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

طراحی و ساخت مدولاتور الکترواپتیک مجتمع در $LiNbO_3$

هادی دهقان نیری، رضا اسدی

تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق والکترونیک

چکیده – در این تحقیق طراحی و ساخت یک مدولاتور الکترواپتیک مجتمع در لیتیوم نایوبایت ارائه شده است. در این مدولاتور از روش تبادل پروتون برای ساخت موجبر استفاده شد. برای کاهش ولتاژ نیم موج مدولاتور، از یک ماسک مشترک برای ساخت موجبر والکترودها به منظور کاهش فاصله الکترودها استفاده شد. همینطور با استفاده از روش المان محدود تاثیرات شکل الکترودها در ضریب هم پوشانی میدان الکتریکی و مد موجبر و همینطور امپدانس الکترودها شبیه سازی شده و بر این اساس بخش تطبیق امپدانس برای کاهش ولتاژ مدولاسیون مورد نیاز طراحی شد که در نتیجه ولتاژ مدولاسیون نیم موج حدود ۶ ولت بدست آمد.

کلید واژه- مدولاتور نوری، لیتیوم نایوبایت، موجبر، تبادل پروتون، ولتاژ نیم موج

Design and Fabrication of Integrated Electrooptical Modulator in $LiNbO_3$

Hadi Dehghan Nayeri, Reza Asadi

Department of Electronic and Electrical Engineering, Malek Ashtar University, Lavizan, Tehran

Abstract- In this research design and fabrication of an integrated electrooptical modulator in lithium niobate is presented. For fabrication of waveguides in this modulator the proton-exchanged method was used. In order to decrease the half wave voltage of the modulator, a common mask was used for fabrication of waveguide and electrodes that leads to decreasing of the distance between the electrodes. In addition, by using finite element method, influence of the shape of electrodes on the overlap coefficient of electric field and waveguide mode and the impedance of electrodes were calculated. At last impedance matching section was designed and fabricated for reduction of the required modulation voltage that leads to achieving half wave modulation voltage of 6 V.

Index: Light Modulator, Lithium Niobate, Waveguide, Proton Exchange, Half Wave Voltage

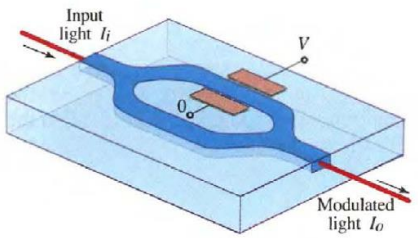
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

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

۱- مقدمه

مدولاتورها و سوییچهای نوری مجتمع در لیتیوم نایوبایت (LiNbO3) یکی از حوزه‌های مورد توجه در مدارات مجتمع نوری می‌باشند[۱]. برای ساخت موجبر نوری در لیتیوم نایوبایت، روش‌های مختلفی از جمله تبادل پروتون و نفوذ فلزاتی مثل تیتانیوم، کروم و مس استفاده شده است[۲] که از این بین روش تبادل پروتون به این علت که باعث افزایش ضریب شکست غیر عادی و انتشار نور قطبیده در موجبر می‌شود، برای ساخت مدولاتورهای الکترواپتیک با دامنه مدولاسیون بالاتر مناسب تر است.

در شکل ۱ طرحواره‌ای از یک مدولاتور با طرح ماخ زندر نشان داده شده است. در این طرح با استفاده از اعمال ولتاژ متناوب در یکی از شاخه‌ها (و یا هر دو)، تغییر فاز متناوبی به مقدار حداکثر دامنه π اعمال می‌شود.



