

طراحی و ساخت مدولاتور الکترواپتیک مجتمع با روش تبادل پروتون در LiNbO3

هادی دهقان نیری^۱، رضا اسدی^{۲*}^۱دکتری برق الکترونیک، دانشگاه مالک اشتر،^۲استادیار مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه مالک اشتر rasadi56@gmail.com

چکیده

در این مقاله طراحی و ساخت یک مدولاتور الکترواپتیک مجتمع در لیتیوم نیوبایت با روش نفوذ پروتون ارائه شده است. برای کاهش ولتاژ مدولاسیون و همینطور دستیابی به فرایند ساخت ساده تر و رفع نیاز به سیستم های هم خط ساز پیچیده، از یک ماسک مشترک از جنس آلومینیوم برای الکترودها و موجبرها استفاده شده است. به این ترتیب فاصله صفر بین الکترودها و موجبر تحقق می یابد. همچنین برای دستیابی به تطبیق امپدانس بین قسمت الکترودها با منبع و بار خط انتقال باریک شونده طراحی و ساخته شده است. همینطور برای طراحی اجزای مختلف مدولاتور، از روشهای تحلیلی و عددی برای محاسبه شرایط نفوذ پروتون، توزیع ضریب شکست موجبر، توزیع شدت مد نور در موجبر، توزیع میدان الکتریکی ناشی از الکترودها و طول و مشخصات خط انتقال استفاده شده است.

کلیدواژه

مدولاتور نوری، ولتاژ نیم موج، موجبر، تبادل پروتون، تطبیق امپدانس

مقدمه

و غیر عادی در آن افزایش داده می شود و با نفوذ پروتون تنها ضریب شکست غیر عادی آن افزایش می یابد. به همین دلیل موجبرهای ساخته شده با نفوذ Ti هر دو مد TE و TM را از خود عبور داده، اما موجبرهای ساخته شده با تبادل پروتون تنها یکی از این مدها را (با توجه به جهت برش کریستال) از خود عبور می دهد. برای افزایش کنتراست مدولاسیون (میزان اختلاف بیشینه و کمینه شدت نور) بهتر است که فقط یکی از این مدها درون موجبر منتشر شود بنابراین یا باید یکی از قطبشهای نور ورودی به موجبر حذف شود (با استفاده از فیبرهای نگه دارنده قطبش) یا اینکه از موجبرهای تک قطبشی مانند موجبرهای ساخته شده با تبادل پروتون استفاده شود. همچنین از آنجا که برای ساخت موجبرهای نفوذ پروتون به دماهای پایینتری نیاز است استفاده از این روش از این لحاظ نسبت به روش نفوذ Ti ارجحیت دارد.

یکی از راههای متداول برای ساخت یک مدولاتور به صورت مجتمع، استفاده از طرح تداخل سنج ماخ زندر^۳ است. در این نوع از مدولاتور اختلاف راه نوری و در نتیجه اختلاف فاز ایجاد شده بین دو شاخه از تداخل سنج، باعث تغییر شدت نور حاصل از تداخل آنها در خروجی می شود. در LN با استفاده از اعمال ولتاژ به یکی از شاخه های ماخ زندر یا اعمال میدانهای

امروزه مدولاتورهای الکترواپتیک کاربرد وسیعی در حوزه های مختلف به خصوص مخابرات نوری پیدا کرده اند. مدولاتورهای الکترواپتیک به طور کلی به دو دسته خارجی و داخلی تقسیم بندی می شوند که در نوع داخلی، منبع تولید نور وظیفه مدوله کردن نور را نیز بر عهده دارد. در مدولاتورهای خارجی معمولاً نور ورودی، یک لیزر با موج پیوسته است که به مدولاتور وارد شده و ویژگیهای مختلفی از آن مانند شدت، فاز یا قطبش تغییر داده می شود.

لیتیوم نیوبایت^۲ (LN) به علت ضریب الکترواپتیک بالا یکی از مواد مهم در اپتیک مجتمع و مدارات مجتمع نوری بخصوص برای ساخت مدولاتور و سوئیچهای نوری می باشد [1]. روشهای مختلفی برای ساخت موجبر نوری در این زیرلایه مانند تبادل پروتون (با استفاده از اسیدهای مانند اسید بنزوئیک و اسید گلوواتریک) و نفوذ فلزات (مانند تیتانیوم، کروم و مس [2]) تا کنون ابداع شده است. از این بین روشهای مختلف ساخت موجبر در این زیرلایه، نفوذ تیتانیوم (Ti) و تبادل پروتون بیش از دیگر روشها مورد توجه بوده است. LN یک ماده دو شکستی^۳ است و با نفوذ Ti در آن هر دو ضریب شکست عادی

^۱ Continuous wave (CW)^۲ Lithium niobate (LiNbO3)^۳ Birefringent[†] Polarization maintaining fiber^Δ Mach-Zender

الکتروود یک مدولاتور ماخ-زندر در زیر لایه x-cut LN ساخته شده که باعث کاهش V_{π} این مدولاتور تا ۶۷ cm شده است.

