به نام خدا

حسگرهای پلاسمونیک بر اساس مواد با ضریب شکست نزدیک به صفر

استاد راهنما : دکتر رضا خردمند استاد مشاور : دکتر فریبا لطفی پژوهشگر : فاطمه نوریان اولی

دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته‌ی فیزیک گرایش فوتونیک/ دانشکده فیزیک / دانشگاه سراسری تبریز

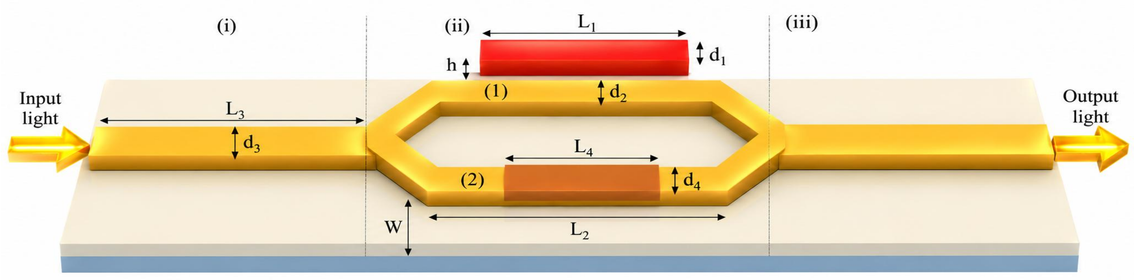
مقدمه

حسگرهای پلاسمونیکی به دلیل قابلیت محصورسازی نور در ابعاد زیرطول‌موجی و حساسیت بالا به تغییرات ضریب شکست محیط، از ظرفیت بالایی در توسعه سامانه‌های آشکارسازی نوری برخوردارند [۲,۱]. اساس عملکرد این حسگرها بر برانگیزش پلاسمون‌پلاریتون‌های سطحی (SPPs) در فصل مشترک فلز و دی‌الکتریک استوار است؛ مدهایی که امکان تمرکز و هدایت میدان الکترومغناطیسی در مقیاس نانومتری را فراهم می‌کنند [۵–۳]. از سوی دیگر، مواد با ضریب شکست نزدیک به صفر(ENZ) به واسطه ویژگی‌های الکترومغناطیسی منحصربه‌فرد، قابلیت کنترل انتشار نور و توزیع میدان را در ساختارهای زیرطول‌موجی فراهم می‌سازند [۷,۶]. تلفیق این مواد با ساختارهای پلاسمونیکی و تداخل‌سنج ماخ–زندر (MZI)، بستری مناسب برای طراحی حسگرهای نوری با حساسیت قابل تنظیم ایجاد می‌کند. در این پژوهش، یک حسگر پلاسمونیکی مبتنی بر تداخل‌سنج ماخ–زندر، با استفاده از نقره و مواد ENZ طراحی و با بهره‌گیری از مدل درود–لورنتس و شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار COMSOL بررسی شده است. همچنین، تأثیر پارامترهای هندسی ساختار و تغییرات ضریب شکست نمونه در بازه ۱.۳۳ تا ۱.۳۸ بر پاسخ نوری و حساسیت حسگر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مبانی و روش‌ها

در این پژوهش انتشار پلاسمون‌پلاریتون‌های سطحی (SPPs) در فصل مشترک فلز–دی‌الکتریک، با استفاده از معادلات ماکسول و برای مدهای عرضی–مغناطیسی (TM) مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال شرایط مرزی الکترومغناطیسی، روابط پاشندگی و ویژگی‌های انتشار مدها استخراج شد. همچنین، تأثیر خواص الکترومغناطیسی مواد فلزی، دی‌الکتریک و مواد با گذردهی نزدیک به صفر (ENZ) بر رفتار انتشار امواج تحلیل گردید

حسگر پیشنهادی بر پایه یک تداخل‌سنج نامتقارن ماخ–زندر (MZI) و موجبر تخت پلاسمونیکی طراحی و با استفاده از روش المان محدود (FEM) در نرم‌افزار COMSOL شبیه‌سازی شد.



شکل ۱. شماتیک سه‌بعدی ساختار پیشنهادی حسگر پلاسمونیکی مبتنی بر تداخل‌سنج نامتقارن ماخ–زندر و پارامترهای هندسی آن.

