

بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. ۱۳۹۸ 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 (VO2) در ناحیه فروسرخ طراحی و شبیهسازی شده است. سوئیچینگ نوری در این نانوساختار ناشی از تغییر فاز لایه VO2 از فلز به عایق با تغییر دما است. انتقال فاز لایه VO2 منجر به تغییر در طیف جذب نانوساختار میشود. با انتخاب مقادیر ۳۴۰ nm و ۲۰۰۳ به تر تیب، برای ضخامت لایههای SiO2 و VO2 جـذب بالای ۹۹٪ در فاز عایقی و نزدیک صفر در فاز فلزی حاصل شده است. در نتیجه، نسـبت خاموشـی بهدسـت آمـده بـرای سـوئیچ پیشنهادی برابر dB ۱۱/۸ dB است. نتایج بهدست آمده در این پژوهش، قابلیت بالای استفاده از اکسیدهای وانـادیوم بـهعنـوان مـده مناسب برای استفاده در ادوات پلاسمونیک مانند مدولاتورها و حسگرها در فرکانسهای نوری را نشان میدهد.

كليد واژه- پلاسمون سطحي، دى كسيد واناديوم، سوئيچ پلاسمونيك، نسبت خاموشي.

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 (VO₂) 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 VO₂ layer with temperature change. The phase transition of the VO₂ 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 SiO₂ and VO₂ 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.

مقدمه

پلاسمونیک بخشی از علم نانوفوتونیک است که به بررسی برهم کنش موج الکترومغناطیسی و الکترونهای آزاد فلز در نانوساختارهای فلزی می پردازد. پلاسمون سطحی، نوسان های جمعی بارها است که در مرز بین فلز و عایق رخ مىدهد. پلاسمون سطحى محلى'، تحريكهاى غیرانتشاری الکترونهای آزاد فلزات در نانوساختارهای فلزى كويل شده با ميدانهاى الكترومغناطيسي است [۱]. پلاریتون پلاسمون سطحی^۲ در مجاورت عایق با فیلمهای نازک فلزی و نانوپراشههای فلزی تحریک و در راستای عمود بر سطح میرا می شود. تحریک SPPها و LSPها منجر به افزایش میدانهای الکترومغناطیسی در اطراف فیلمهای نازک فلزی، پراشهها یا نانوساختارها می شود. طول موجهایی که در آن SPPها و LSPها تحریک می شوند، 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 متداول ترین فلزات برای تحریک موثر SPPها هستند. ترکیب فلزات نجیب^۳ با برخی مواد جدید مى تواند باعث افزايش تحريك 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 واناديوم، دىاكسيد واناديوم[†] بيشترين توجه را به خود جلب کرده است. تغییر فاز در VO₂ در دمای C° ۶۷ رخ میدهد. VO₂ 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 VO₂ با استفاده از نور [٣]، ولتاژ [۴] و يا فشار [۵] نيز مي تواند اتفاق بیفتد. پس از گذر فاز، ساختار کریستالی VO₂ از مونوکلینیک^۵ به تتراگونال^۶ تغییر می کند و باعث تغییرات

اساسی در خصوصیات الکتریکی و نوری فیلمهای VO₂ میشود [۱]. این ویژگیهای منحصربهفرد، VO₂ 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 VO₂ برای طراحی یک سوییچ پلاسمونیک استفاده شده است. پس از معرفی ساختار پیشنهادی و پارامترهای ماده VO₂، عملکرد سوئیچینگ ساختار، تاثیر برخی از پارامترهای هندسی بر طیف جذب و توزیع میدان الکتریکی سوئیچ بررسی می-شود.

معرفى ساختار پيشنهادى

در شکل (۱) یک سلول واحد از ساختار سوئیچ پیشنهادی پلاسمونیک مبتنی بر VO₂ نشان داده شده است. این نانوساختار پلاسمونیک از چهار لایه تشکیل شده است: طلا لایه زیرین ساختار است که یک لایه دیاکسید سیلیکون (SiO₂) برروی آن قرار دارد. برروی لایه SiO₂ دو سیلیکون (SiO₂) برروی آن قرار دارد. برروی لایه SiO₂ دو نانوذره طلا به شکلهای L و I با زاویه ۴۵ درجه و ضخامت tv وجود دارد و کل نمونه با لایه VO₂ پوشانده شده است.



