بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

تحلیل و شبیه‌سازی سه‌بعدی یک مدولاتور فاز پلاسمونیک-پلیمری

محسن صالحی و نصرت‌ا... گرانپایه

دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، تهران، ایران.

ms.salehi@kntu.ac.ir granpayeh@kntu.ac.ir

چکیده – در این مقاله عملکرد یک مدولاتور پلاسمونیک که در آن با اعمال ولتاژ *DC* یا *RF* می‌توان فاز پلاسمون پلاریتون‌های سطحی را تغییر داد، به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و تحلیل شده است. در این قطعه ابتدا نور از یک موجبر سیلیکونی وارد یک مبدل شده و از مد فوتونیک به پلاسمونیک تبدیل می‌شود. سپس با انتشار در یک ساختار فلز-عایق-فلز و با تمرکز شدید میدان در سطح مشترک فلز-عایق و نیز هم‌پوشانی شدید با میدان الکتریکی بایاس اعمال‌شده به دو فلز، تغییر فاز یافته و در خروجی مجدداً با عبور از یک مبدل دیگر به مد فوتونیک تبدیل می‌شود. تغییر فاز پلاسمون‌ها از طریق اثر الکترواپتیک موسوم به پاکلز در عایق پلیمری با ضریب الکترواپتیک بالا و نتیجتاً تغییر ضریب شکست متناسب با میدان بایاس صورت می‌گیرد. در این ساختار نشان داده شده است که مقدار پارامتر حاصلضرب ولتاژ در طول لازم برای ایجاد اختلاف فاز π به میزان ۱/۶۳ ولت-میلی‌متر کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: با قرار دادن این مدولاتور فاز در یک ساختار ماخ-زندر، می‌توان یک مدولاتور دامنه با ابعاد میکرومتری ساخت.

کلید واژه- مدولاتور پلاسمونیک، مدولاتور فاز، اثر الکترواپتیک پاکلز.

Analysis and 3-D Simulation of a Plasmonic-Polymer Phase Modulator

Mohsen Salehi and Nosrat Granpayeh

K.N.Toosi university of Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tehran, Iran.

Abstract- In this paper the performance of a plasmonic modulator, in which the phase of surface plasmon polaritons with a DC or RF bias can be changed, is analyzed and simulated. In such a device, first the light propagating in a silicon waveguide enters a converter section and is converted from photonic mode to plasmonic mode. The surface plasmon polaritons propagate in a metal-insulator-metal structure and are highly confined to metal-insulator interface with high overlapping with bias electric field, experiences a phase change and afterwards is converted again to photonic mode in output converter. The electro-optic "Pockels" effect is responsible for changing the phase of the plasmons in the polymer insulator with a large electro-optic coefficient and consequently a change in refractive index proportional to the bias electric field. It is shown that in this structure the parameter of multiplication of voltage and length, necessary for inducing a phase shift of π is reduced to 1.63 V-mm. Using this phase modulator in a Mach-Zehnder structure, an intensity modulation can be achieved.

Keywords: Plasmonic modulator, Phase modulator, Electro-optic Pockels effect.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

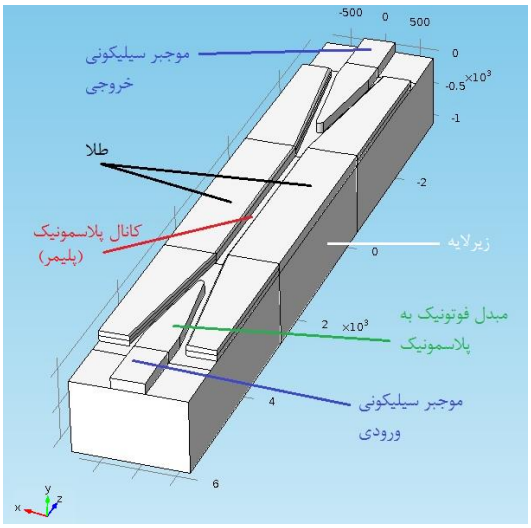
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