شکل ۱: مدولاتور مجتمع الکترواپتیک مبتنی بر طرح ماخ زندر

ولتاژی که با اعمال آن به یک مدولاتور، دامنه نور خروجی از بیشینه به حداقل مقدار خود برسد ولتاژ نیم موج (V_π) نامیده می‌شود. ولتاژهای نیم موج در این نوع از مدولاتورها عموماً حدود ۱۰V.cmاست [۲]. در صورت استفاده از روشهای زدایش برای ساخت موجبرهای تپه‌ای امکان کاهش این ولتاژ وجود دارد که البته باعث پیچیده‌تر شدن فرایند ساخت می‌شود. برای یک مدولاتور ماخ- زندر که میدان اعمالی در جهت Z کریستال اعمال می‌شود و مد نوری عبوری در همین جهت قطبیده است، ولتاژ نیم موج با رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$V_\pi = \frac{\lambda G}{n^3 r_{33} \Gamma L} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، λ طول موج نور در خلا، G فاصله بین الکترودها، n ضریب شکست موثر مد نوری انتشاری در موجبر، r_{33} ضریب الکترواپتیک LN برای قطبش در جهت محورZ کریستال و Γ ضریب همپوشانی(میدان الکتریکی و شدت نور) است و از رابطه (۲) به دست می آید[۳]:

$$\Gamma = \frac{G}{V} \frac{\iint E_{el} {E_{opt}}^2 dxdy}{\iint {E_{opt}}^2 dxdy} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) V ولتاژ اعمال شده در الکترودها، E_{el} میدان الکتریکی اعمال شده توسط الکترودها در موجبر و E_{opt} میدان الکتریکی مربوط به مد نور انتشاری در موجبر می‌باشد. با توجه به رابطه (۱) و (۲) ولتاژ نیم موج، بستگی زیادی به همپوشانی توزیع میدان الکتریکی الکترودها و توزیع شدت مد نوری دارد. توزیع شدت مد نور بستگی به مشخصات موجبر و توزیع میدان الکتریکی بستگی به مشخصات الکترودها دارد. از طرف دیگر شکل الکترودها در امپدانس آنها و در نتیجه مقدار بازتاب ولتاژ اعمالی ناشی از عدم تطبیق امپدانس الکترودها با امپدانس خروجی منبع ولتاژ دارد. این بازتاب باعث افزایش ولتاژ واقعی V_π می‌شود.

در این تحقیق برای دستیابی به V_π کمتر، ضمن استفاده از قسمتی از ماسک موجبر به عنوان الکترودها (به منظور کاهش فاصله الکترودها)، از خط انتقال باریک شونده برای تطبیق امپدانس الکترودها و منبع استفاده شد.

۲- طراحی و شبیه‌سازی مدولاتور

برای به دست آوردن میدان مد نوری در ابتدا لازم است چگونگی نفوذ پروتونها در زمان تبادل پروتون و آنیل با توجه به تئوری نفوذ محاسبه شود در رابطه (۳) چگونگی تمرکز پروتونها بعد از مرحله آنیل داده شده است[۴]:

$$H_c(x,y) = \frac{C_0}{4}\left\{erf\left(\frac{h-y}{dy}\right) + erf\left(\frac{h+y}{dy}\right)\right\}\left\{erf\left(\frac{w-x}{dx}\right) + erf\left(\frac{w+x}{dx}\right)\right\} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) dx و dy طول نفوذ در جهت x و y میباشد. w عرض شکاف ایجاد شده برای موجبر در ماسک و h عمق نفوذ پروتونها قبل از مرحله آنیل، C_0 میزان تمرکز اولیه پروتونها است که نصف تعداد اتمهای لیتیم (۰,۵) در نظر گرفته می‌شود[۵]. با استفاده از روابط تجربی به دست آمده توزیع اختلاف ضریب شکست ایجاد شده در زیر لایه طبق رابطه (۴) به دست می آید [۶]:

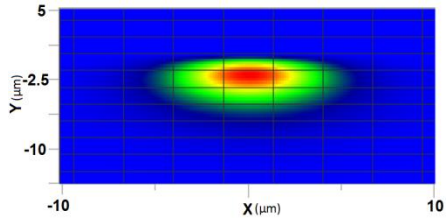
$$\Delta n_\alpha = (0.3226C + 0.183C^2)e^{-7.14C} \quad \text{for } C < 0.16 \qquad (۴)$$