طراحی و شبیه‌سازی مدولاتور

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:

$$V_{\pi} = \frac{\lambda G}{n^3 \Gamma_{33} \Gamma_L} \quad (1)$$

در رابطه ۱، λ طول موج نور در خلا، G فاصله بین الکتروودها، n ضریب شکست موثر مد نوری انتشاری در موجبر، Γ_{33} ضریب الکترواپتیک LN برای قطبش در جهت محور Z کریستال با میدان اعمالی در جهت Z و Γ ضریب همپوشانی (میدان الکتریکی و شدت نور) است و از رابطه ۲ به دست می‌آید [7]:

$$\Gamma = \frac{G \iint E_{el} E_{opt}^2 dx dy}{V \iint E_{opt}^2 dx dy} \quad (2)$$

در رابطه ۲، V ولتاژ اعمال شده به الکتروودها، E_{el} میدان الکتریکی اعمال شده توسط الکتروودها 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 الکتروودها و توزیع شدت مد نوری دارد. توزیع شدت مد نور بستگی به مشخصات موجبر و شرایط ساخت آن دارد. برای به دست آوردن مد نوری منتشر شونده در موجبر در این تحقیق ابتدا توزیع اختلاف ضریب شکست موجبر با زیرلایه محاسبه شده و سپس با استفاده از روش المان محدود توزیع مد نوری به دست آمد.

نفوذ پروتون به درون زیرلایه در دو مرحله تبادل پروتون و آنیل انجام شده و با تئوری نفوذ می‌تواند مدل سازی شود. در این مدل عمق نفوذ اولیه پروتونها (h) در مرحله تبادل پروتون از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$h = \sqrt{4D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) t} \quad (3)$$

در رابطه بالا D_0 ثابت نفوذ هیدروژن برای اسید بنزوئیک (10^{-8}) $\times 0.48$ میکرومتر مربع بر ساعت، R ثابت جهانی گازها، T دمای مطلق تبادل پروتون، Q انرژی فعالسازی بر حسب ژول بر مول ($10^2 \times 77$) و t زمان تبادل پروتون است [8]. وقتی LN تبادل پروتون می‌شود یک ترکیب شیمیایی به شکل $\text{H}_p\text{Li}_{1-p}\text{NbO}_3$ پیدا می‌کند که P در آن تمرکز نسبی پروتون را نشان می‌دهد. چگونگی توزیع پروتونها بعد از آنیل را می‌توان به صورت رابطه ۴ تخمین زد:

$$P = \frac{P_0}{4} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{h-y}{dy}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{h+y}{dy}\right) \right\} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{w-x}{dx}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{w+x}{dx}\right) \right\} \quad (4)$$

