

مقاله‌ای که شما ارائه کرده‌اید، به بررسی و شبیه‌سازی یک «سنسور نوری پلاسمون سطحی (Surface Plasmon Resonance یا SPR)» مبتنی بر فیبر نوری D شکل می‌پردازد که دارای ویژگی‌های خاصی برای تشخیص تغییرات شاخص شکست (Refractive Index یا RI) در محیط‌های مختلف است. این سنسور از «دندانه‌های نقره (Ag) پوشیده شده با لایه‌ای از هماتیت ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)» بهره می‌برد. در ادامه به شرح بخش‌های مختلف مقاله پرداخته می‌شود:

۱. مقدمه

سنسورهای نوری پلاسمون سطحی (SPR) به دلیل توانایی بالای خود در تشخیص تغییرات شاخص شکست، به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های حسگرهای نوری شناخته می‌شوند. این سنسورها کاربردهای وسیعی در «پایش محیطی، تشخیص‌های زیست‌پزشکی و شیمیایی» دارند. فناوری SPR به طور خاص از امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌کند که در سطح مشترک بین یک فلز و یک دی‌الکتریک (ماده‌ای با ضریب شکست بالا) ایجاد می‌شوند. زمانی که نور قطبیده به سطح فلز برخورد می‌کند، امواج پلاسمون سطحی تحریک می‌شوند که به تغییرات شاخص شکست محیط حساس است.

۲. طراحی و ساختار سنسور پیشنهادی

سنسور پیشنهادی در این مقاله، یک فیبر نوری D شکل است که سطح آن با دندانه‌های نقره و لایه‌ای از هماتیت پوشانده شده است.

- **فیبر نوری D شکل:** این نوع فیبر نوری به گونه‌ای طراحی شده که بخشی از آن پولیش شده و به صورت تخت درآمده است تا تماس مستقیم با محیط اطراف داشته باشد. این ویژگی باعث افزایش حساسیت سنسور می‌شود.

- **دندانه‌های نقره:** دندانه‌ها یا شکاف‌های نازکی از نقره روی سطح صاف فیبر ایجاد شده‌اند که به تقویت امواج پلاسمون سطحی کمک می‌کنند.

- **لایه هماتیت:** لایه‌ای نازک از هماتیت ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) بر روی دندان‌های نقره قرار می‌گیرد تا به عنوان لایه حساس به شاخص شکست عمل کند. هماتیت به دلیل خواص نوری مناسب و پایداری حرارتی خود انتخاب شده است.

۳. مکانیزم عملکرد سنسور

امواج الکترومغناطیسی در سنسورهای SPR زمانی ایجاد می‌شوند که نور قطبیده (پولاریزه) به سطح فلزی برخورد کرده و با الکترون‌های آزاد در سطح فلز تعامل می‌کند. در این حالت، انرژی نور به امواج پلاسمون سطحی تبدیل می‌شود که حساس به تغییرات شاخص شکست در محیط اطراف است. این تغییرات از طریق جابه‌جایی پیک تشدید (Resonance) در طیف نوری سنسور قابل اندازه‌گیری است.

۴. روش شبیه‌سازی

برای بهینه‌سازی عملکرد این سنسور، از «روش اجزای محدود (Finite Element Method یا FEM)» استفاده شده است. نرم‌افزار کامسول (COMSOL) برای انجام این شبیه‌سازی‌ها به کار گرفته شده تا پارامترهای مختلف ساختاری مانند ضخامت لایه نقره، ضخامت لایه هماتیت و عرض شکاف‌های بین دندان‌ها بررسی شوند. این شبیه‌سازی‌ها با تغییرات شاخص شکست در محیط اطراف (از ۱,۳۳ تا ۱,۳۹) انجام شده است.

۵. نتایج شبیه‌سازی

مهم‌ترین نتایج این شبیه‌سازی عبارتند از:

- **حساسیت بالا:** این سنسور توانسته است حداکثر حساسیت ۶,۴ میکرومتر بر واحد شاخص شکست (RIU) را با ضخامت ۴۵ نانومتر برای دندان‌های نقره و ۱۲ نانومتر برای لایه هماتیت ارائه دهد.

