بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

طراحی و شبیه‌سازی سوئیچ پلاسمونیک پهن‌باند 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، به‌ترتیب، 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.

کلید واژه- 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.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

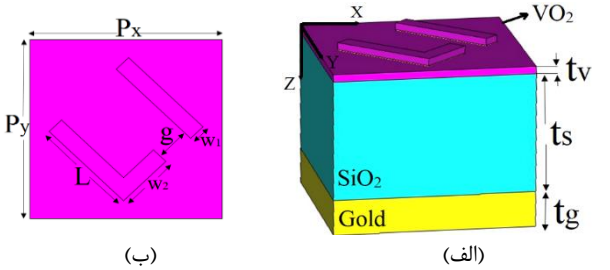
مقدمه

پلاسمونیک بخشی از علم نانوفوتونیک است که به بررسی برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی و الکترون‌های آزاد فلز در نانوساختارهای 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 نانوساختارهای فلزی کوپل شده با میدان‌های الکترومغناطیسی است [۱]. پلاریتون پلاسمون سطحی[۲] در مجاورت عایق با فیلم‌های نازک فلزی و نانوپراشه‌های فلزی تحریک و در راستای عمود بر سطح میرا می‌شود. تحریک SPPها و LSPها منجر به افزایش میدان‌های الکترومغناطیسی در اطراف فیلم‌های نازک فلزی، پراشه‌ها یا نانوساختارها می‌شود. طول موج‌هایی که در آن SPPها و LSPها تحریک می‌شوند، به پارامترهای هندسی نانوساختارهای پلاسمونیک بسیار حساس هستند [۱]. برای به تشدید درآوردن SPPها، لازم است از موادی با بازده بالا استفاده شود. طلا و نقره متداول‌ترین فلزات برای تحریک موثر SPPها هستند. ترکیب فلزات نجیب[۳] با برخی مواد جدید می‌تواند باعث افزایش تحریک SPPها 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 ۶۷ $^{\circ}C$ 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 سوییچ 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 نانوساختار پلاسمونیک از چهار لایه تشکیل شده است: طلا لایه زیرین ساختار است که یک لایه دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) برروی آن قرار دارد. برروی لایه SiO_2 دو نانوذره طلا به شکل‌های L و I با زاویه ۴۵ درجه و ضخامت t_v وجود دارد و کل نمونه با لایه VO_2 پوشانده شده است.



شکل۱: 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=۱۰۰ nm، t_s=۳۴۰ nm، t_v= ۲۰nm، L=۳۰۰ nm، w_1=۵۰ nm، w_2=۱۷۰ nm و g=۱۰۰ nm. همچنین، $P_x = P_y$ =۵۵۰ nm تناوب ساختار در جهت محورهای x و y را نشان می‌دهد. ضریب‌های گذردهی SiO_2 و طلا به‌ترتیب 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

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

تحلیل و شبیه‌سازی

در ابتدا وابستگی ضریب گذردهی الکتریکی VO_2 به دما بررسی می‌شود که از رابطه زیر قابل محاسبه است [۹]:

$$\varepsilon_{VO_2}(T)=f(T)\times\varepsilon_{ins}+\left(1-f(T)\right)\times\varepsilon_{met} \qquad (۱)$$

که ε_{ins} و ε_{met}، به‌ترتیب، ضریب‌های گذردهی VO_2 در فازهای عایقی و فلزی است. $f(T)$ تابع وابسته به دما است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$f(T)=1/\left(1+\exp\left(\frac{T-T_t}{W.T_t}\right)\right) \qquad (۲)$$

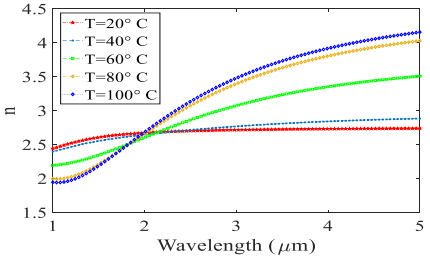
که T_t دمای گذر فاز، $W= k_BT$ و k_B ثابت بولتزمن است. قسمت‌های حقیقی (n) و موهومی (k) ضریب شکست VO_2 از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید [۱]:

$$n=\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{\varepsilon_1^2+\varepsilon_2^2}}$$
$$k=\frac{\varepsilon_2}{2n} \qquad (۳)$$

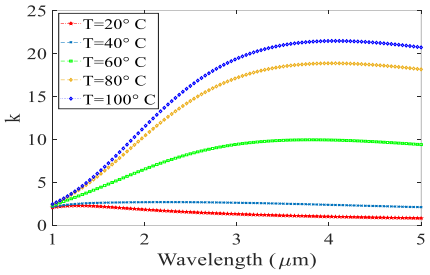
که ε_1 و ε_2 به‌ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی VO_2 است. در شکل ۲، قسمت‌های حقیقی و موهومی ضریب شکست VO_2 در دما های مختلف رسم شده است.

برای شبیه‌سازی ساختار، از روش المان محدود[۱] نرم‌افزار CST در حوزه فرکانس با مش‌بندی تتراهدرال 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 به‌دست می‌آید که T و R به‌ترتیب، 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 می‌دهد این ساختار با تغییر دما، می‌تواند به عنوان یک سوئیچ پهن‌باند با نسبت خاموشی ۱۱/۸ dB استفاده شود.

