



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



حسگر ضریب شکست فروسرخ نزدیک مبتنی بر توری دوپله‌ای تمام-فلزی

فاطمه مشتاقی فرد، علی اصغر عسکری، لاله رحیمی نژاد

پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک
اشتر، اصفهان Fmoshtaghifard@gmail.com

چکیده - در سال‌های اخیر حسگرهای مبتنی بر اثر پلاسمون سطحی بواسطه قابلیت بالا در مجتمع شدن در ابعاد کوچک‌تر از طول موج و حساسیت زیاد آنها مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله، یک حسگر ضریب شکست مبتنی بر یک توری تمام-فلزی که دارای یک ساختار ساده است پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته است. برای ساختار پیشنهادی، جذب پلاسمون در ناحیه طول موجی مرئی و فروسرخ نزدیک اتفاق می‌افتد. علاوه بر پارامتری مانند تناوب، عامل دیگری مثل پروفایل سطح توری نیز بر خصوصیات طیف جذبی، تاثیرگذار است؛ شبیه‌سازی‌های انجام شده به روش المان محدود نشان‌دهنده این است که با تغییر کوچک و مناسب در پروفایل یک توری معمولی می‌توان مقدار ضریب شایستگی حسگر را تا حد زیادی ارتقا داد.

کلید واژه- پلاسمونیک، توری تمام-فلزی، حسگر ضریب شکست

A near infrared refractive index sensor based on double-step all-metal grating

F. Moshtaghifard, A. A. Askari, L. Rahimi

Faculty of Applied Science, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan-
Fmoshtaghifard@gmail.com

Abstract- In recent years, surface plasmonic-based sensors have received a great deal of attention due to their high sensitivity and ability to integrate into dimensions smaller than the wavelength. In this paper, a refractive index sensor based on an all-metal grating with a simple structure is proposed and investigated. For the proposed structure, plasmonic absorption occurs in the visible and near-infrared wavelength region. In addition to a parameter such as period, another factor such as the grating surface profile also affects the absorption spectrum properties; Finite element simulations show that with a small and appropriate change in the profile of a typical grating, the value of the figure of merit can be greatly increased.

Keywords: plasmonic, all-metal grating, refractive index sensor

مقدمه

حسگرهای مبتنی بر پلاسمون سطحی دارای حساسیت و قدرت تفکیک بالایی هستند. پیکربندی‌های متفاوتی می‌توانند برای تحریک پلاسمون سطحی استفاده شوند. حسگرهای مبتنی بر منشور و حسگرهای مبتنی بر توری دو نوع متداول از این حسگرها هستند. حسگرهای پلاسمون سطحی مبتنی بر منشور، هرچند دارای حساسیت زیادی هستند، اما معمولاً بزرگ و دارای پیچیدگی می‌باشند و مجتمع نمودن آن‌ها به‌سختی انجام می‌شود. از طرف دیگر حسگرهای پلاسمون سطحی مبتنی بر توری، حساسیت کمتری نسبت به منشور دارند؛ ولیکن دارای برتری‌هایی هستند که ما را در طراحی و ساخت آن‌ها امیدوار می‌کند. ساخت توری‌های یک‌بعدی، آسان و تولید آن‌ها به‌نسبت کم‌هزینه است. بنابراین می‌توانند به‌طور موفقیت‌آمیزی در اجزای میکروسیالی دستگاه‌های تشخیصی، مجتمع شوند.

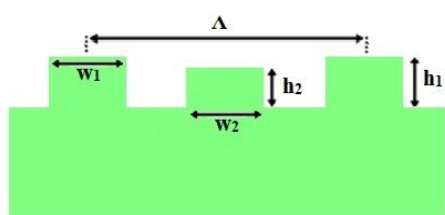
مهم‌ترین پارامتر برای ارزیابی حسگرهای مبتنی بر توری، ضریب شایستگی^۱ است. در طراحی حسگر، طیف مرئی و فروسرخ نزدیک بیشتر موردتوجه واقع می‌شوند؛ زیرا در این نواحی، تعدد و تنوع چشمه‌های نوری و آشکارسازها را داریم. در این زمینه، مطالعات بسیاری صورت گرفته‌است؛ از جمله یک بیوحسگر ضریب‌شکست مبتنی بر توری با ضریب شایستگی $293/5 \text{ RIU}^{-1}$ که برپایه کاواک فابری-پرو طراحی شده‌است [۱]. یا یک حسگر ضریب‌شکست دیگر که از جنس Al-MoS_2 است و براساس پیکربندی کرشمان طراحی شده و دارای ضریب شایستگی $335/13 \text{ RIU}^{-1}$ است [۲].

