

طراحی و شبیه‌سازی سوئیچ پلاسمونیک پهن‌بند مبتنی بر دی‌اکسید وانادیوم در ناحیه فروسرخ

طاهره پناهی، نجمه نزهت

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز

T.panahi@sutech.ac.ir, nozhat@sutech.ac.ir

چکیده - در این مقاله یک نانوسوئیچ پلاسمونیک مبتنی بر دی‌اکسید وانادیوم (VO_2) در ناحیه فروسرخ طراحی و شبیه‌سازی شده است. سوئیچینگ نوری در این نانوساختار ناشی از تغییر فاز لایه VO_2 از فلز به عایق با تغییر دما است. انتقال فاز لایه VO_2 منجر به تغییر در طیف جذب نانوساختار می‌شود. با انتخاب مقادیر ۳۴۰ nm و ۲۰ nm، به ترتیب، برای ضخامت لایه‌های SiO_2 و VO_2 جذب بالای ۹۹٪ در فاز عایقی و نزدیک صفر در فاز فلزی حاصل شده است. در نتیجه، نسبت خاموشی به‌دست آمده برای سوئیچ پیشنهادی برابر ۱۱/۸ dB است. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، قابلیت بالای استفاده از اکسیدهای وانادیوم به‌عنوان ماده مناسب برای استفاده در ادوات پلاسمونیک مانند مدولاتورها و حسگرها در فرکانس‌های نوری را نشان می‌دهد.

کلیدواژه - پلاسمون سطحی، دی‌اکسید وانادیوم، سوئیچ پلاسمونیک، نسبت خاموشی.

Design and Simulation of Broadband Plasmonic Switch Based on Vanadium Dioxide in Infrared Region

Tahereh Panahi, Najmeh Nozhat

Department of Electrical Engineering, Shiraz University of Technology

T.panahi@sutech.ac.ir, nozhat@sutech.ac.ir

Abstract- In this paper, a plasmonic nanoswitch that is composed of vanadium dioxide (VO_2) in infrared region is designed and simulated. The optical switching of this nanostructure is due to the phase transition of insulation to metal in the VO_2 layer with temperature change. The phase transition of the VO_2 layer results in a change in the absorption spectrum of the nanostructure. By choosing the values of 340 nm and 20 nm for the thicknesses of the SiO_2 and VO_2 layers, respectively, the absorptions of above 99% in the insulation phase and near zero in the metal phase are obtained. Therefore, the attained extinction ratio of the proposed switch is 11.8 dB. Obtained results demonstrate the high potential of vanadium oxides as efficient material for plasmonic devices such as modulators and sensors at optical frequencies.

Keywords: Extinction Ratio, Plasmonic Switch, Surface plasmon, Vanadium Dioxide.