در رابطه (۴) C نسبت تمرکز پروتونها به تعداد کل لیتیوم‌ها قبل از نفوذ است. بعد از به دست آوردن توزیع اختلاف ضریب شکست، توزیع شدت مد نوری انتشاری در موجبر با استفاده از شبیه سازی به روش المان محدود (با استفاده از نرم افزار optiwave)، به دست می‌آید. به عنوان مثال در

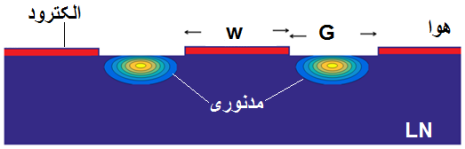
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

شکل ۲، شکل مد خروجی یک موجبر با عرض ۶ میکرومتر، با تبادل پرتون یک ساعت در دمای ۱۷۰ درجه و آنیل ۵ ساعت در دمای ۳۷۵ درجه نشان داده شده است. این دما و زمان برای تبادل پروتون و آنیل یک موجبر تک مد در طول موج ۱۵۵۰nm ایجاد می‌کند.



شکل ۲: مد نور موجبر با عرض ماسک $6\mu m$ با تبادل پروتون یک ساعت در دمای ۱۷۰درجه و آنیل ۵ ساعت در دمای ۳۷۵ درجه در طول موج $1550nm$.



شکل ۳: مقطع مدولاتور با الکترودهای مجاور دو شاخه ماخ زندر

برای به دست آوردن توزیع میدان الکتریکی با استفاده از روش المان محدود، در ابتدا یک فضای دوبعدی با توجه به شکل الکترودها و قرارگیری آنها نسبت به هم، در نظر گرفته می‌شود و سپس شرایط مرزی با توجه به ولتاژهای هر یک از الکترودها برای آنها قرار داده می‌شود. در این محاسبات این فرض در نظر گرفته شده است که میدانهای الکتریکی به صورت شبه ساکن هستند. با توجه به آنکه تحریک هر دو شاخه موجبر با میدانهای الکتریکی با جهت‌های مخالف باعث افزایش اختلاف فاز می‌شود، الکترودها مطابق شکل ۳ در اطراف دو شاخه ایجاد می‌شود.

با ضخامت الکترود ۱μm، اگر الکترودهای کناری را عریض در نظر بگیریم با زیاد شدن عرض الکترود وسط، ولتاژ نیم موج مدولاتور کاهش می‌یابد. برای محاسبه امپدانس مشخصه مدولاتور لازم است خازن بین الکترودهای مدولاتور با و بدون حضور LN محاسبه شود. بعد از محاسبه چگونگی توزیع میدان الکتریکی الکترودها، با اعمال ولتاژ یک ولت بر روی الکترود وسطی، خازن آنها را می‌توان با استفاده از قانون گوس محاسبه کرد، به این ترتیب که کل شار الکتریکی که از الکترود وسطی خارج می‌شود، محاسبه می‌شود که برابر با بار الکتریکی موجود بر روی آن است. با تقسیم میزان این بار الکتریکی بر ولتاژ اعمالی، میزان خازن آن به دست می‌آید.

در شکل ۴ ولتاژ نیم موج و امپدانس مشخصه مدولاتور (Z) برای سه فاصله بین الکترود (G) ۶، ۱۲و ۱۸μm بر حسب عرض الکترود وسط(W) وقتی که موجبر و الکترودها مطابق شکل ۲ ساخته شده باشند، نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۴ مشخص است که برای دستیابی به ولتاژ نیم موج کمتر از ۱۰ ولت (برای طول ۱cm) فاصله بین الکترودها (G) کمتر از ۱۸μm مناسب است، اما نکته‌ای که وجود دارد آنست هر چه فاصله بین الکترودها کاهش یافته، ولتاژ نیم موج مدولاتور نیز کاهش یافته است مثلا وقتی فاصله بین الکترودها از ۱۸ به ۱۲μm کاهش یافته ولتاژ نیم موج حدود ۳۰ درصد و وقتی فاصله بین الکترودها از ۱۲ به ۶μm کاهش یافته ولتاژ نیم موج حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. نکته دیگر آنست که امپدانس مشخصه مدولاتور برای فاصله‌های بین الکترودی کم، کمتر از ۵۰ اهم است(و با کاهش فاصله بین الکترودها و افزایش عرض الکترود وسط کاهش میابد) و مدولاتور نمیتواند با منبع و بار متصل به آن تطبیق داشته باشد.