- بهبود عملکرد با استفاده از هماتیت: پوشش دادن دندان‌های نقره با لایه‌ای از هماتیت باعث افزایش قابل توجه حساسیت سنسور شده است.

- تغییرات ضخامت: با افزایش ضخامت لایه نقره و هماتیت، حساسیت سنسور تغییر می‌کند. در ضخامت‌های نازک‌تر، حساسیت به شاخص شکست بیشتر می‌شود، اما ضخامت بیش از حد باعث کاهش دقت سنسور می‌شود.

۶. کاربردها و مزایا

این سنسور به دلیل حساسیت بالا و ساختار بهینه‌شده خود، می‌تواند در کاربردهای بیوشیمیایی و محیطی مورد استفاده قرار گیرد. ویژگی اصلی آن، «اندازه کوچک و قابلیت حمل آسان» است که آن را به ابزاری مناسب برای تشخیص مولکولی، محیطی و پزشکی تبدیل کرده است.

۷. نتیجه‌گیری

مقاله نشان می‌دهد که سنسور SPR پیشنهادی با استفاده از لایه‌های هماتیت و نقره روی فیبر نوری D شکل، می‌تواند حساسیت و دقت تشخیص را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. شبیه‌سازی‌ها ثابت کرده‌اند که استفاده از این ساختار بایمتالیک (نقره و هماتیت) در فیبرهای نوری، می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به سنسورهای سنتی ارائه دهد.

این مقاله به طور کلی طراحی و بهینه‌سازی یک سنسور نوین نوری پلاسمون سطحی را ارائه می‌دهد که با استفاده از فناوری‌های پیشرفته و مواد نوین، قادر به ارائه حساسیت و دقت بالاتری در تشخیص شاخص شکست محیط است.

مراحل شبیه سازی:

شبیه سازی با نرم افزار «**COMSOL Multiphysics**» شامل چندین مرحله مهم است که هر کدام از این مراحل باید با دقت اجرا شوند تا شبیه سازی درست و بهینه انجام شود. در ادامه مراحل شبیه سازی سنسور نوری «پلاسمون سطحی (SPR)» در فیبر نوری D شکل، به صورت گام به گام توضیح داده می شود:

۱. انتخاب ماژول شبیه سازی

ابتدا باید «چند بعدی بودن شبیه سازی» و «فیزیک مناسب» برای شبیه سازی را انتخاب کنید:

- از قسمت دوبعدی برای این شبیه سازی استفاده کنید.

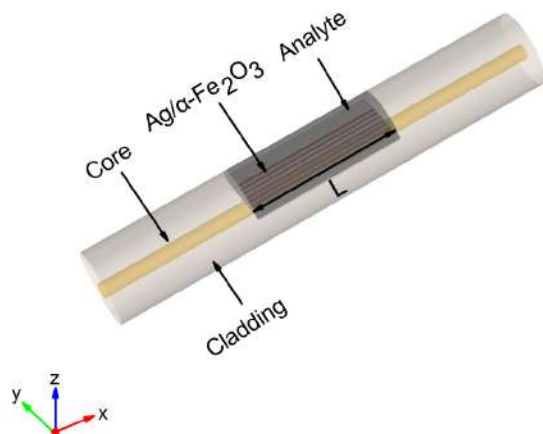
- از ماژول «**Wave Optics**» در COMSOL استفاده کنید، زیرا این ماژول برای شبیه سازی امواج الکترومغناطیسی مناسب است.

- نوع مطالعه باید «ناحیه فرکانسی (**Frequency Domain**)» باشد، زیرا رفتار امواج نوری در محدوده فرکانس خاص مورد نظر است.