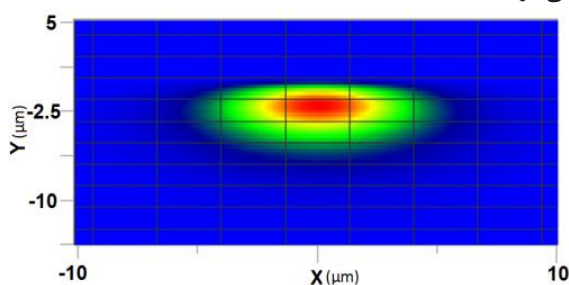
الکتریکی با جهت‌های مخالف به هر دو شاخه با استفاده از اثر پاکلز می‌توان اختلاف ضریب شکست و در نتیجه اختلاف راه نوری بین دو شاخه ایجاد کرد. ولتاژی که با اعمال آن به یک مدولاتور، دامنه نور خروجی از بیشینه به حداقل مقدار خود می‌رسد ولتاژ نیم موج (V_{π}) نامیده می‌شود. یکی از اهداف موضوعات مطرح تحقیقاتی در این خصوص دستیابی به مدولاتورهایی با ولتاژ نیم موج کمتر است. ولتاژ نیم موج در این نوع از مدولاتورها برای شرایط موجبرها و الکتروودهای معمول حدود ۱۲ تا ۱۵ V.cm است [2]. البته با استفاده از روشهای پیچیده‌تری در فرایند ساخت، از جمله روش سونش^۶ برای ایجاد موجبر تپه‌ای (برجسته) در LiNbO_3 ، می‌توان مقدار همپوشانی میدان الکتریکی و مد نور انتشاری در موجبر را افزایش داد که این امر باعث کاهش ولتاژ نیم موج می‌شود. به عنوان مثال Rangaraj و همکاران [3] توانستند با استفاده از موجبرهای ساخته شده با نفوذ تیتانیوم به مدولاتوری با ولتاژ نیم موج ۱۲.۵۷ V.cm برسند. همچنین noguchi و همکاران [4] با استفاده از موجبرهای ساخته شده با روش نفوذ تیتانیوم توانستند به ولتاژ نیم موج ۱۲.۸۷ V.cm برای حالت موجبرهای معمول (غیره تپه‌ای) و ۹.۸۷ V.cm برای موجبرهای تپه‌ای برسند. Chang و همکاران [5] نیز برای شرایط بدون سونش ولتاژ نیم موج ۱۴.۴۷ بدست آوردند و سپس با استفاده از سونش به عمق یک و دو میکرومتر ولتاژ نیم موج را به ترتیب ۱۳.۲۷ و ۱۲.۲۷ کاهش دادند. همینطور Burns و همکاران [6] نیز با استفاده از روش سونش توانستند به ولتاژ نیم موج ۸.۴۷ V.cm برسند. در سال ۲۰۰۹، Granda و همکاران [2] با بهینه سازی روش سونش و همینطور ابعاد الکتروودها توانستند ولتاژ نیم موج را تا ۵.۳۵۷ V.cm کاهش دهند.

همانطور که در موارد فوق اشاره شد، استفاده از روشهایی مثل سونش باعث کاهش ولتاژ مدولاتور می‌شود اما از طرف دیگر این گونه روشها باعث پیچیدگی و هزینه بیشتر فرایند و تجهیزات مورد نیاز برای ساخت مدولاتور می‌شوند. بنابراین کاهش ولتاژ مدولاتور با استفاده از روشهای ساده تر یکی از موضوعات مورد توجه می‌باشد.

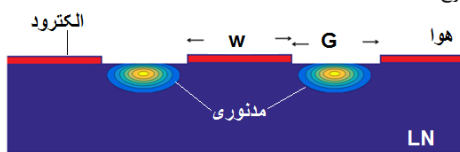
یکی از چالش‌های کاهش ولتاژ نیم موج، کاهش فاصله بین الکتروودها و موجبر است که برای این منظور نیاز به سیستمهای لیتوگرافی و هم خط ساز با دقت بهتر از یک میکرومتر می‌باشد. در این مقاله، به عنوان یک راه حل جایگزین و برای سادگی بیشتر فرایند ساخت بدون نیاز به سیستمهای پیچیده هم خط سازی، با استفاده از ماسک فرایند تبادل پروتون به عنوان

^۶ Pockels effect
^۷ Etching

برای محاسبه ضریب همپوشانی میدان الکتریکی و توزیع شدت نور در موجبر، لازم است توزیع میدان الکتریکی اعمالی توسط الکترودها محاسبه شود. برای این منظور از روش عددی المان محدود استفاده شد و در ابتدا یک فضای دوبعدی با توجه به شکل الکترودها و قرارگیری آنها نسبت به هم، در نظر گرفته شده و سپس شرایط مرزی با توجه به ولتاژهای هر یک از الکترودها برای آنها قرار داده شد. 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 ۲ در اطراف دو شاخه ایجاد می‌شود.



شکل ۱. عنوان مد نور موجبر با عرض ماسک $6\mu\text{m}$ با تبادل پروتون یک ساعت در دمای 170°C و آنیل ۵ ساعت در دمای 375°C درجه در طول موج 1550nm .



شکل ۲. مقطع مدولاتور با الکترودهای مجاور دو شاخه ماخ زندر

پس از محاسبه توزیع میدان الکتریکی الکترودها، می‌توان انتگرال رابطه ۲ و در نتیجه $V\pi$ را محاسبه کرد. برای کاربردهای فرکانس بالا، نیاز است الکترودها به صورت موج رونده استفاده شوند و همچنین امپدانس مشخصه الکترودها باید با امپدانس بار و منبع تطبیق داشته باشد تا تلفات موج الکتریکی برگشتی از مدولاتور به حداقل برسد. برای محاسبه امپدانس مشخصه مدولاتور لازم است خازن بین الکترودهای مدولاتور با و بدون حضور LN محاسبه شود:

$$Z = \frac{1}{c\sqrt{\epsilon\epsilon_0}} \quad (7)$$

در رابطه c سرعت نور در خلا، C خازن الکترودها با حضور زیرلایه و C_0 خازن الکترودها بدون حضور زیرلایه است. بعد از محاسبه چگونگی توزیع میدان الکتریکی الکترودها، (با اعمال ولتاژ یک ولت بر روی الکترودها وسطی) خازن آنها را می‌توان با استفاده از قانون گوس محاسبه کرد، به این ترتیب که کل شار الکتریکی که از الکترودها وسطی خارج می‌شود،