برای تطبیق امپدانس از خط انتقال باریک شونده نمایی استفاده شد. در این نوع از تطبیق امپدانس، خطوط طوری طراحی می‌شوند که امپدانس مشخصه خط به صورت نمایی تغییر میکند:

$$Z(z) = z_0 \exp(az) \qquad 0 < z < L \qquad (۵)$$

$$a = \frac{1}{L} ln(\frac{Z_L}{Z_0}) \qquad (۶)$$

در رابطه (۵) و (۶) Z_L امپدانس انتهای خط و Z_0 امپدانس مدولاتور و L طول تبدیل امپدانس است.

۳- ساخت مدولاتور

برای به حداقل رساندن فاصله الکترودها و رفع مشکل هم خط سازی الکترودها و موجبر، از یک ماسک مشترک برای ساخت الکترودها و موجبر استفاده شد. برای این منظور، از لایه نشانی آلومینیوم به ضخامت ۱μm با روش اسپاترینگ برای استفاده به عنوان ماسک موجبر و الکترودها و همینطور ماسک خط بار استفاده شد. این ضخامت برای کاهش اختلاف امپدانس الکترودها و منبع و با توجه به حداکثر ضخامت قابل دسترس با سیستم اسپاترینگ بدون بروز مشکلات ناشی از چسبندگی به زیر لایه انتخاب شد. برای ایجاد طرح ماسک موجبر و الکترودها بر روی لایه آلومینیوم (مطابق شکل۵) از فرایندهای استاندارد فوتولیتوگرافی استفاده شد. عرض ماسک موجبر(G)، طول الکترودها و

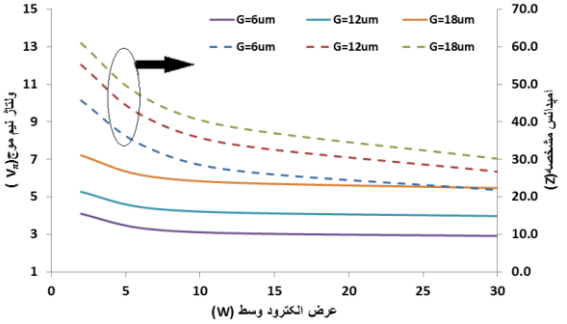
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

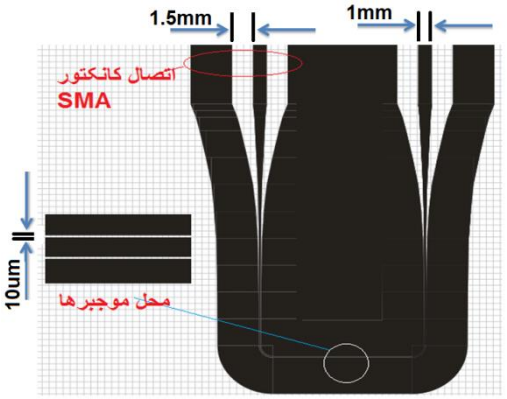
عرض الکترود وسط (W) به ترتیب ۱۰μm، ۱cm و ۱۰۰μm انتخاب شدند.

با توجه به مشخصات الکترودها، امپدانس مدولاتور(Z_0) با استفاده از شبیه سازی، حدود ۱۸Ω بدست آمد، همینطور با توجه به محدودیتهای ابعاد مدولاتور و ابعاد کانکتور مورد استفاده برای اتصال به منبع ولتاژ، مشخصات خط بار بصورت Z_L=۶۰Ω و L=۲cm در نظر گرفته شد.