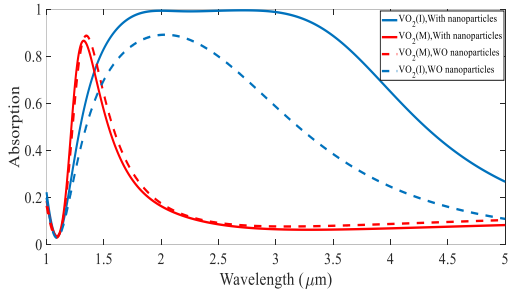


(الف)



(ب)

شکل ۲: قسمت‌های (الف) حقیقی و (ب) موهومی ضریب شکست VO_2 در دماهای مختلف.



شکل ۳: طیف جذب سوئیچ پلاسمونیک پیشنهادی با/بدون حضور نانوذرات طلا به‌ازای فازهای فلزی و عایقی VO_2.

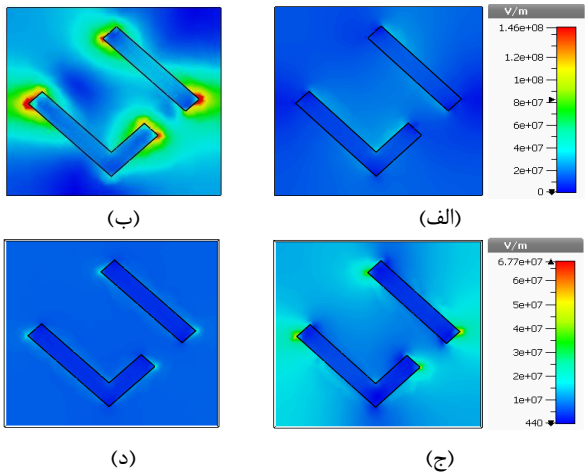
توزیع میدان الکتریکی نانوسوئیچ ارائه شده در طول موج‌های ۱/۳ µm و ۲/۵ µm که به‌ترتیب، متناظر با طول موج تشدید در فازهای فلزی و عایقی لایه VO_2 است، در شکل ۴ رسم شده است. تحریک LSPها در اطراف نانوذرات فلزی در طول موج تشدید کاملا مشخص است.

در شکل ۵، طیف جذب ساختار به‌ازای مقادیر مختلف t_v در دو فاز فلزی و عایقی رسم شده است. بیشترین مقدار جذب پهن‌باند بالای ۹۹٪ در فاز عایقی به ازای t_v=۲۰ nm به‌دست آمده است. مطابق شکل، با افزایش ضخامت لایه VO_2، جذب در فاز فلزی کاهش می‌یابد و طول‌موج به سمت طول‌موج‌های پایین تر جابجا می‌شود.

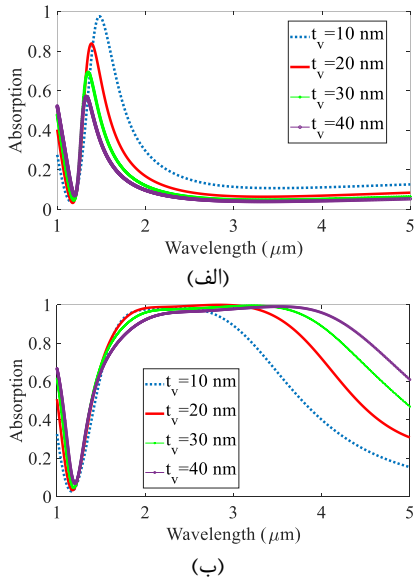
[۱] Finite Element Method (FEM)

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]



شکل ۴: توزیع میدان الکتریکی بـرای فازهـای (الـف) و (ب) عـایقی و (ج) و (د) فلـزی لایـه VO_2 در طـول‌مـوج‌هـای (الـف) و (ج) ۱/۳ µm و (ب) و (د) ۲/۵ µm.

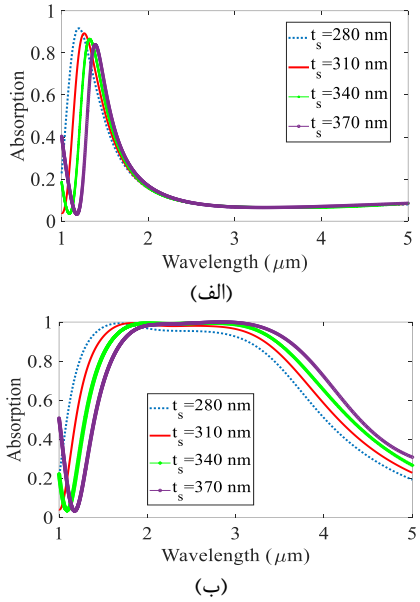


شکل ۵: تاثیر ضخامت لایه VO_2 بر طیف جذب در فـاز (الـف) فلـزی و (ب) عایقی.

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=۳۴۰nm به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

دراین مقاله، یک سوئیچ نوری پهن‌باند مبتنی بر ماده تغییر فاز VO_2 ارائه و طیف جذب ساختار پیشنهادی بررسی شده است. عمل سوئیچینگ نوری ساختار بر اساس تغییر میزان جذب به‌ازای تغییر فاز لایه VO_2 نشان داده شده است. علاوه‌بر نسبت خاموشی ۱۱/۸ dB، سوئیچ پیشنهادی در حالت روشن طیف جذب پهن‌باند تقریبا ایده‌آل، به‌علت قرار دادن دو نانوذره L و I با زاویه ۴۵ درجه داشته است.



شکل ۶: تاثیر ضخامت لایه SiO_2 بر طیف جـذب در فازهـای (الـف) فلـزی و (ب) عایقی VO_2.

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 VO_2/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 VO_2 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.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]