مدولاتور فاز یک افزاره مهم در مخابرات نوری است. در کنار سایر اثرهای غیرخطی برای ایجاد تغییر فاز در موج، یکی از اثرهای مورد استفاده اثر الکترواپتیک پاکلز است [۱]. تا پیش از گسترش استفاده از دانش پلاسمونیک، اکثر مدولاتورهای فازی که بر این مبنا و با استفاده از ماده معروف $LiNbO_3$ ساخته می‌شدند به علت محدودیت پراش نور در حد میلی‌متری بودند [۲]. دانش پلاسمونیک روشن ساخت که تزویج میدان به نوسان پلاسمون‌های سطح فلز-عایق می‌تواند محدودسازی و تمرکز شدید میدان و درنتیجه کوچکتر کردن یک افزاره و کشاندن آن به زیر حد پراش نور را به همراه داشته باشد [۳-۵]. در میان سوئیچ‌ها و مدولاتورهای پلاسمونیک، مانند افزاره‌های با تشدیدگر[۶] ، با اثر حرارتی-پلاسمونیک [۷]، با اثر پاشندگی حامل‌های آزاد [۸]، کنترل چگالی حامل‌ها [۹]، این مدولاتور با اثر الکترواپتیک پاکلز است که در مجموع سرعت بالا، طول کمتر قطعه، مصرف کمتر انرژی و پهنای باند بالاتر را از خود نشان می‌دهد [۷] و [۱۰-۱۱]. با گسترش دانش مهندسی مواد، امکان تولید ماده‌هایی با ضریب الکترواپتیک بسیار زیاد و پاسخ تقریباً بدون تاخیر نسبت به یک بایاس مایکروویو فراهم شده است [۱۰].

در این مقاله مدولاتور پلاسمونیک فازی متشکل از دو ورقه طلا و ماده‌ی پلیمر بین آن شبیه‌سازی شده است. چنانکه در شکل ۱ دیده می‌شود این افزاره در ابتدا و انتهای خود از طریق دو مبدل فوتونیک به پلاسمونیک و بالعکس به موجبر سیلیکونی و در نتیجه سایر مدارهای سیلیکونی متصل می‌شود. یک ولتاژ چه به صورت DC و چه در فرکانس رادیویی یا مایکروویو به عنوان بایاس به دو ورقه‌ی فلزی اعمال می‌شود. میدان الکتریکی ایجادشده در شکاف کانال پلاسمونیک برهم‌پوشانی شدیدی با میدان پلاسمونیک پیدا کرده و باعث ایجاد تغییر فاز و به عبارتی مدوله کردن فاز آن می‌شود.

این قطعه پیش از این به صورت آزمایشگاهی ساخته و آزمایش شده است[۱۰]، اما شبیه‌سازی آن فقط به صورت دوبعدی و در سطح مقطع کانال پلاسمونیک انجام شده است. در این مقاله یک شبیه‌سازی تمام‌موج سه‌بعدی از کل افزاره با همه‌ی بخش‌های آن در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر به روش المان محدود و با نرم‌افزار تجاری COMSOL Multiphysics® در دو حالت تک مدولاتور و نیز در ساختار ماخ-زندر انجام شده و عملکرد بخش‌های مختلف افزاره به خصوص اثر طراحی دقیق خمیدگی لبه‌های فلز تحلیل و گزارش شده است.



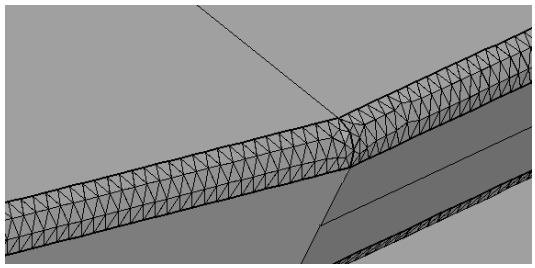
شکل ۱- ساختار کلی مدولاتور فاز پلاسمونیک-پلیمری

۲- تئوری و روش شبیه‌سازی

۲-۱- ابعاد و مشخصات کلی

در این قطعه ضخامت طلا ۱۵۰ نانومتر، فاصله شکاف بین دو فلز ۱۴۰ نانومتر و ضخامت زیرلایه ۲ میکرومتر درنظرگرفته شده است. پهنای موجبر سیلیکونی ۴۵۰ نانومتر و ارتفاع آن ۲۲۰ نانومتر است. ضریب شکست سیلیکون $n_{Si}=3.48$، زیرلایه $n_{SiO_2}=1.44$ و پلیمر $n_{Polymer}=1.68$ است.