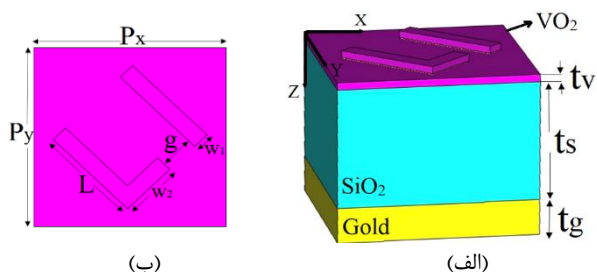
مقدمه

پلاسمونیک بخشی از علم نانوفوتونیک است که به بررسی برهم کنش موج الکترومغناطیسی و الکترون‌های آزاد فلز در نانو ساختارهای فلزی می‌پردازد. پلاسمون سطحی، نوسان‌های جمعی بارها است که در مرز بین فلز و عایق رخ می‌دهد. پلاسمون سطحی محلی^۱، تحریک‌های غیرانتشاری الکترون‌های آزاد فلزات در نانو ساختارهای فلزی کوپل شده با میدان‌های الکترومغناطیسی است [۱]. پلاریتون پلاسمون سطحی^۲ در مجاورت عایق با فیلم‌های نازک فلزی و نانو پراشه‌های فلزی تحریک و در راستای عمود بر سطح میرا می‌شود. تحریک SPP ها و LSP ها منجر به افزایش میدان‌های الکترومغناطیسی در اطراف فیلم‌های نازک فلزی، پراشه‌ها یا نانو ساختارها می‌شود. طول موج‌هایی که در آن SPP ها و LSP ها تحریک می‌شوند، به پارامترهای هندسی نانو ساختارهای پلاسمونیک بسیار حساس هستند [۱]. برای به تشدید درآوردن SPP ها، لازم است از موادی با بازده بالا استفاده شود. طلا و نقره متداول‌ترین فلزات برای تحریک موثر SPP ها هستند. ترکیب فلزات نجیب^۳ با برخی مواد جدید می‌تواند باعث افزایش تحریک SPP ها شود. به عنوان مثال، استفاده از ماده تغییر فاز اکسیدهای وانادیوم امکان‌های جدیدی برای ادوات پلاسمونیک در طیف گسترده‌ای از فرکانس‌های نوری فراهم می‌کند. در بین اکسیدهای وانادیوم، دی‌اکسید وانادیوم^۴ بیشترین توجه را به خود جلب کرده است. تغییر فاز در VO_2 در دمای 67°C رخ می‌دهد. VO_2 در دمای پایین‌تر از دمای تغییر فاز، رفتار عایقی و در دمای بالاتر از آن رفتار فلزی از خود نشان می‌دهد [۲]. انتقال فاز در فیلم‌های نازک کریستالی VO_2 با استفاده از نور [۳]، ولتاژ [۴] و یا فشار [۵] نیز می‌تواند اتفاق بیفتد. پس از گذر فاز، ساختار کریستالی VO_2 از مونوکلینیک^۵ به تتراگونال^۶ تغییر می‌کند و باعث تغییرات

اساسی در خصوصیات الکتریکی و نوری فیلم‌های VO_2 می‌شود [۱]. این ویژگی‌های منحصربه‌فرد، VO_2 را برای کاربردهای مختلف نوری قابل تنظیم مانند مدولاتورها [۶]، حسگرها [۷] و سوئیچ‌های نوری [۸] مناسب می‌سازد. در این مقاله، از ماده تغییر فاز VO_2 برای طراحی یک سوئیچ پلاسمونیک استفاده شده است. پس از معرفی ساختار پیشنهادی و پارامترهای ماده VO_2 ، عملکرد سوئیچینگ ساختار، تاثیر برخی از پارامترهای هندسی بر طیف جذب و توزیع میدان الکتریکی سوئیچ بررسی می‌شود.

معرفی ساختار پیشنهادی

در شکل (۱) یک سلول واحد از ساختار سوئیچ پیشنهادی پلاسمونیک مبتنی بر VO_2 نشان داده شده است. این نانو ساختار پلاسمونیک از چهار لایه تشکیل شده است: طلا لایه زیرین ساختار است که یک لایه دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) بر روی آن قرار دارد. بر روی لایه SiO_2 دو نانوذره طلا به شکل‌های L و I با زاویه 45° درجه و ضخامت t_v وجود دارد و کل نمونه با لایه VO_2 پوشانده شده است.



شکل ۱: نمای (الف) سه بعدی و (ب) از بالای سلول واحد ساختار سوئیچ پیشنهادی مبتنی بر VO_2 .

پارامترهای ساختار به شرح زیر است: $t_g=100\text{ nm}$, $t_s=340\text{ nm}$, $t_v=20\text{ nm}$, $L=300\text{ nm}$, $W_1=50\text{ nm}$, $W_2=170\text{ nm}$ و $g=100\text{ nm}$. همچنین، $P_x = P_y = 550\text{ nm}$. تناوب ساختار در جهت محورهای x و y را نشان می‌دهد. ضریب‌های گذردهی SiO_2 و طلا به ترتیب مطابق با داده‌های مالتی‌سان^۷ و رکیک^۸ در نظر گرفته شده است.