البته حسگری در نواحی فرابنفش هم صورت می‌گیرد که عمدتاً دارای FOM بالایی است؛ اما هم قطعات حسگری آن، کمتر در دسترس هستند و هم دارای قیمت بالاتری‌اند.

در اینجا، به مطالعه یک توری دوپله‌ای تمام-فلزی در طیف مرئی و نزدیک فروسرخ پرداخته شده؛ و درنهایت، با یک توری ساده تک‌پله‌ای مقایسه می‌شود و افزایش FOM مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

معرفی ساختار

شکل ۱، طرح شماتیک توری دوپله‌ای را نشان می‌دهد. w_1 و h_1 پهنا و ارتفاع پله اول و w_2 و h_2 پهنا و ارتفاع پله دوم هستند. Λ نیز تناوب توری است. هم‌چنین جنس توری از فلز طلا و محیط اطراف آن، هوا است.



شکل ۱: طرح شماتیک توری دوپله‌ای

هدف از این طراحی، به‌دست‌آوردن نمودار بازتاب با بیشترین نسبت ارتفاع به پهنا است؛ بدین منظور، پارامتر FOM تعریف می‌شود.

$$FOM = S \times \frac{H}{W} \quad (1)$$

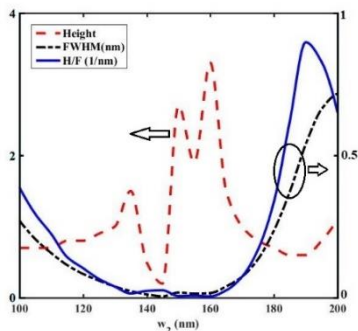
در این رابطه، S حساسیت توری، H ارتفاع طیف بازتاب و W پهنای آن است. حساسیت، مشتق طول‌موج نسبت به ضریب‌شکست یعنی $d\lambda/dn$ تعریف می‌شود که این مشتق از طریق رابطه انطباق فاز توری، قابل محاسبه است که با توجه به فرود عمود، ($\theta = 0$)، به شکل زیر تعریف می‌شود:

¹ Figure Of Merit (FOM)

شکل ۲: مقایسه طیف بازتاب توری تک پله‌ای و توری دوپله‌ای

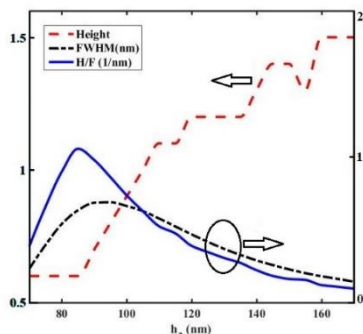
این شکل، نشان می‌دهد مشخصات سطح توری نیز در شکل نهایی طیف بازتاب، تاثیرگذار است؛ یعنی می‌توان با ایجاد تغییرات جزئی در هندسه توری، به عنوان مثال اضافه کردن یک پله دیگر، مقدار FOM را افزایش داد.

در شبیه‌سازی اول، h_1 و h_2 به ترتیب دارای مقادیر ۱۵۰ و ۸۰ نانومتر هستند و w_1 دارای مقدار ۱۲۰ nm است. هدف، بهینه‌کردن مقدار w_2 است. شکل زیر، نتایج شبیه‌سازی اولیه را نشان می‌دهد:



شکل ۳: نمودار ارتفاع، پهنا و نسبت این دو پارامتر، برای مقادیر مختلف پهنای پله دوم

طبق شکل ۳، بیشترین مقدار نسبت ارتفاع به پهنا، 10^{-1} RIU^{-1} است. در این حالت FOM، 672 RIU^{-1} می‌شود. گام بعدی، بهینه‌سازی پارامتر h_2 خواهد بود.



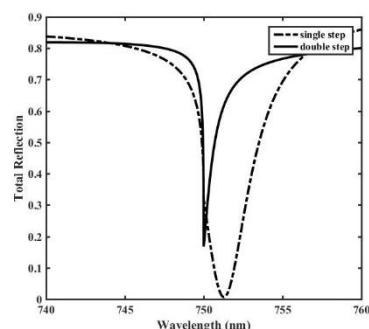
شکل ۴: نمودار ارتفاع، پهنا و نسبت این دو پارامتر، برای مقادیر مختلف ارتفاع پله دوم

$$m \frac{\lambda_0}{\Lambda} = \pm \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (2)$$

λ_0 طول موج نور فرودی، m مرتبه پراش و ϵ_d و ϵ_m به ترتیب تابع دی‌الکتریک محیط اطراف و توری فلزی هستند. در طول موج‌های فرسوخ نزدیک، بخش حقیقی تابع دی‌الکتریک توری فلزی، خیلی بزرگتر از یک است. بنابراین رابطه ۲ با تقریب، می‌تواند به صورت $S \approx \Lambda_m$ نوشته شود؛ از آن جایی که تنها مراتب اولیه پراش بررسی می‌شوند، حساسیت تقریباً همان مقدار تناوب را دارد. اکنون که مقدار عددی حساسیت را به دست آوردیم، مرحله بعدی، بهینه‌سازی پارامترهای پله دوم و به دست آوردن بیشترین مقدار برای H/W است.