ازآنجاکه فلز روی تراشه نمی‌تواند لبه‌های تیز داشته باشد و نیز چون این ناحیه محل تمرکز شدید میدان خواهد بود، در طراحی سه‌بعدی خمیدگی لبه‌های فلز و مش‌بندی دقیق در آن ناحیه رعایت شده است (شکل ۲).



شکل ۲- مش‌بندی سه‌بعدی خمیدگی لبه‌های فلز

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۲-۲- کانال پلاسمونیک

طلا در فرکانس نوری دارای ضریب دی‌الکتریک منفی ($\varepsilon < 0$) با مقدار مطلق بزرگی است که امکان تمرکز شدید میدان نوری در سطح مشترک فلز-عایق را ایجاد می‌کند. برای این منظور از رابطه‌ی ارائه شده توسط جانسون و کریستی برای ضریب شکست در شبیه‌سازی استفاده شده است [۱۲].

۲-۳- اثر الکترواپتیک پاکلز

ضریب شکست یک ماده با اعمال میدان الکتریکی خارجی طی اثر پاکلز تغییر می‌کند. این تغییر با توان اول میدان الکتریکی متناسب است و در اصل با رابطه‌های تانسوری بیان می‌شود، اما با کمی تقریب از معادله زیر استفاده می‌شود ([۱]، [۱۰] و [۱۳]):

$$\Delta n_{polymer} = \frac{1}{2} n_{polymer}^3 r_{33} \frac{U}{w_{gap}} \qquad (۱)$$

که در آن r_{33} ضریب الکترواپتیک ماده، U ولتاژ بایاس خارجی و w_{gap} عرض شکاف کانال است. این تغییر ضریب شکست پلیمر در یک نقطه و وابسته به میدان بایاس در آن نقطه است و در مجموع برای همه‌ی نقاط یک تغییر ضریب شکست موثر (Δn_{eff}) می‌توان فرض کرد که باعث ایجاد تغییر فاز در طول کانال (L) می‌شود:

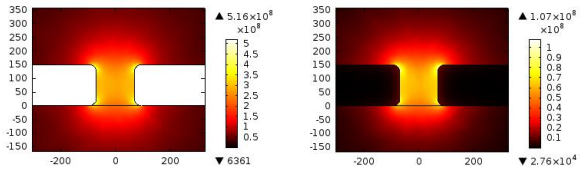
$$\Delta\phi = \Delta\beta \times L = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta n_{eff} \times L \qquad (۲)$$

مقدار ضریب r_{33} پلیمر استفاده‌شده ۱۷۰ پیکومتربرولت است که البته پس از فرایند لایه‌نشانی پلیمر بر روی تراشه این مقدار قابل دستیابی نیست و مقدار ۲۱ پیکومتربرولت گزارش شده است که مبنای این تحقیق نیز قرار گرفته‌است [۱۰].

در کامسول این اثر در دو مرحله محاسبه می‌شود. ازآنجاکه فرکانس مایکروویو بایاس در مقابل فرکانس نوری بسیار کم است و استاتیک به‌نظر می‌رسد، ابتدا با استفاده از روش الکتریسیته‌ی ساکن توزیع میدان بایاس در ساختار پیدا شده و سپس در حل حوزه فرکانس از این نتایج برای تغییر ضریب شکست پلیمر استفاده می‌شود. تحریک پورت‌ها با تحلیل مودال انجام می‌شود.

۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث

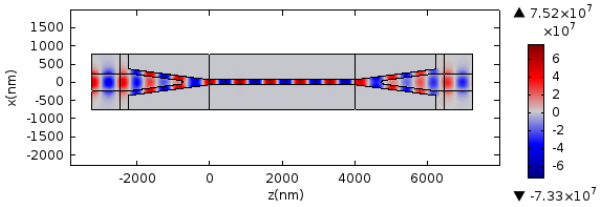
شبیه‌سازی سه‌بعدی انجام شده و در این بخش نتایج ارائه و بحث می‌شود. در شکل ۳ (الف) توزیع میدان الکتریکی در فرکانس نوری و در سمت چپ (ب) توزیع میدان الکتریکی الکترواستاتیک (بایاس) در سطح مقطع عرضی کانال پلاسمونیک (xy) دیده می‌شود. در هر دو شکل تمرکز شدید میدان در لبه‌های خمیده‌ی فلز و در نتیجه یک برهم‌پوشانی مناسب دو میدان نوری و بایاس مشهود است.