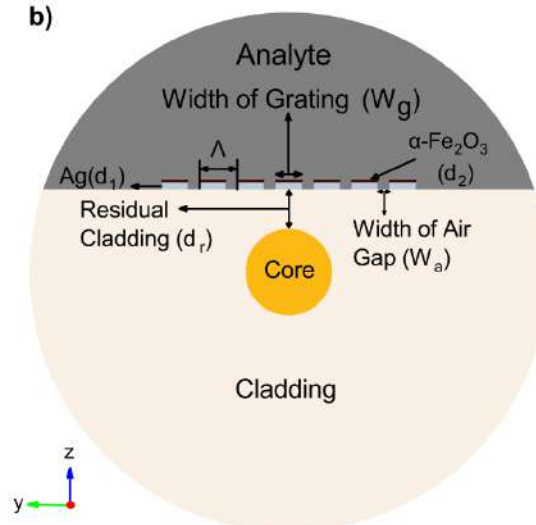
۲. «مدل سازی هندسه»

در این مرحله مطابق تصویر زیر، ساختار سنسور و فیبر نوری D شکل طراحی می شود:

a)



b)



تصویری از سطح مقطع فیبر نوری و تصویر سه بعدی از شبیه سازی

- فیبر نوری **D شکل**: ابتدا باید یک استوانه به عنوان فیبر نوری ایجاد کنید. فیبر شامل دو بخش است: هسته (Core) و کلادینگ (Cladding).

- هسته با قطر ۹ میکرومتر و کلادینگ با قطر ۱۲۵ میکرومتر مدل سازی می شود.

- یک سطح صاف (D شکل) روی کلادینگ پولیش شده با ضخامت ۰,۱ میکرومتر برای ایجاد فضای حسگر ساخته می شود.

- **دندانه های نقره**: روی سطح D شکل، باید دندانه های نقره با ضخامت ۴۵ نانومتر و عرض ۵۰ نانومتر به صورت دوره ای (پریودیک) ایجاد شوند.

- **لایه هماتیت ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)**: این لایه با ضخامت ۱۲ نانومتر روی دندانه های نقره قرار می گیرد.

۳. تعریف مواد

بعد از طراحی هندسه، مواد مربوط به هر بخش باید تعریف شوند:

- **هسته و کلادینگ:** برای هسته و کلادینگ فیبر نوری از مواد سیلیکا (SiO_2) استفاده می‌شود. ضریب شکست این مواد باید بر اساس رابطه «Sellmeier» به صورت تابعی از طول موج تعریف شود که در زیر آورده شده است.

$$n(\lambda) = \left(1 + \frac{a_1 \lambda^2}{\lambda^2 - b_1^2} + \frac{a_2 \lambda^2}{\lambda^2 - b_2^2} + \frac{a_3 \lambda^2}{\lambda^2 - b_3^2}\right)^{1/2}$$

که در آن λ طول موج کاری است و ضرایب برای هسته و کلادینگ از جدول زیر استخراج شده است.

coefficients	a_1	a_2	a_3	$b_1 (\mu\text{m})$	$b_2 (\mu\text{m})$	$b_3 (\mu\text{m})$
Cladding (pure silica)	0.6961663	0.4079426	0.8974794	0.0684043	0.1162414	9.896161
Core (3.1 doped GeO_2)	0.7028554	0.4146307	0.8974540	0.0727723	0.1143085	9.896161

- **نقره (Ag):** نقره به عنوان فلز پلاسمونیکی با ضریب شکست مختلط تعریف می‌شود. این مقدار با استفاده از مدل Drude در نرم‌افزار قابل تعریف است. لازم به ذکر است که ضریب شکست نقره در مقاله ذکر نشده و در مقالات مختلف نیز مقادیر متفاوتی ذکر شده است. این امر ممکن است منجر به تفاوت اندکی در نتایج شبیه سازی نسبت به مقاله شود.

- **هماتیت ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$):** لایه هماتیت نیز باید با ضریب شکست مختلط مناسب برای ناحیه نوری مشخص شود. لازم به ذکر است که ضریب شکست هماتیت در مقاله ذکر نشده و در مقالات مختلف نیز مقادیر متفاوتی ذکر شده است. این امر ممکن است منجر به تفاوت اندکی در نتایج شبیه سازی نسبت به مقاله شود.

۴. تنظیم شرایط مرزی (Boundary Conditions)

در این مرحله، شرایط مرزی مناسب برای شبیه‌سازی امواج نوری تنظیم می‌شود:

- **شرایط مرزی:** از شرایط مرزی «Perfectly Matched Layer (PML)» استفاده کنید تا از انعکاس امواج در مرزهای مدل جلوگیری شود. PML به عنوان یک لایه جاذب عمل کرده و اجازه خروج امواج از محیط شبیه‌سازی را می‌دهد.