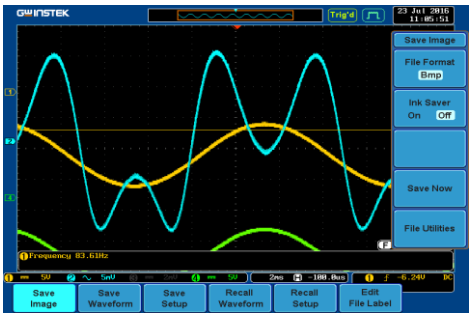
مرحله تبادل پروتون ۴ ساعت در دمای ۱۹۰ درجه و مرحله آنیل ۱۰ ساعت در دمای ۳۷۵ درجه انجام شد. در شکل ۶ یک نمونه از نتایج به دست آمده با اعمال یک سیگنال سینوسی در طول موج ۱۵۵۰nm با دامنه ولتاژ ۵v (شکل بالا) و در طول موج ۱۳۱۰nm با دامنه ولتاژ ۲v (شکل پایین) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ ولتاژ نیم موج این مدولاتور ۶v به دست آمد.

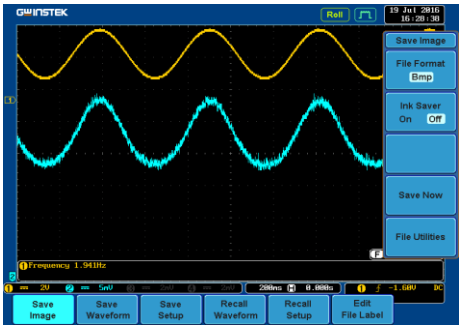


شکل ۴: چگونگی تغییر امپدانس مشخصه و ولتاژ نیم موج مدولاتور با تغییر عرض الکترود وسط برای فاصله بین الکترودهای مختلف برای الکترودها با ضخامت $1\mu m$



شکل ۵: طرح ماسک الکترودها و موجبر





شکل ۶: نمونه‌ای از سیگنال روی دتکتور(نمودار آبی) و ولتاژ اعمالی به مدولاتور(نمودار زرد). با دامنه ولتاژ $5V$ در طول موج $1550\ nm$ (شکل بالا) و $2V$ در طول موج $1310\ nm$ (شکل پایین)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدولاتور الکترواپتیک مجتمع با ولتاژ نیم موج پایین با استفاده از موجبرهای تبادل پروتونی و استفاده از فاصله صفر بین موجبر و الکترود شرح داده شد. اضافه کردن یک بخش برای تطبیق امپدانس الکترودها باعث کاهش تلفات بازتابی میدان اکتریکی و در نتیجه کاهش ولتاژ مدولاسیون میشود. فاصله صفر بین الکترود و موجبر میتواند با استفاده از ماسک قسمت تبادل پروتون برای الکترودها محقق شود.

۵- مراجع

[1]K. Noguchi, H. Miyazawa and O. Mitomi," 75 GHz broadband Ti:LiNbO3 optical modulator with ridge structure ", Elec. Lett. vol. 30, no. 12,pp 949 - 951, 1994.
[2] M. García-Granda, H. Hu, J. Rodríguez-García, and W. Sohler, "Design and Fabrication of Novel Ridge Guide Modulators in Lithium Niobate", J. Lightwave Tech., Vol. 27, No. 24,pp5690 - 5697, 2009.
[3]C.M Kim R.V Ramaswamy "Overlap Integral Factors in Integrated Optic Modulators And Switches" J. Lightwave Techn, Vol. 7, No. 7, 1989.
[4]J. M. M. M. D. Almeida, "Design Methodology Of Annealed H+ Waveguides In Ferroelectric Linbo3," Opt. Eng., Vol. 46, No. 6, pp. 064601-1-064601-13,2007.
[5]M. M.Howerton, W. K. Burns,P. R. Skeath, A. S. Greenblatt, "Dependence Of Refractive Index On Hydrogen Concentration In Proton Exchanged Linbo3",J. Quantum Ele., Vol. 21, No. 3, pp 593-601, 1991.
[6] A. Passaro, M. A. R. Franco, N. M. Abe, F. Sircilli, "The effect of the proton-concentration-to-refractive-index models on the propagation properties of APE waveguides",J. Lightwave Tech., Vol. 20,No. 8, pp 1573-1577,2002.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]