(ب) (الف)

شکل ۳: توزیع میدان الکتریکی در سطح مقطع کانال (الف) در فرکانس نوری و (ب) در الکترواستاتیک

در شکل ۴ توزیع میدان الکتریکی E_x در فرکانس نوری از نمای بالا (صفحه xz) ملاحظه می‌شود. موج از سمت چپ و پس از ورود به بخش گوه‌ای‌شکل به تدریج به مد پلاسمونیک تبدیل شده و در کانال پلاسمونیک انتشار می‌یابد. در پایان نیز مجدداً به مد فوتونیک تبدیل شده و از موجبر سیلیکونی سمت راست خارج می‌شود.



شکل ۴: توزیع مولفه x میدان الکتریکی نوری از نمای بالا

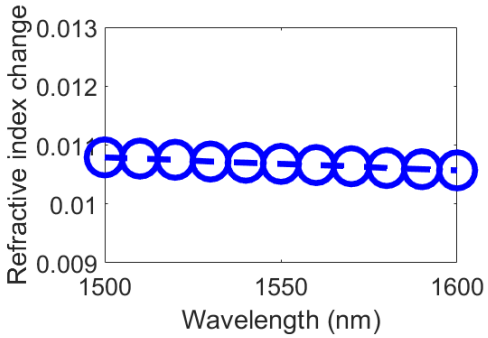
میزان اتلاف برای کانال به طول ۲۴ میکرومتر به همراه دو بخش گوه‌ای ۲/۵ میکرومتری برابر ۱۴/۳ دسی‌بل حاصل شده است. بررسی بیشتر نشان داد که تلف کانال حدود ۰.۳ دسی‌بل‌برمیکرومتر و در نتیجه هر کدام از مبدل‌ها حدود ۳/۵ دسی‌بل اتلاف دارند. در این شبیه‌سازی به دو ورقه‌ی فلزی، یک بار بایاس صفر و بار دیگر بایاس ۴/۷ ولت اعمال شده است که با مقایسه دو حالت، مقدار حاصلضرب ولتاژ در طول لازم برای ایجاد اختلاف فاز π به میزان ۱/۶۳ ولت-میلی‌متر حاصل شده است.

درصورتی‌که در سطح مقطع عرضی کانال پلاسمونیک یک تحلیل مودال انجام شود، تغییرات ضریب شکست موثر

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

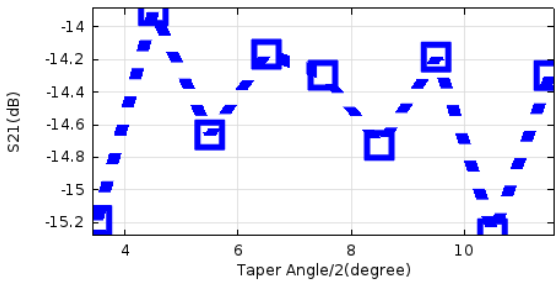
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

نسبت به طول‌موج از ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ نانومتر مطابق شکل ۵ خواهد بود که در این بازه طول‌موجی تغییرات آهسته‌ی خطی دارد.



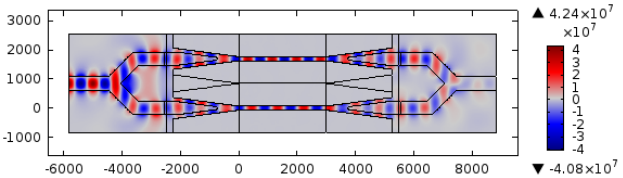
شکل ۵: تغییر ضریب شکست موثر بر حسب طول موج

در شکل ۶ منحنی تلف S21(dB) برحسب زاویه بخش گوه‌ای (مبدل فوتونیک-پلاسمونیک) رسم شده است. هرچند ساختار با زاویه ۱۵ درجه ساخته شده است [۱۰]، اما از حیث کمترین تلف (بدون درنظر گرفتن ملاحظات ساخت) بهترین زاویه ۹ درجه مشاهده می‌شود.