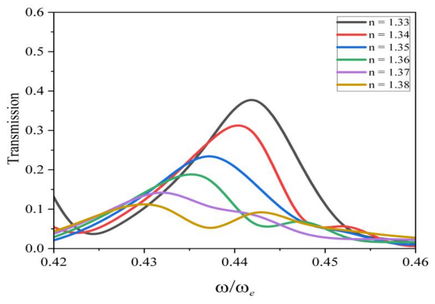
نمای سه‌بعدی ساختار پیشنهادی در شکل ۱ ارائه شده است. این ساختار شامل موجبر ورودی (ناحیه i)، ناحیه فعال تداخل‌سنج متشکل از دو شاخه انتشار (ناحیه (ii))، موجبر خروجی (ناحیه(iii)) است. ابعاد هندسی و پارامترهای مؤثر بر عملکرد حسگر نیز در شکل مشخص شده‌اند. در این ساختار، نور ورودی با قطبش TM به دو شاخه تقسیم شده و پس از انتشار در مسیرهای مجزا، در خروجی بازترکیب می‌شود. تغییر ضریب شکست ناحیه نمونه موجب تغییر پاسخ طیفی ساختار شده و مبنای ارزیابی حساسیت حسگر قرار می‌گیرد.

ساختار حسگر در دو پیکربندی هندسی متفاوت، شامل تغییر پهنای شاخه مرجع و تغییر هم‌زمان پهنای هر دو شاخه، مورد بررسی قرار گرفت. در هر پیکربندی، با تغییر نظام‌مند پارامترهای هندسی شامل فاصله نمونه از شاخه بالایی، طول و ارتفاع ناحیه نمونه و نیز طول و ارتفاع لایه ENZ، طیف عبوری خروجی محاسبه و تغییرات پاسخ نوری تحلیل شد. در نهایت، با مقایسه پاسخ‌های طیفی حاصل از حالت‌های مختلف، شرایط هندسی بهینه و بیشینه حساسیت قابل دستیابی برای هر پیکربندی تعیین گردید. حساسیت حسگر در هر مرحله از نسبت تغییرات فرکانس به تغییرات ضریب شکست محاسبه و گزارش شد.

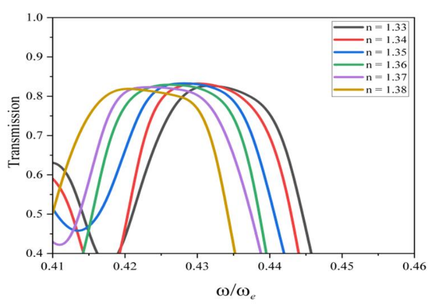
$$S = \frac{\Delta f}{\Delta n}$$

نتایج و بحث

ابتدا عملکرد حسگر در دو حالت، با حضور لایه ENZ روی شاخه مرجع (مستطیل قهوه‌ای رنگ) و بدون این لایه، بررسی و مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزودن لایه ENZ به شاخه پایینی تداخل‌سنج، موجب افزایش حساسیت حسگر در تشخیص تغییرات ضریب شکست نمونه می‌شود. در شکل زیر، طیف عبور حسگر در حالت بدون حضور ماده ENZ و در حضور ماده نشان داده شده است. با تغییر ضریب شکست نمونه، جابه‌جایی در طیف عبوری ایجاد می‌شود که مبنای محاسبه حساسیت حسگر است.

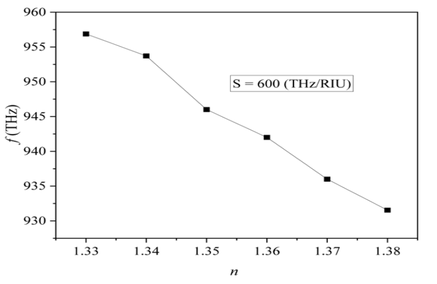


شکل۱. طیف عبور حسگر پلاسمونیکی در حضور ماده ENZ روی شاخه مرجع

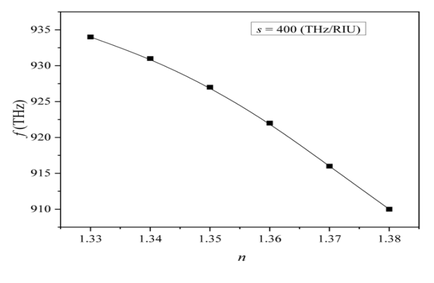


شکل۲. طیف عبور حسگر پلاسمونیکی بدون حضور ماده ENZدر ساختار تداخل سنج

با افزودن این ماده به ساختار تداخل‌سنج، جابه‌جایی طیفی بیشتری در پاسخ به تغییرات ضریب شکست نمونه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده افزایش حساسیت حسگر است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، حساسیت از ۴۰۰THz/RIU در حالت بدون ENZ به ۶۰۰THz/RIU در حضور آن رسیده است. بنابراین، استفاده از ماده ENZ موجب افزایش حدود ۵۰ درصدی حساسیت حسگر و بهبود قابلیت تشخیص تغییرات ضریب شکست می‌شود.