در رابطه (۴)، x فاصله از مرکز موجبر در راستای افقی، y فاصله از موجبر در راستای عمودی، w عرض موجبر، P میزان تمرکز پروتون بعد از عملیات آنیل و P_0 میزان تمرکز اولیه پروتونها است که بصورت تقریبی برابر نصف تعداد اتمهای لیتیم (۵، ۰) در نظر گرفته می‌شود [9]. مقادیر dx و dy به ترتیب طول نفوذ افقی و عمودی می‌باشد و از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید:

$$dx = 2 \sqrt{D_{0x} \exp\left(\frac{-H_x}{KT_{aneal}}\right) t_{aneal}} \quad (5)$$

$$dy = 2 \sqrt{D_{0y} \exp\left(\frac{-H_y}{KT_{aneal}}\right) t_{aneal}} \quad (6)$$

در روابط ۵ و ۶ زمان مرحله آنیل، T_{aneal} دمای مطلق آن و K ثابت بولتزمن می‌باشد. D_{0x} و D_{0y} ثابت نفوذ پروتون در جهت افقی و عمودی بوده و به ترتیب برابر 0.44×10^{12} و 1.5×10^{12} می‌باشد همچنین H_x و H_y به ترتیب برابر 1.5 و 1.77 می‌باشد [8].

لازم به ذکر است در این روش، نفوذ پروتونها به صورت یک بعدی و فقط برای به دست آوردن میزان عمق نفوذ اولیه پروتونها در نظر گرفته شده و نفوذ در مرحله آنیل به صورت دو بعدی با فرض یک منبع محدود از پروتونها (با توجه به قوانین فیک) در نظر گرفته شده است.

با توجه به مقدار تمرکز پروتونها P ، فازهای مختلفی در کریستال تشکیل می‌شود که عبارتند از: α ($P < 0.12$)، $\alpha + \beta$ ($0.12 < P < 0.56$) و β ($P > 0.56$). از آنجا که ضریب جذب موجبرهای تبادل پروتون شده در فاز α کمینه است معمولاً زمان تبادل پروتون و آنیل طوری در نظر گرفته می‌شود که موجبر در فاز α قرار بگیرد. یکی از روابطی که میزان اختلاف ضریب شکست ایجاد شده (Δn_α) را به تمرکز پروتونهای کم از جمله برای حالت فاز α با تقریب خوبی ارتباط می‌دهد با رابطه ۶ بیان می‌شود [9]:

$$\Delta n_\alpha = (0.3226P + 0.183P^2)e^{-7.14P} \quad \text{for } P < 0.16 \quad (6)$$

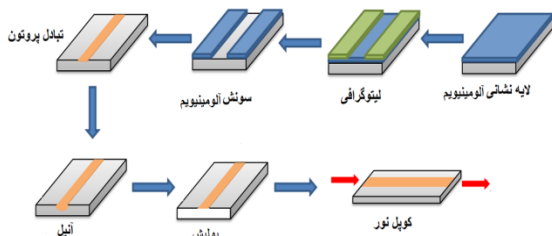
با استفاده از توزیع اختلاف ضریب شکست محاسبه شده برای موجبرهای تبادل پروتون شده می‌توان توزیع شدت مد نور عبوری از موجبر را با استفاده از روشهای شبیه سازی عددی مانند روش انتشار پرتو به دست آورد. برای محاسبه شکل مد نور خروجی از نرم افزار Optiwave استفاده شده است. این نرم افزار قادر است مسائل انتشار مد نوری را با روش انتشار پرتو و صورت برداری یا شبه برداری محاسبه کند.

به عنوان مثال در شکل ۱، شکل مد خروجی یک موجبر با عرض $6\mu\text{m}$ میکرومتر، با تبادل پروتون یک ساعت در دمای 170°C و آنیل ۵ ساعت در دمای 375°C نشان داده شده است. این دما و زمان برای تبادل پروتون و آنیل، یک موجبر تک مد در طول موج 1550nm ایجاد می‌کند.