شکل ۶: تلف S21(dB) برحسب زاویه بخش گوه‌ای

در یک شبیه‌سازی سه‌بعدی دیگر دو مدولاتور فاز در دو بازوی یک ساختار ماخ-زندر قرار گرفته‌اند و ولتاژ بایاس به‌نحوی به ساختار اعمال شده است که مطابق شکل ۷ در دو بازو اختلاف فاز ۱۸۰ درجه ایجاد شود. در اینجا مقسم نوری Y-شکل در سمت راست بهینه نشده است و اتلاف بالایی دارد و این شکل صرفاً برای نشان دادن اختلاف فاز و تداخل تخریبی موج خروجی از دو بازو ارائه شده است.



شکل ۷: تداخل تخریبی در یک ساختار ماخ-زندر

۴- نتیجه‌گیری

دراین مقاله با مطالعه‌ی عملکرد یک مدولاتور فاز پلاسمونیک و با تحلیل میدان الکتریکی بایاس که موجب تغییر ضریب شکست می‌شود و نیز تحلیل انتشار میدان نوری در ساختار نشان داده شد که می‌توان با مقدار ولتاژ-طول معادل ۱/۶۳ ولت-میلی‌متر، اختلاف فاز π ایجاد کرده و با قرار دادن مدولاتور در یک ساختار ماخ-زندر، مدولاسیون دامنه ایجاد کرد.

مراجع

[1] F.A. Lopez, J.M. Cabrera, and F.A. Rueda, *Electrooptics, Phenomena, Materials and Applications*, Academic Press, 1994.

[2] E. L. Wooten, K. M. Kissa,A. Yi-Yan, E. J. Murphy, D. A. Lafaw, P. F. Hallemeier, D. Maack, D. V. Attanasio, D. J. Fritz, G. J. McBrien, and D. E. Bossi, "A Review of Lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communication Systems", IEEE J. Sel. Top. Quant., Vol. 6, pp. 69-82, 2000.

[3] M. Dragoman and D. Dragoman, "Plasmonics: Applications to nanoscale terahertz and optical devices," Prog. Quant. Electron, Vol. 32, pp. 1-41, 2008.

[4] V. J. Sorger, R. F. Oulton, R.M. Ma, and X. Zhang, "Toward integrated plasmonic circuits," MRS Bull., Vol. 37, pp. 728–738, 2012.

[5] M. L. Brongersma and V. M. Shalaev, "Applied physics. the case for plasmonics," Science, Vol. 328, pp. 440–441, 2010.

[6] M. Xu, F. Li, T.Wang, J. Wu, L. Lu, L. Zhou and Y. Su," Design of an Electro-Optic Modulator Based on a Silicon-Plasmonic Hybrid Phase Shifter", J. Lightwave. Technol., Vol. 31, pp. 1170-1177, 2013.

[7] A. Emboras, C. Hoessbacher, C. Haffner, W. Heni, U. Koch, P. Ma, Y. Fedoryshyn, J. Niegemann, C. Hafner, and J. Leuthold, "Electrically Controlled Plasmonic Switches and Modulators," IEEE J. Sel. Top. Quant., Vol. 21, pp. 1-8, 2015 .

[8] J. A. Dionne, K. Diest, L. A. Sweatlock, and H. A. Atwater, "PlasMOStor: A Metal-Oxide-Si Field Effect Plasmonic Modulator," Nano Lett. Vol.9, pp. 897–902, 2009.

[9] A. Melikyan, N. Lindenmann, S. Walheim, P. M. Leufke, S. Ulrich, J. Ye, P. Vincze, H. Hahn, Th. Schimmel, C. Koos, W. Freude, and J. Leuthold, "Surface plasmon polariton absorption modulator," Opt. Express, Vol. 19, pp. 8855-8869, 2011.

[10] A. Melikyan, L.Alloatti, A. Muslija, D. Hillerkuss, P.C.Schindler, J.Li, R. Palmer, D.Korn, S. Muehlbrandt, D. Van Thourhout, B.Chen, R.Dinu, M.Sommer, C.Koos, M.Kohl, W. Freude, and J. Leuthold, "High-speed plasmonic phase modulators," Nat. Photonics, Vol. 8, pp. 229-233, 2014.

[11] F. Li, M. Xu,X. Hu,J. Wu,T. Wang and Y. Su, "Monolithic silicon-based 16-QAM modulator using two plasmonic phase shifters", Opt. Commun., Vol. 286, pp. 166-170, 2013.

[12] P. B. Johnson and R. W. Christy, Physical Review B6 (1972) 4370.

[13] S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, 2nd Ed. Pearson, 2003.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]