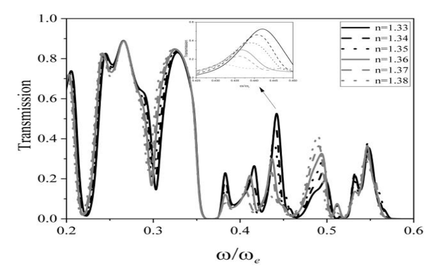


شکل۳. حساسیت حسگر پلاسمونیکی با حضور ماده ENZ

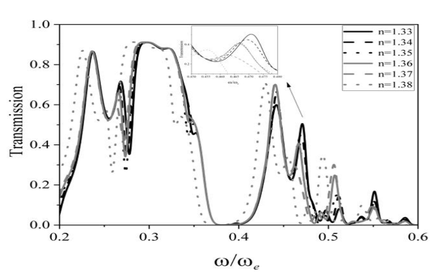


شکل۴. حساسیت حسگر پلاسمونیکی بدون حضور ماده ENZ

حسگر در دو پیکربندی هندسی بررسی و پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن بهینه‌سازی شد. در پیکربندی اول، با بهینه‌سازی پارامترها، حساسیت به ۷۰۰THz/RIU رسید و با کاهش ۱۰ نانومتری پهنای شاخه مرجع، به ۷۵۰THz/RIU افزایش یافت.

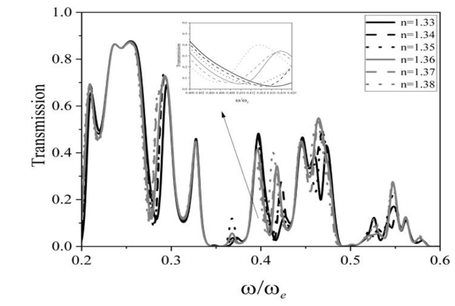


شکل۵. طیف عبورحسگر با کاهش پهنای شاخه مرجع

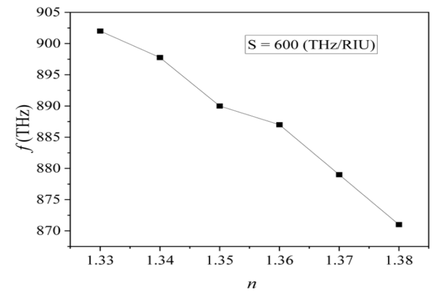


شکل۶. طیف عبور حسگر در حالت اول

در پیکربندی دوم، کاهش هم‌زمان پهنای هر دو شاخه موجب افت حساسیت شد؛ به‌طوری‌که با تغییر پارامترهای هندسی، حساسیت در بازه ۶۰۰-۵۰ THz/RIU قرار گرفت.



شکل۷. طیف عبورحسگر (قله‌ای که بیشترین حساسیت را دارد با فلش مشخص شده‌است)



شکل۸. برازش خطی (حساسیت حسگر پلاسمونیکی = شیب خط)

منابع

[1]. S. Zeng, D. Baillargeat, H.-P. Ho, and K.-T. Yong, "Nanomaterials enhanced surface plasmon resonance for biological and chemical sensing applications," Chem. Soc. Rev. vol. 43, no. 10, pp. 3426-3452, 2014.
[2]. J. N. Anker, W. P. Hall, O. Lyandres, N. C. Shah, J. Zhao, and R. P. Van Duyne, "Biosensing with plasmonic nanosensors," Nat. Mater. vol. 7, no. 6, pp. 442-453, 2008
[3]. L. Bar-Hillel, Y. Plotnik, O. Segal, and M. Segev, "Long lived surface plasmons on the interface of a metal and a photonic time-crystal," Nanophotonics, no. 0, 2025
[4]. S. A. Maier, "Plasmonics: Fundamentals and Applications Springer," New York, 2007
[5]. E. Ozbay, "Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions," Sci. vol. 311, no. 5758, pp. 189-193, 2006
[6]. X. Niu, X. Hu, S. Chu, and Q. Gong, "Epsilon-near-zero photonics: a new platform for integrated devices," Adv. Opt. Mater. vol. 6, no. 10, p. 1701292, 2018
[7]. A. Alu, M. G. Silveirinha, A. Salandrino, and N. Engheta, "Epsilon-near-zero metamaterials and electromagnetic sources: Tailoring the radiation phase pattern," Phys. Rev. B. vol. 75, no. 15, p. 155410, 2007