



23<sup>rd</sup> Iranian Conference on Optics and Photonics and 9<sup>th</sup> 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 صالحي و نصرت ... گرانپايه

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

ms.salehi@kntu.ac.ir

چکیده – در این مقاله عملکرد یک مدولاتور پلاسمونیک که در آن با اعمال ولتاژ *DC* یا *RF* می توان 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 می شود. سپس با انتشار در یک ساختار فلز-عایق-فلز و با تمرکز شدید میدان در سطح مشترک فلز-عایق و نیز هم پوشانی شدید با میدان الکتریکی بایاس اعمال شده به دو فلز، تغییر فاز یافته و در خروجی مجداً با عبور از یک مبدل دیگر به مد فوتونیک تبدیل می شود. 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 می گیرد. در این ساختار نشان داده شده است که مقدار پارامتر حاصلضرب ولتاژ در طول لازم برای ایجاد اختلاف فاز π به میزان ۲/۶۳ ولت-می می می باید.

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

كليد واژه- مدولاتور پلاسمونيك، مدولاتور فاز، اثر الكترواپتيك پاكلز.

granpayeh@kntu.ac.ir

## 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  $\pi$  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.

#### 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 [1]. تا پیش از گسترش استفاده از دانش پلاسمونیک، اکثر مدولاتورهای فازی که بر این مبنا و با استفاده از ماده معروف LiNbO<sub>3</sub> ساخته می شدند به علت محدودیت پراش نور در حد میلیمتری بودند [۲]. دانش پلاسمونیک روشن ساخت که تزویج میدان به نوسان پلاسمون های سطح فلز-عایق می تواند محدودسازی و تمرکز شدید میدان و درنتیجه کوچکتر کردن یک افزاره و کشاندن آن به زیر حد پراش نور را به همراه داشته باشد [۵-۳]. 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 الكترواپتيك پاكلز است كه در مجموع سرعت بالا، طول کمتر قطعه، مصرف کمتر انرژی و پهنای باند بالاتر را از خود نشان میدهد [۷] و [۱۱–۱۰]. 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 می شود 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 می شود. یک ولتاژ چه به صورت DC و چه در فرکانس رادیویی یا مایکروویو به عنوان بایاس به دو ورقهی فلزی اعمال می شود. میدان الکتریکی ایجادشده در شکاف کانال پلاسمونیک برهم پوشانی شدیدی با میدان پلاسمونیک پیدا کرده و باعث ایجاد تغییر فاز و به عبارتی مدوله کردن فاز آن می شود.

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 ه 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 3.48 = *n*<sub>Si</sub>، زیرلایه 1.44 و *n*<sub>SiO</sub> و پلیمر 1.68 = *n*<sub>Polymer</sub> 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 مش بندی دقیق در آن ناحیه رعایت شده است (شکل ۲).



شکل ۲- مشبندی سهبعدی خمیدگی لبههای فلز

#### ۲-۲- کانال پلاسمونیک

طلا در فرکانس نوری دارای ضریب دیالکتریک منفی (c < 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 شبیه سازی استفاده شده است [17].

### 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]):

$$\Delta n_{polymer} = \frac{1}{2} n_{polymer}^3 r_{33} \frac{U}{w_{gap}} \tag{1}$$

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 (  $\Delta n_{eff}$ ) میتوان فرض کرد که باعث ایجاد تغییر فاز در طول کانال ( L) میشود:

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

مقدار ضریب <sub>733</sub> 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 می شود. از آنجاکه فرکانس مایکروویو بایاس در مقابل فرکانس نوری بسیار کم است و استاتیک بهنظر می رسد، ابتدا با استفاده از روش الکتریسیته ی ساکن توزیع میدان بایاس در ساختار پیدا شده و سپس در حل حوزه فرکانس از این نتایج برای تغییر ضریب شکست پلیمر استفاده می شود. تحریک پورت ها با تحلیل مودال انجام می شود.

### ۳- نتایج شبیهسازی و بحث

شبیه سازی سه بعدی انجام شده و در این بخش نتایج ارائه و بحث می شود. 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 می شود. در هر دو شکل تمرکز شدید میدان در لبه های خمیده یفلز و در نتیجه یک بر هم پوشانی مناسب دو میدان نوری و بایاس مشهود است.



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 می شود. موج از سمت چپ و پس از ورود به بخش گوهای شکل به تدریج به مد پلاسمونیک تبدیل شده و در کانال پلاسمونیک انتشار می یابد. در پایان نیز مجدداً به مد فوتونیک تبدیل شده و از موجبر سیلیکونی سمت راست خارج می شود.



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 ۳.۰ دسیبل برمیکرومتر و در نتیجه هر کدام از مبدلها حدود ۳/۵ دسیبل اتلاف دارند. در این شبیه سازی به دو ورقه ی فلزی، یک بار بایاس صفر و بار دیگر بایاس ۴/۷ ولت اعمال شده است که با مقایسه دو حالت، مقدار حاصل ولتاژ در طول لازم برای ایجاد اختلاف فاز  $\pi$  به میزان ۱/۶۳ ولت-میلی متر حاصل شده است.

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

Downloaded from www.opsi.ir on 2025-06-08

پلاسمونیک و با تحلیل میدان الکتریکی بایاس که موجب تغییر ضریب شکست می شود و نیز تحلیل انتشار میدان نوری در ساختار نشان داده شد که می توان با مقدار ولتاژ-طول معادل ۱/۶۳ ولت-میلی متر، اختلاف فاز  $\pi$  ایجاد کرده و با قرار دادن مدولاتور در یک ساختار ماخ-زندر، مدولاسیون دامنه ایجاد کرد.

مراجع

- 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.

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



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 می شود.



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 ۲-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.



۴- نتیجهگیری

دراین مقاله با مطالعهی عملکرد یک مدولاتور فاز

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