- **شرایط مرزی متناوب:** برای دندانه‌های دوره‌ای، از شرایط مرزی متناوب (Periodic Boundary Conditions) استفاده می‌شود تا رفتار واقعی دندانه‌ها شبیه‌سازی شود.

۵. تعریف منبع نور

در این مرحله باید منبع نوری و نوع موج نور ورودی تعریف شود:

- **منبع نوری:** یک منبع نوری با قطبش TM (Transverse Magnetic) تعریف می‌شود که بر روی سطح D شکل فیبر برخورد می‌کند.

- **طیف طول موج:** محدوده طول موج منبع نور معمولاً در بازه ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر تنظیم می‌شود تا امکان بررسی پیک تشدید پلاسمون سطحی فراهم شود.

۶. شبکه‌بندی (Meshing)

در این مرحله، شبکه‌بندی مدل انجام می‌شود:

- **شبکه‌بندی ریز در ناحیه‌های مهم:** در نواحی مهم مانند محل دندانه‌های نقره و لایه هماتیت، باید شبکه‌های بسیار ریز با دقت بالا ایجاد شوند. برای این کار از «Fine Mesh» استفاده می‌شود.

- **شبکه‌بندی در سایر نواحی:** در سایر نواحی مدل مانند کلادینگ و هسته فیبر، از شبکه‌های بزرگ‌تر استفاده می‌شود تا سرعت محاسبات افزایش یابد.

۷. تنظیمات حل کننده (Solver Settings)

بعد از شبکه‌بندی، باید تنظیمات حل کننده برای محاسبه نتایج انجام شود:

- **حل ناحیه فرکانسی (Frequency Domain Solver):** برای حل معادلات موج نوری از این تنظیم استفاده می‌شود. این حل کننده تغییرات میدان الکترومغناطیسی را برای هر طول موج مشخص محاسبه می‌کند.
- **حل تحلیل مدال (modal analysis):** برای دیدن نتایج بیشتر میتوان در کنار حل ناحیه فرکانسی از تحلیل مدال نیز بهره برد.

۸. اجرای شبیه‌سازی

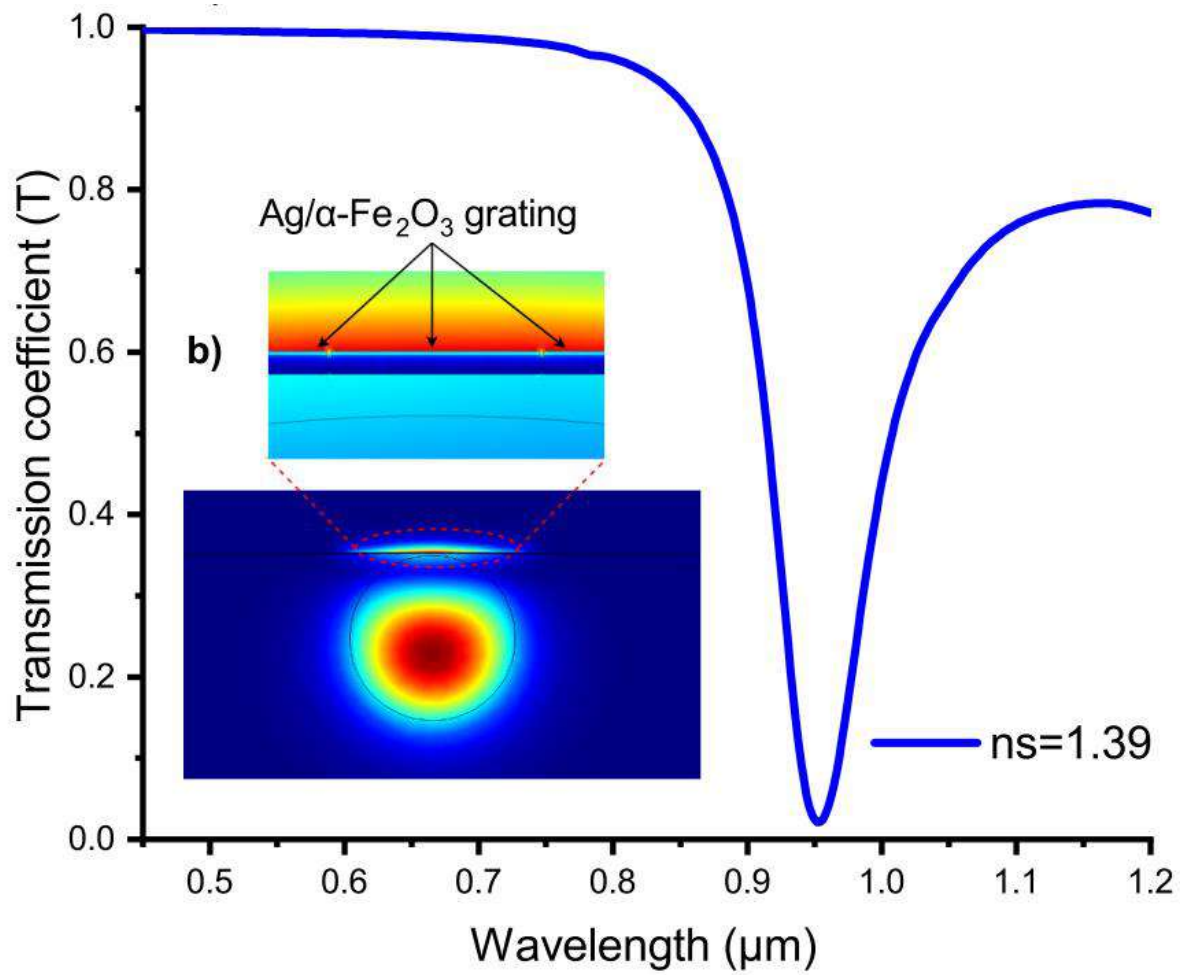
بعد از انجام تنظیمات، شبیه‌سازی اجرا می‌شود:

- **محاسبه طیف انتقال (Transmission Spectrum):** طیف انتقالی سنسور به عنوان تابعی از طول موج ورودی محاسبه می‌شود. این طیف نشان می‌دهد که در چه طول موجی تشدید پلاسمون سطحی رخ می‌دهد.
- **تغییرات پیک تشدید:** با تغییر شاخص شکست محیط اطراف، جابجایی پیک تشدید بررسی می‌شود تا حساسیت سنسور به تغییرات شاخص شکست مشخص شود.

۹. تحلیل نتایج

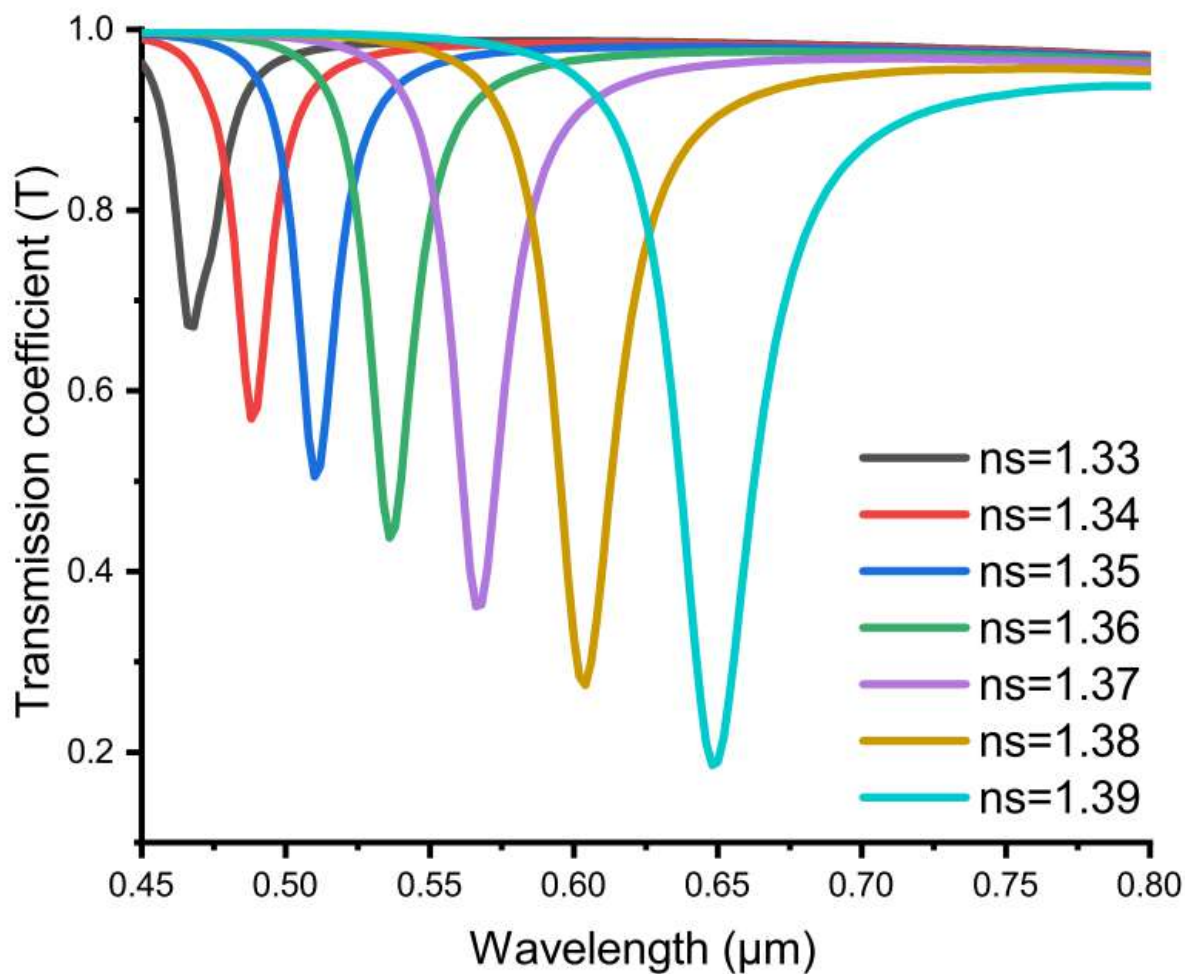
