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 ضریب‌شکست فروسرخ نزدیک مبتنی بر توری دوپله‌ای تمام-فلزی

فاطمه مشتاقی‌فرد، علی‌اصغر عسکری، لاله رحیمی‌نژاد

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 طول‌موج 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 طول‌موجی مرئی و فروسرخ نزدیک اتفاق می‌افتد. علاوه‌بر پارامتری مانند تناوب، عامل دیگری مثل پروفلیل 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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

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 معمولا 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.

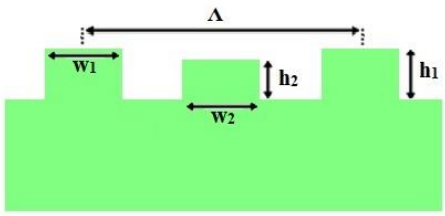
مهم‌ترین پارامتر برای ارزیابی حسگرهای مبتی بر توری، ضریب شایستگی[1] است. در طراحی حسگر، طیف مرئی و فروسرخ نزدیک بیشتر موردتوجه واقع می‌شوند؛ زیرا در این نواحی، تعدد و تنوع چشمه‌های نوری و آشکارسازها را داریم. در این زمینه، مطالعات بسیاری صورت گرفته‌است؛ از جمله یک بیوحسگر ضریب‌شکست مبتنی بر توری با ضریب شایستگی $۲۹۳/۵RIU^{-1}$ که برپایه کاواک فابری-پرو طراحی شده‌است[۱]. یا یک حسگر ضریب‌شکست دیگر که از جنس $Al\text{-}MoS_2$ است و براساس پیکربندی کرشمان طراحی شده و دارای ضریب شایستگی $۳۳۵/۱۳RIU^{-1}$ است[۲].

البته حسگری در نواحی فرابنفش هم صورت می‌گیرد که عمدتا دارای FOM بالایی است؛ اما هم قطعات حسگری آن، کمتر دردسترس 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.

$$FOM = S \times \frac{H}{W} \qquad (۱)$$

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، ($\theta = ۰$)، به شکل زیر تعریف می‌شود:

[1] Figure Of Merit (FOM)

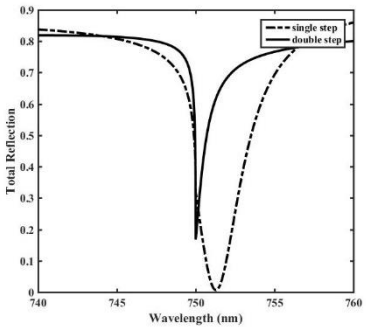
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

$$m\frac{\lambda_0}{\Lambda} = \pm\sqrt{\frac{\varepsilon_d\varepsilon_m}{\varepsilon_d+\varepsilon_m}} \qquad (۲)$$

λ_0 طول‌موج نور فرودی، m مرتبه پراش و ε_d و ε_m به‌ترتیب تابع دی‌الکتریک محیط اطراف و توری فلزی هستند. در طول‌موج‌های فروسرخ نزدیک، بخش حقیقی تابع دی-الکتریک توری فلزی، خیلی بزرگتراز 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 تقریبا همان مقدار تناوب را دارد. اکنون که مقدار عددی حساسیت را به‌دست آوردیم، مرحله بعدی، بهینه-سازی پارامترهای پله دوم و به‌دست‌آوردن بیشترین مقدار برای H/W است.

شبیه‌سازی

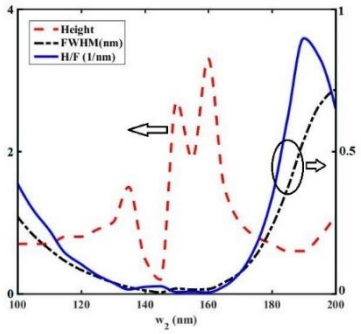
برای حل معادلات ماکسول در این‌گونه ساختارها، روش تفاضل محدود و روش المان محدود مورد استفاده قرار می-گیرد؛ در این‌جا هندسه توری با استفاده از نرم‌افزار کامسول که برپایه روش المان محدوداست، شبیه‌سازی می‌شود. هم-چنین تابع دی‌الکتریک فلز طلا طبق مدل لورنتز-دُرود تعیین می‌گردد[۳]. در همه مراحل، فرود عمود داریم و تناوب، مقدار ثابت ۷۵۰nm را داراست. طیف بازتاب برای بهینه‌ترین حالت توری دوپله‌ای در مقایسه با توری تک‌پله-ای که برآمدگی آن، کاملا در میانه هندسه قرار گرفته، در شکل ۲ نمایش داده شده‌است.