شکل۱: نمای (الف) سه بعدی و (ب) از بالای سـلول واحـد سـاختار سـوئیچ پیشنهادی مبتنی بر VO2.

nm ، $t_g=1...$ nm پارامترهای ساختار به شرح زیر است: nm ، $t_g=1...$ nm ،L=7... nm ، $t_v=7...$ rs. $t_s=7...$ $P_x = P_y = 0.0...$ nm ،L=7... همچنین، g=1... $W_2=1...$ p $_2=1...$ rileب ساختار در جهت محورهای x و y را نشان می دهد. ضریبهای گذردهی SiO2 و طلا بهترتیب مطابق با داده-های مالتی سان^Y و رکیک^A در نظر گرفته شده است.

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

¹ Localized Surface Plasmon (LSP)

^v Surface Plasmon Polariton (SPP)

^{*} Nobel Metals

^{*} Vanadium Dioxide

^a Monoclinic

^{&#}x27; Tetragonal

^v Maltison

[^] Rakic

تحلیل و شبیه سازی در ابتدا وابستگی ضریب گذردهی الکتریکی VO₂ به دما بررسی می شود که از رابطه زیر قابل محاسبه است [۹]: $\varepsilon_{v\alpha}(T) = f(T) \times \varepsilon_{m} + (1 - f(T)) \times \varepsilon_{met}$ (۱)

که \mathcal{E}_{ins} و \mathcal{E}_{met} ، به ترتیب، ضریبهای گذردهی VO₂ در \mathcal{E}_{ins} و \mathcal{E}_{ins} ، به ترتیب، ضریبهای گذردهی VO₂ در فازهای عایقی و فلزی است. f(T) تابع وابسته به دما است و به صورت زیر تعریف می شود [۹]:

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

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 بهدست میآید [1]:

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}}$$

$$k = \frac{\varepsilon_2}{2n}$$
(*)

که ₁² و ₂² بهترتیب قسمتهای حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی VO₂ است. در شکل ۲، قسمتهای حقیقی و موهومی ضریب شکست VO₂ در دما های مختلف رسم شده است.

برای شبیه سازی ساختار، از روش المان محدود ^۱ نرمافزار CST در حوزه فرکانس با مش بندی تتراهدرال استفاده شده است. یک موج صفحه ای که قطبش میدان الکتریکی آن در راستای محورهای x و y و آن در راستای محورهای x و y و می شرط مرزی باز در راستای محور z در نظر گرفته شده است. مقدار جذب ساختار از رابطه A=1-T-A به دست می آید که T و x به تشان 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

می دهد این ساختار با تغییر دما، می تواند به عنوان یک سوئیچ یهن باند با نسبت خاموشی طا ۱۱/۸ dk استفاده شود.



(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 μm ۱/۳ و μm ۲/۵ که بهترتیب، 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 کاملا مشخص است. در شکل ۵، طیف جذب ساختار بهازای مقادیر مختلف v در دو فاز فلزی و عایقی رسم شده است. بیشترین مقدار جذب پهنباند بالای ۹۹٪ در فاز عایقی به ازای m ۲۰=v بهدست آمده است. مطابق شکل، با افزایش ضخامت لایه بهدست طول موج های پایین تر جابجا می شود.

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

¹ Finite Element Method (FEM)



شکل ۴: توزیع میدان الکتریکی بـرای فازهـای (الـف) و (ب) عـایقی و (ج) و (د) فلـزی لایـه VO2 در طـولمـوجهـای (الـف) و (ج) μm ۱/۳ و (ب) و (د) ۲/۵ μm.



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

در شکل ۶، طیف جذب سوئیچ پیشنهادی بهازای مقادیر مختلف ts در دو فاز فلزی و عایقی رسم شده است. مطابق شکل با افزایش ts طول موج به سمت طول موجهای بالاتر جابجا میشود و بیشترین مقدار جذب در فاز عایقی بهازای ts=۳۴۰nm

نتيجهگيرى

دراین مقاله، یک سوئیچ نوری پهنباند 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

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 SiO₂ بر طیف جـذب در فازهـای (الـف) فلـزی 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 temperaturemechanical 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.