بعد از پایان شبیه‌سازی، نتایج باید تحلیل شوند:

- **تحلیل حساسیت سنسور:** با محاسبه تغییرات طول موج تشدید نسبت به تغییرات شاخص شکست محیط (RIU)، حساسیت سنسور به دست می‌آید. در تصویر زیر شکل کلی تغییرات ضریب انتقال نسبت به تغییرات طول موج نشان داده شده است.



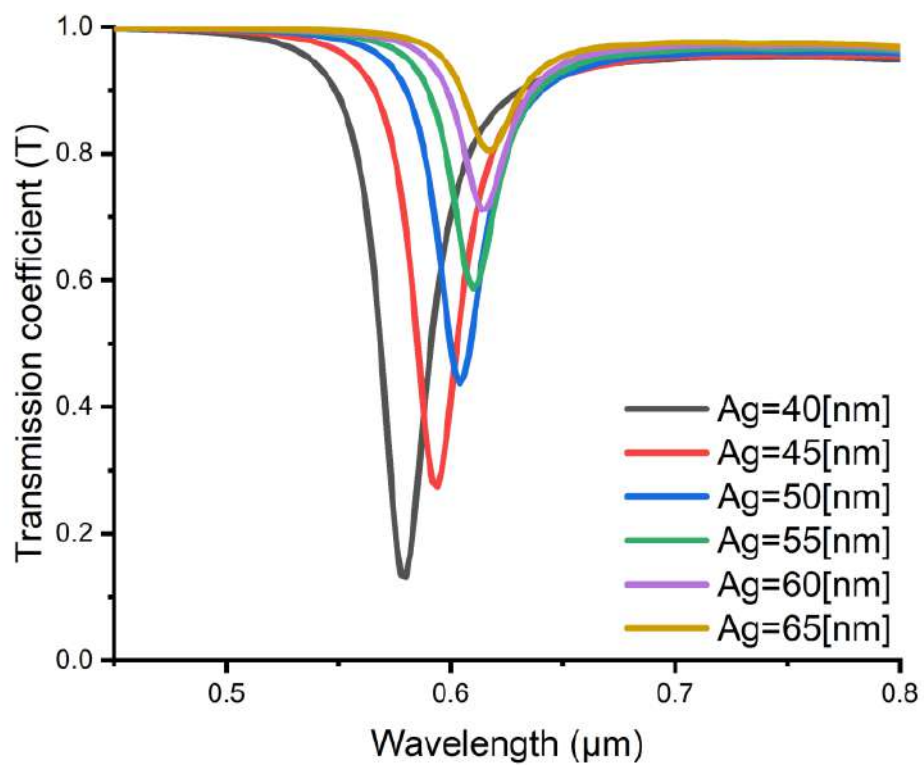
شکل کلی تغییرات ضریب انتقال نسبت به تغییرات طول موج