شکل ۲: مقایسه طیف بازتاب توری تک‌پله‌ای و توری دوپله‌ای

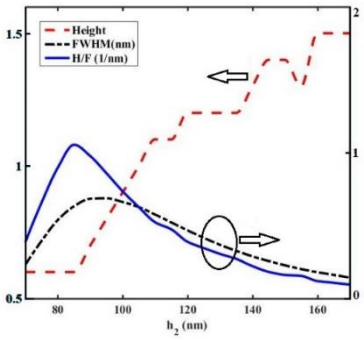
این شکل، نشان می‌دهد مشخصات سطح توری نیز در شکل نهایی طیف بازتاب، تاثیرگذار است؛ یعنی می‌توان با ایجاد تغییرات جزئی در هندسه توری، به‌عنوان مثال اضافه‌کردن یک پله دیگر، مقدار FOM را افزایش داد.

در شبیه‌سازی اول، h_1 و h_2 به‌ترتیب دارای مقادیر ۱۵۰ و ۸۰ نانومتر هستند و w_1 دارای مقدار ۱۲۰nm 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، ۰/۸۹۷nm^{-1}است. در این حالت FOM، ۶۷۲RIU^{-1} می‌شود. گام بعدی، بهینه‌سازی پارامتر h_2 خواهد بود.



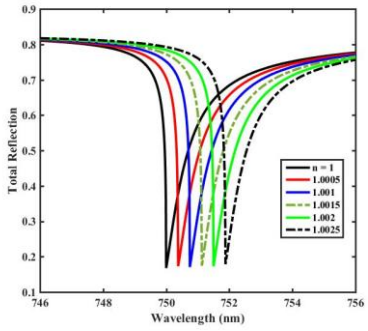
شکل ۴: نمودار ارتفاع، پهنا و نسبت این دو پارامتر، برای مقادیر مختلف ارتفاع پله دوم

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

طبق شکل ۴، بیشترین مقدار نسبت ارتفاع به پهنا، $۱/۰۵۴nm^{-1}$ است. بنابراین، درنهایت، FOM دارای مقدار $۷۹۰RIU^{-1}$ می‌شود.

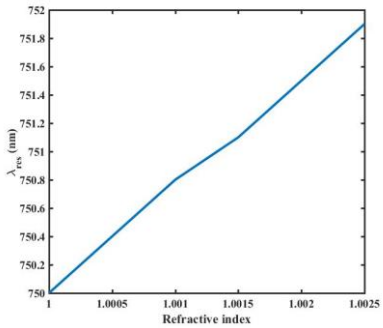
بحث و بررسی

مشاهده می‌شود بعداز طی دو مرحله شبیه‌سازی، مناسب‌ترین مقادیر برای پهنا و ارتفاع پله دوم، به‌دست می‌آیند که به‌ترتیب ۱۹۰ و ۸۵ نانومتر هستند. گام بعدی سنجش صحت کارکرد حسگر ضریب‌شکست است. بدین منظور، مقادیر مختلفی برای ضریب‌شکست محیط اطراف توری درنظرگرفته می‌شود و طیف بازتاب برای آن‌ها رسم می‌گردد. نتیجه به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:



شکل ۵: طیف بازتاب برحسب مقادیر مختلف ضریب‌شکست محیط اطراف

طبق شکل ۵ با افزایش مقدار عددی ضریب‌شکست، طیف بازتاب به سمت طول‌موج‌های بیشتر می‌رود.



شکل ۶: موقعیت مکانی طول‌موج طیف بازتاب برحسب مقادیر مختلف ضریب‌شکست محیط اطراف

شکل ۶، محل فرورفتگی طیف بازتاب را نشان می‌دهد که دارای رفتار خطی است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک حسگر ضریب‌شکست با ساختار ساده مبتنی بر توری تمام-فلزی در بازه طول‌موجی فروسرخ نزدیک طراحی شد که مقدار FWHM آن ۰/۶nm در فرود عمود است. هم‌چنین در این مقاله پارامترهای موثر بر طیف بازتاب مورد مطالعه قرار گرفت. از آن‌جایی که ویژگی‌های سطح توری در شکل طیف بازتاب نقش دارد، با تغییر کوچکی در سطح توری، یعنی اضافه‌کردن یک پله، توری ساده تک‌پله‌ای به توری دوپله‌ای تبدیل شد و FOM آن از $۱۹۹RIU^{-1}$ به $۷۹۰RIU^{-1}$ افزایش پیدا کرد. هدف این بود که با تغییرات کوچک در یک ساختار ساده، به بهینه‌سازی 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.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]