^۱ Localized Surface Plasmon (LSP)

^۲ Surface Plasmon Polariton (SPP)

^۳ Nobel Metals

^۴ Vanadium Dioxide

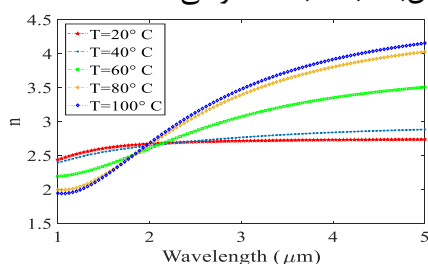
^۵ Monoclinic

^۶ Tetragonal

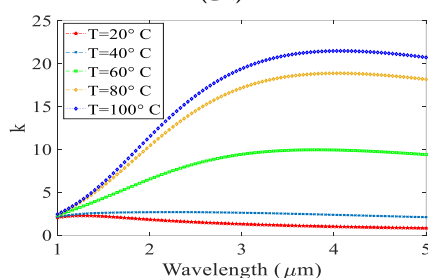
^۷ Maltison

^۸ Rakic

می‌دهد این ساختار با تغییر دما، می‌تواند به عنوان یک سوئیچ پهن‌بند با نسبت خاموشی ۱۱/۸ dB استفاده شود.

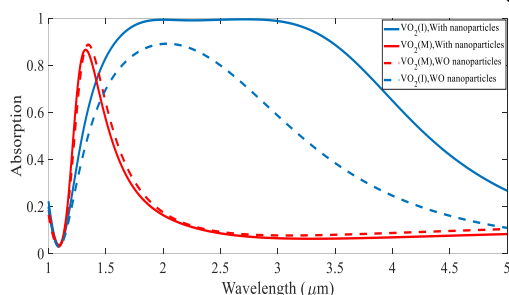


(الف)



(ب)

شکل ۲: قسمت‌های (الف) حقیقی و (ب) موهومی ضریب شکست VO₂ در دماهای مختلف.



شکل ۳: طیف جذب سوئیچ پلاسمونیک پیشنهادی با/بدون حضور نانوذرات طلا به‌ازای فازهای فلزی و عایقی VO₂.

توزیع میدان الکتریکی نانوسوئیچ ارائه شده در طول موج‌های ۱/۳ μm و ۲/۵ μm که به ترتیب، متناظر با طول موج تشدید در فازهای فلزی و عایقی لایه VO₂ است، در شکل ۴ رسم شده است. تحریک LSPها در اطراف نانوذرات فلزی در طول موج تشدید کاملاً مشخص است.

در شکل ۵، طیف جذب ساختار به‌ازای مقادیر مختلف t_v در دو فاز فلزی و عایقی رسم شده است. بیشترین مقدار جذب پهن‌بند بالای ۹۹٪ در فاز عایقی به ازای $t_v=20$ nm به دست آمده است. مطابق شکل، با افزایش ضخامت لایه VO₂، جذب در فاز فلزی کاهش می‌یابد و طول موج به سمت طول موج‌های پایین تر جابجا می‌شود.

تحلیل و شبیه‌سازی

در ابتدا وابستگی ضریب گذردهی الکتریکی VO₂ به دما بررسی می‌شود که از رابطه زیر قابل محاسبه است [۹]:

$$\varepsilon_{VO_2}(T) = f(T) \times \varepsilon_{ins} + (1 - f(T)) \times \varepsilon_{met} \quad (1)$$

که ε_{ins} و ε_{met} ، به ترتیب، ضریب‌های گذردهی VO₂ در فازهای عایقی و فلزی است. $f(T)$ تابع وابسته به دما است و به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$f(T) = 1 / \left(1 + \exp \left(\frac{T - T_t}{W \cdot T_t} \right) \right) \quad (2)$$