- **بررسی عمق پیک تشدید:** عمق پیک تشدید نشان‌دهنده میزان دقت سنسور است. هر چه پیک تشدید عمیق‌تر باشد، دقت بیشتری در تشخیص شاخص شکست وجود دارد. در شکل زیر تغییرات عمق پیک تشدید را برای ضریب شکست‌های مختلف مشاهده می‌کنید.

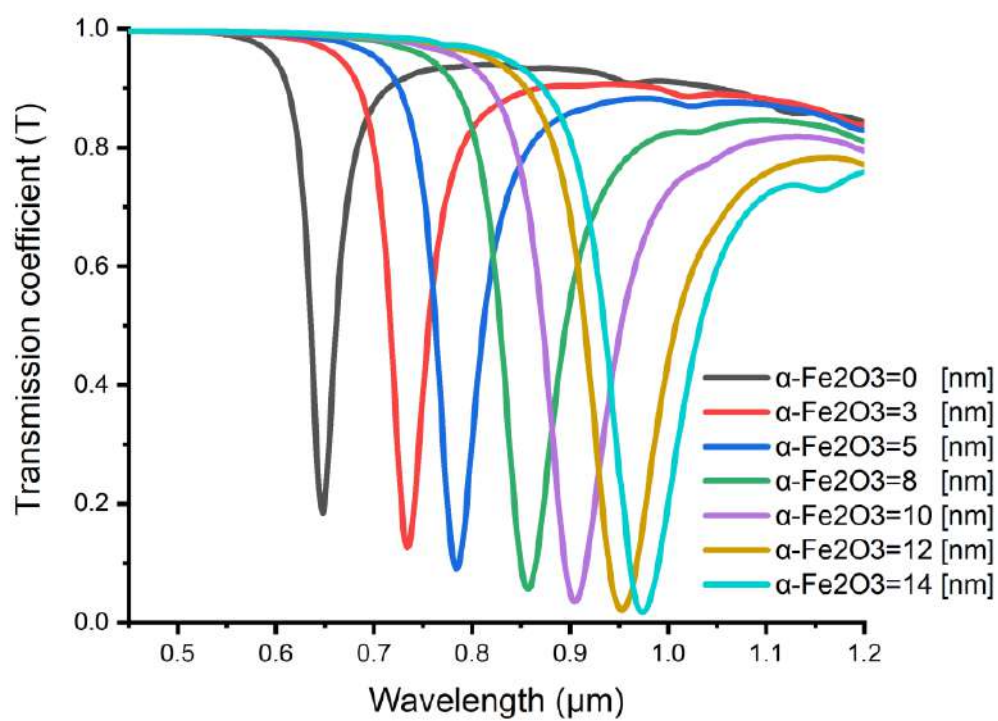


تغییرات عمق پیک تشدید را برای ضریب شکست های مختلف بر حسب طول موج

- تأثیر پارامترها: تأثیر تغییرات ضخامت لایه نقره و هماتیت بر روی حساسیت و دقت سنسور بررسی می شود تا بهینه ترین حالت برای عملکرد سنسور مشخص شود.



