زاویه تحلیلگر، دوران می‌یابد. برای مقایسه، نمایه شدت نور بازتابیده از یک سطح صیقلی بازتابنده فلزی که امکان تشدید پلاسمون سطحی در آن نیست، برای قطبش‌های متناظر، در ستون سمت راست شکل ۴ نشان داده شده اند. همچنین در ستون وسط، طرح باینری از طرح شدت مربوط به حسگر نمایش داده شده است که الگوی دو هلال روبروی هم اثر تشدید پلاسمون سطحی است. جهت این طرح هلالی عمود بر جهت قطبش نور فرودی است و جهتگیری آن با تغییر جهت قطبش به وضوح قابل مشاهده است. تمامی تصاویر به فاصله حدود ۵ میکرونی از کانون عدسی شیئی مربوط می‌شوند.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای آشکارسازی تشدید پلاسمون سطحی بر اساس استفاده از باریکه شدیداً کانونی شده ارائه می‌شود که نیازمند جاروب زاویه نیست. نتایج تجربی، مدل کیفی برای امکان تشدید در این هندسه را تایید می‌کنند. این روش نسبت به روش‌های دیگر ساده‌تر بوده و می‌توان از آن برای سنجش ضریب شکست در محیط‌های دارای حرکت به صورت برخط زمانی استفاده کرد.




شکل۴: از سمت راست، ستون‌های اول و سوم به ترتیب طرح شدت مربوط به سطح صیقلی بازتابنده فلزی مرجع و طرح شدت مربوط به حسگر با وجود تشدید پلاسمون سطحی در قطبش‌های متناظر را نمایش می‌دهد. . همچنین در ستون وسط، طرح باینری از طرح شدت مربوط به حسگر نمایش داده شده است که الگوی دو هلال روبروی هم اثر تشدید پلاسمون سطحی است. جهت این طرح هلالی عمود بر جهت قطبش نور فرودی است و جهتگیری آن با تغییر جهت قطبش به وضوح قابل مشاهده است. پیکان‌ها جهت محور عبور تحلیلگر قطبشی (برای قطبش TM) را نمایش می‌دهند.

## مرجع‌ها

**[1]** Liedberg, B., Nylander, C., Lundstrom, I., “Biosensing with surface plasmon resonance how it all started”, Biosensors and Bioelectronics, vol. 10.8, pp. I-IX (1995). M. Frede, R. Wilhelm.

**[2]** Anatoly V. Zayatsa, Igor I. Smolyaninovb, Alexei A. Maradudinc, Nano-optics of surface plasmon polaritons, physics reports, pp 140,2004.

**[3]** Lukas Novotny and Bert Hecht, ’Principles of nano-optics’, Cambridge university press, 2006.



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19 ]