که T_t دمای گذر فاز، $W = k_B T$ و k_B ثابت بولتزمن است. قسمت‌های حقیقی (n) و موهومی (k) ضریب شکست VO₂ از رابطه‌های زیر به دست می‌آید [۱]:

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}} \quad (3)$$

$$k = \frac{\varepsilon_2}{2n}$$

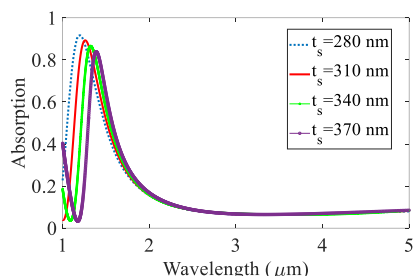
که ε_1 و ε_2 به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی VO₂ است. در شکل ۲، قسمت‌های حقیقی و موهومی ضریب شکست VO₂ در دماهای مختلف رسم شده است.

برای شبیه‌سازی ساختار، از روش المان محدود^۱ نرم‌افزار CST در حوزه فرکانس با مش‌بندی تتراهدراست استفاده شده است. یک موج صفحه‌ای که قطبش میدان الکتریکی آن در راستای x است، در جهت z به ساختار تابیده می‌شود. شرط مرزی متناوب در راستای محورهای x و y و شرط مرزی باز در راستای محور z در نظر گرفته شده است. مقدار جذب ساختار از رابطه $A=1-T-R$ به دست می‌آید که T و R به ترتیب، نشان دهنده میزان انتقال و بازتاب ساختار هستند.

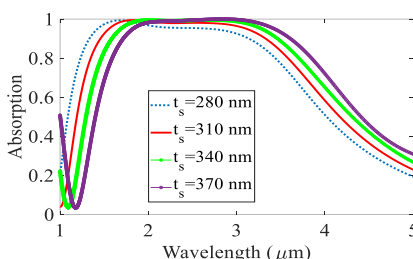
شکل ۳، طیف جذب ساختار در دو فاز فلزی و عایقی را نشان می‌دهد. مطابق نمودار، در بازه طول موجی ۱/۸۹ تا ۳ میکرومتر جذب بالای ۹۹٪ در فاز عایقی و جذب نزدیک به صفر (۱۰٪) در فاز فلزی حاصل شده، که نشان

^۱ Finite Element Method (FEM)

داده شده است. علاوه بر نسبت خاموشی ۱/۸ dB، سوئیچ پیشنهادی در حالت روشن طیف جذب پهن باند تقریباً ایده‌آل، به‌علت قرار دادن دو نانوذره L و I با زاویه ۴۵ درجه داشته است.



(الف)

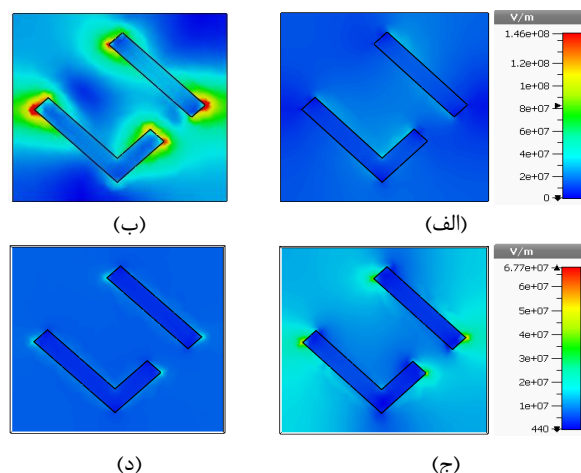


(ب)

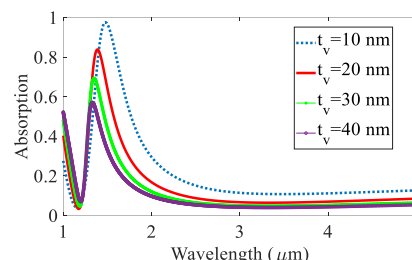
شکل ۴: تأثیر ضخامت لایه SiO₂ بر طیف جذب در فازهای (الف) فلزی و (ب) عایقی VO₂.