تأثیر تغییرات ضخامت لایه نقره بر ضریب انتقال بر حسب طول موج



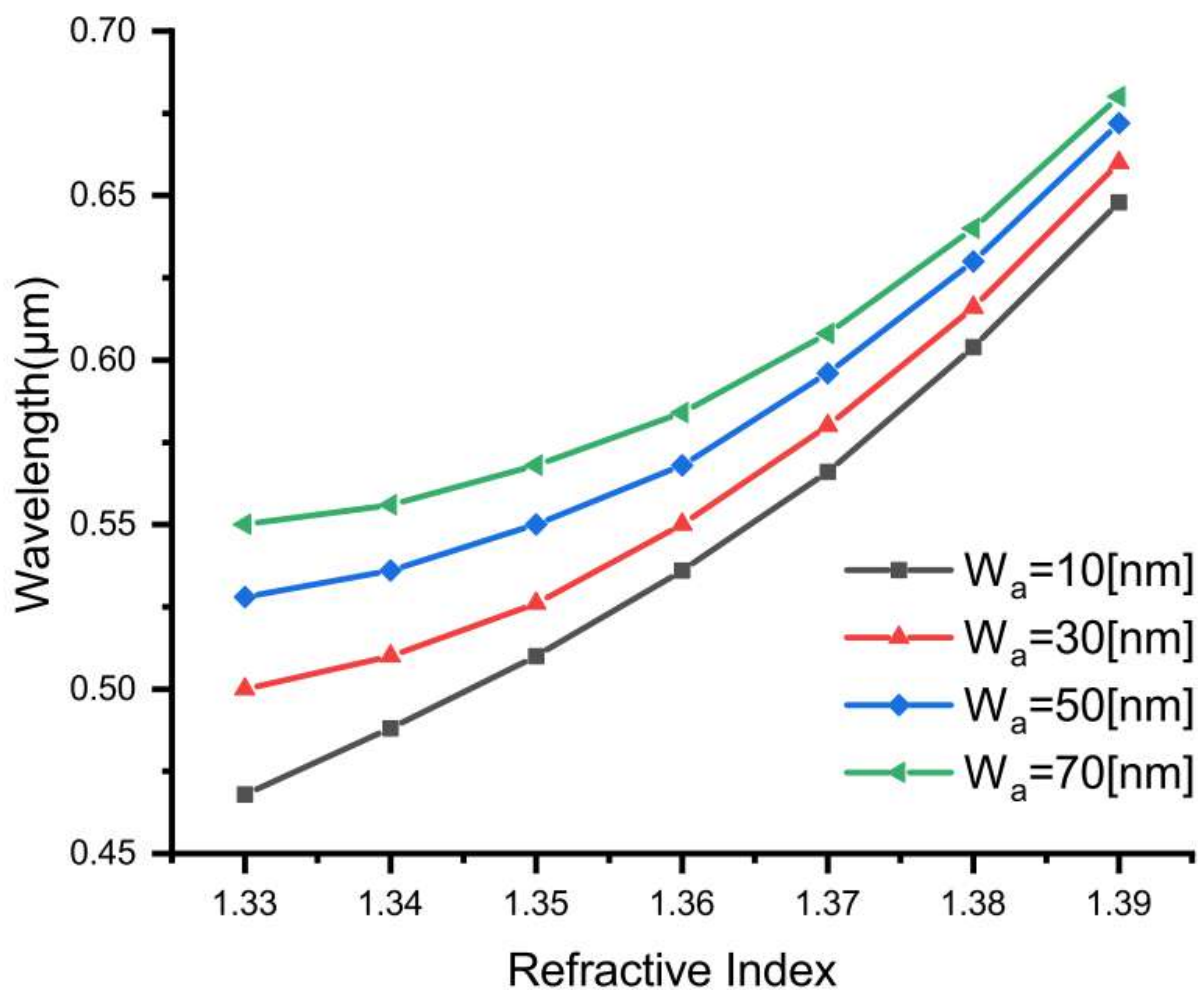
تأثیر تغییرات ضخامت لایه هماتیت بر ضریب انتقال بر حسب طول موج

۱۰. بهینه‌سازی

بر اساس نتایج به دست آمده، ممکن است نیاز به تغییر پارامترهای ساختاری باشد:

- تغییر ضخامت لایه‌ها: بررسی تأثیر ضخامت‌های مختلف لایه نقره و هماتیت برای یافتن حالت بهینه.

- تنظیم فاصله دندان‌ها: بررسی اثر تغییر فاصله بین دندان‌ها بر روی حساسیت و دقت. در شکل زیر میزان تأثیر فاصله دندان‌ها بر ضریب شکست نشان داده شده است.



میزان تأثیر فاصله دندان‌ها بر ضریب شکست

