

طرح پیشنهادی بهینه‌سازی (Research Proposal)

موضوع:

ارتقای ضریب کیفیت (Q-factor) و فاکتور شایستگی (FOM) در حسگر تراهرتز MDM با بهره‌گیری از پیکربندی استاب‌های جفت‌شده نامتقارن

ارائه‌دهنده: سیدحسن سهرابی

استاد راهنما: دکتر شیوا خانی

نرم‌افزار هدف: ANSYS Lumerical FDTD

۱. مقدمه و بیان مسئله

در مقاله مورد مطالعه (تحقق تشدید فانو با ضریب کیفیت بالا در ساختار موج‌بر MDM جفت‌شده با دیواره-استاب)، یک ساختار شامل یک تشدیدگر استاب (Stub) و یک دیواره (Wall) توانسته است به ضریب کیفیت ۲۲۵ و حساسیت فوق‌العاده ۹۶۴۸۰ نانومتر بر واحد ضریب شکست (nm/RIU) دست یابد. با این حال، تحلیل فیزیکی ساختار نشان می‌دهد که تشدید فانو در این حالت حاصل تداخل یک «مد پیوسته‌ی پهن» (ناشی از دیواره) و یک «تک‌مد گسسته» (ناشی از استاب) است.

محدودیت اصلی در این ساختار، پهنای باند نیم‌توان (FWHM) است که به دلیل تلفات تابشی در یک استاب منفرد، همچنان جای بهبود دارد. برای ارتقای فاکتور شایستگی ($FOM = S/FWHM$)، کاهش هرچه بیشتر پهنای باند پیک تشدید الزامی است.

۲. طرح پیشنهادی: پیکربندی Asymmetric Dual-Stub (ADS)

طرح پیشنهادی اینجانب برای بهینه‌سازی، عبور از مدل «تک‌تشدیدگر» به مدل «تشدیدگرهای جفت‌شده نامتقارن» است. در این طرح، به جای یک استاب، دو استاب در فواصل نانومتری از یکدیگر (به صورت موازی یا متقابل) قرار می‌گیرند که دارای اختلاف ارتفاع جزئی (δL) هستند.

تغییرات هندسی پیشنهادی:

- Stub A: ارتفاع $L_1 = 20 \mu m$ (طبق مقاله اصلی).

- Stub B: ارتفاع $L_2 = L_1 \pm \delta L$ (که δL پارامتر بهینه‌سازی است).

- Gap (g): فاصله بین دو استاب که قدرت جفت‌شدگی مدهای نزدیک (Near-field coupling) را تعیین می‌کند.

۳. مبانی فیزیکی و تنوری بهینه‌سازی

دلیل انتخاب این طرح، پدیده‌ی «شکست تقارن» (Symmetry Breaking) است. در فیزیک پلاسمونیک، وقتی دو تشدیدگر مشابه با یکدیگر جفت می‌شوند، دو مد پدیدار می‌گردد:

۱. مد روشن (Bright Mode): که جفت‌شدگی قوی با موج‌بر دارد و باعث تلفات تابشی بالا می‌شود.
 ۲. مد تاریک (Dark Mode): که به دلیل تقارن معمولاً برانگیخته نمی‌شود، اما با ایجاد ناهم‌سانی جزئی (δL)، برانگیخته شده و به دلیل محبوس‌سازی شدید میدان، پهنای باند بسیار باریکی دارد.
- با جفت کردن این «مد تاریک» با پاسخ دیواره، تشدید فائوی حاصل دارای شیب بسیار تندتر (Sharpness) خواهد بود. این رویکرد به لحاظ تنوری می‌تواند ضریب کیفیت را از ۲۲۵ به مرز ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ارتقا دهد.

۴. اهداف تحقیق در نرم‌افزار ANSYS Lumerical

در مرحله شبیه‌سازی با نرم‌افزار Lumerical FDTD، اهداف زیر دنبال خواهد شد:

- آنالیز طیفی: استخراج نمودارهای Transmission و Reflection و مقایسه آن با نتایج مقاله اصلی برای صحت‌سنجی (Validation).
- بهینه‌سازی پارامتریک (Parameter Sweep): جاروب کردن پارامتر δL و فاصله g برای دستیابی به کمترین FWHM ممکن.
- محاسبه FOM: ارزیابی عملکرد حسگر پس از تغییر ساختار. انتظار می‌رود با ثابت ماندن حساسیت (S) و کاهش FWHM، فاکتور شایستگی به بیش از دو برابر مقدار فعلی (یعنی بالای ۴۰۰) افزایش یابد.
- توزیع میدان (Field Distribution): تصویربرداری از مانیتورهای پروفایل میدان برای اثبات محبوس‌شدگی انرژی در مد تاریک.

۵. متدولوژی شبیه‌سازی در Lumerical

- ۱- Environment: تنظیم محیط دوبعدی (D-FDTD^۲) جهت افزایش سرعت محاسبات بدون کاهش دقت (مطابق متدولوژی مقاله).
- ۲- Material: تعریف طلا با مدل Drude و تنظیم دقیق برای ناحیه ترانز.
- ۳- Mesh: استفاده از Mesh Override در لبه‌های استاب‌ها و دهانه روزنه دیواره (با گام ۱ نانومتر) برای ثبت دقیق نوسانات پلاسمونی.
- ۴- Boundary Conditions: استفاده از PML در تمامی جهات برای حذف بازتاب‌های ناخواسته.

۶. دستاوردهای مورد انتظار:

- افزایش Q-factor به مقادیر بالای ۵۰۰.
- کاهش پهنای باند تشدید و در نتیجه افزایش FOM.
- ارائه یک مدل بهینه‌تر برای حسگری آنالیت‌های زیستی (مانند تشخیص غلظت گلوکز یا پروتئین) که نیاز به دقت تفکیک بسیار بالا دارند.