مرجع‌ها

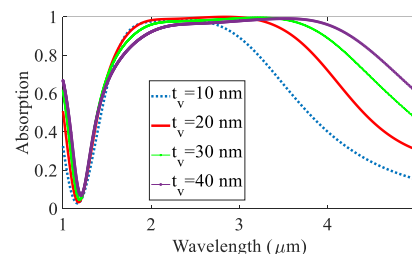
- [1] S. A. Maier, Plasmonics: Fundamental and Applications, Springer, 2007.
- [2] N. Kumar, A. Rua, J. Aldama, K. Echeverria, F. Fernandez, and S. Lysenko, "Photoinduced surface plasmon switching at VO₂/Au interface," Opt. Express, Vol. 26, pp. 13773-13782, 2018.
- [3] Z. Yang, C. Ko, and S. Ramanathan, "Oxide electronics utilizing ultrafast metal insulator transitions," Annu. Rev. Mater. Res. Vol. 41, pp. 337-367, 2011.
- [4] Y. Muraoka, T. Yamauchi, Y. Ueda, and Z. Hiroi, "Efficient photocarrier injection in a transition metal oxide," J. Phys. Vol. 14, pp. L757-L763, 2002.
- [5] J. M. Gregg and R. M. Bowman, "The effect of applied strain on the resistance of VO₂ thin films," Appl. Phys. Lett. Vol. 71, pp. 3649-3651, 1997.
- [6] L. Jiang and W. N. Carr, "Design, fabrication and testing of a micromachined thermo-optical light modulator based on a vanadium dioxide array," J. Micromech. Microeng. Vol. 14, pp. 833-840, 2004.
- [7] F. Liao, C. Lu, G. Yao, Z. Yan, M. Gao, T. Pan, Y. Zhang, X. Feng, and Y. Lin, "Ultrasensitive flexible temperature-mechanical dual-parameter sensor based on vanadium dioxide films," IEEE Electron Device Lett. Vol. 38, pp. 1128-1131, 2017.
- [8] M. Soltani, M. Chaker, E. Haddad, and R. Kruzelesky, "1×2 optical switch devices based on semiconductor-to-metallic phase transition characteristics of VO₂ smart coatings," Meas. Sci. Technol. Vol. 17, pp. 1052-1056, 2006.
- [9] M. Currie, M. A. Mastro and V. D. Wheeler, "characterizing the tunable refractive index of vanadium dioxide," Opt. Mater. Express, Vol. 7, pp. 1697-1707, 2017.



شکل ۴: توزیع میدان الکتریکی برای فازهای (الف) و (ب) عایقی و (ج) و (د) فلزی لایه VO₂ در طول موج‌های (الف) و (ج) ۱/۳ μm و (د) و (ب) ۲/۵ μm.



(الف)



(ب)

شکل ۵: تأثیر ضخامت لایه VO₂ بر طیف جذب در فاز (الف) فلزی و (ب) عایقی.

در شکل ۶، طیف جذب سوئیچ پیشنهادی به‌ازای مقادیر مختلف t_s در دو فاز فلزی و عایقی رسم شده است. مطابق شکل با افزایش t_s طول موج به سمت طول موج‌های بالاتر جابجا می‌شود و بیشترین مقدار جذب در فاز عایقی به‌ازای $t_s = 340 \text{ nm}$ به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سوئیچ نوری پهن‌بند مبتنی بر ماده تغییر فاز VO₂ ارائه و طیف جذب ساختار پیشنهادی بررسی شده است. عمل سوئیچینگ نوری ساختار بر اساس تغییر میزان جذب به‌ازای تغییر فاز لایه VO₂ نشان