شبیه‌سازی

برای حل معادلات ماکسول در این گونه ساختارها، روش تفاضل محدود و روش المان محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ در این جا هندسه توری با استفاده از نرم افزار کامسول که برپایه روش المان محدود است، شبیه‌سازی می‌شود. هم‌چنین تابع دی‌الکتریک فلز طلا طبق مدل لورنتز-دروود تعیین می‌گردد [۳]. در همه مراحل، فرود عمود داریم و تناوب، مقدار ثابت ۷۵۰ nm را داراست. طیف بازتاب برای بهینه‌ترین حالت توری دوپله‌ای در مقایسه با توری تک پله‌ای که برآمدگی آن، کاملاً در میانه هندسه قرار گرفته، در شکل ۲ نمایش داده شده است.



طبق شکل ۴، بیشترین مقدار نسبت ارتفاع به پهنا، $1/0.54 \text{ nm}^{-1}$ است. بنابراین، در نهایت، FOM دارای مقدار 790 RIU^{-1} می شود.

نتیجه گیری

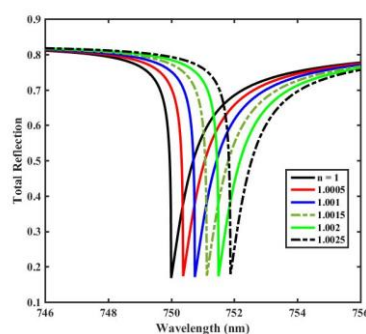
در این مقاله یک حسگر ضریب شکست با ساختار ساده مبتنی بر توری تمام-فلزی در بازه طول موجی فروسرخ نزدیک طراحی شد که مقدار FWHM آن 0.16 nm در فرود عمود است. همچنین در این مقاله پارامترهای موثر بر طیف بازتاب مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجایی که ویژگی های سطح توری در شکل طیف بازتاب نقش دارد، با تغییر کوچکی در سطح توری، یعنی اضافه کردن یک پله، توری ساده تک پله ای به توری دوپله ای تبدیل شد و FOM آن از 199 RIU^{-1} به 790 RIU^{-1} افزایش پیدا کرد. هدف این بود که با تغییرات کوچک در یک ساختار ساده، به بهینه سازی پارامترهای آن کمک شود.

مراجع

- [1] L. Zeng, M. Chen, W. Yan, Z. Li, and F. Yang, "Si-grating-assisted SPR sensor with high figure of merit based on Fabry-Pérot cavity," *Opt. Commun.*, Vol. 457, No. September 2019, p. 124641, 2020.
- [2] S. Shukla and P. Arora, "Design and comparative analysis of aluminum-MoS2 based plasmonic devices with enhanced sensitivity and Figure of Merit for biosensing applications in the near-infrared region," *Optik (Stuttg.)*, Vol. 228, No. December 2020, p. 166196, 2021.
- [3] A. D. Rakić, A. B. Djurišić, J. M. Elazar, and M. L. Majewski, "Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices," *Appl. Opt.*, Vol. 37, No. 22, p. 5271, 1998.

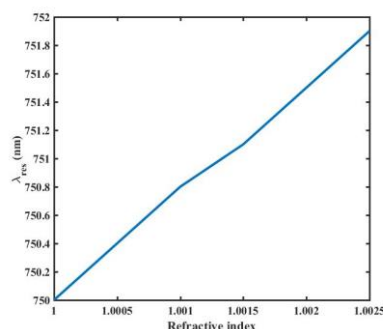
بحث و بررسی

مشاهده می شود بعد از طی دو مرحله شبیه سازی، مناسب ترین مقادیر برای پهنا و ارتفاع پله دوم، به دست می آیند که به ترتیب ۱۹۰ و ۸۵ نانومتر هستند. گام بعدی سنجش صحت کارکرد حسگر ضریب شکست است. بدین منظور، مقادیر مختلفی برای ضریب شکست محیط اطراف توری در نظر گرفته می شود و طیف بازتاب برای آن ها رسم می گردد. نتیجه به صورت زیر نمایش داده می شود:



شکل ۵: طیف بازتاب بر حسب مقادیر مختلف ضریب شکست محیط اطراف

طبق شکل ۵ با افزایش مقدار عددی ضریب شکست، طیف بازتاب به سمت طول موج های بیشتر می رود.



شکل ۶: موقعیت مکانی طول موج طیف بازتاب بر حسب مقادیر مختلف ضریب شکست محیط اطراف