در رابطه (۷) و (۸)، Z فاصله از نقطه مرجع محاسبه امپدانس، Z_L امپدانس انتهای خط و Z_0 امپدانس مدولاتور و L طول تبدیل امپدانس است.

ساخت مدولاتور

طرحواره مراحل ساخت موجبر مورد استفاده در مدولاتور در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴. طرحواره ساخت موجبر

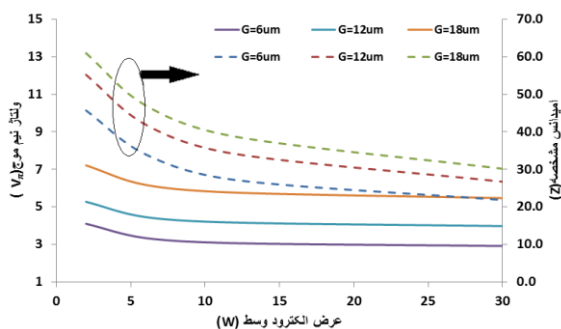
همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است در ابتدا یک لایه یک میکرومتری آلومینیوم با روش اسپاترینگ dc بر روی نمونه لایه نشانی می‌شود. سپس با استفاده از لیتوگرافی ماورا بنفش طرح موجبر (ماخ زندر) بر روی این لایه ایجاد شده و سپس با محلول ترکیب اسید فسفریک (۵ واحد)، اسید نیتریک (یک واحد) و اسید استیک (یک واحد) قسمتهای اضافی ماسک موجبر برداشته می‌شود. برای ساخت موجبر مورد نظر، نمونه به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۹۰ درجه در اسید بنزوئیک تبادل پروتون شده و به مدت ۱۰ ساعت در دمای ۳۷۵ درجه آنیل شد.

با توجه به محدود بودن دقت همخط سازی بین ماسک الکتروود و موجبرها و برای به حداقل رساندن فاصله الکتروودها، از یک ماسک با قسمت مشترک برای ساخت الکتروودها و پروتون و آنیل، قسمتهای اضافی ماسک موجبر برداشته شد و مجدداً یک لایه نشانی آلومینیوم به ضخامت $1\mu\text{m}$ برای استفاده به عنوان الکتروودها و همینطور خط باریک شونده انجام گرفت. هرچه ضخامت الکتروودها بیشتر باشد تلفات اهمی الکتروودها پایین می‌آید. این ضخامت با توجه به حداکثر ضخامت قابل پیاده‌سازی با سیستم اسپاترینگ بدون بروز مشکلات ناشی از چسبندگی لایه آلومینیومی به زیر لایه انتخاب شد. در شکل ۵ ماسک الکتروود استفاده شده در این طرح نشان داده شده است. عرض ماسک موجبر (G)، طول الکتروودها در اطراف موجبر و عرض الکتروود وسط (W) به ترتیب $10\mu\text{m}$ ، 1cm و $100\mu\text{m}$ انتخاب شد.

با توجه به مشخصات الکتروودها، امپدانس مشخصه مدولاتور (Z) با استفاده از شبیه سازی، حدود 18Ω بدست آمد، همینطور با توجه به محدودیتهای ابعاد مدولاتور و ابعاد کانکتور مورد

محاسبه شده 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. برای به دست آوردن توزیع میدان الکتریکی و محاسبه خازن الکتروودها از نرم افزار MATLAB و روش المان محدود استفاده شد.

در شکل ۳ ولتاژ نیم موج و امپدانس مشخصه مدولاتور (Z) برای سه فاصله بین الکتروود (G) ۶، ۱۲ و $18\mu\text{m}$ بر حسب عرض الکتروود وسط (W) وقتی که موجبر و الکتروودها مطابق شکل ۲ ساخته شده باشند، و ضخامت الکتروودها یک میکرومتر باشد، نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است با افزایش عرض الکتروود وسط امپدانس مشخصه و $V\pi$ کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۳ مشخص است که برای دستیابی به $V\pi$ کمتر از ۱۰ ولت (برای طول 1cm) فاصله بین الکتروودها (G) کمتر از $18\mu\text{m}$ مناسب است، اما نکته‌ای که وجود دارد آنست که هر چه فاصله بین الکتروودها کاهش بیابد، ولتاژ نیم موج مدولاتور نیز کاهش می‌یابد، مثلاً وقتی فاصله بین الکتروودها از ۱۸ به $12\mu\text{m}$ کاهش یافته ولتاژ نیم موج حدود ۳۰ درصد و وقتی فاصله بین الکتروودها از ۱۲ به $6\mu\text{m}$ کاهش یافته ولتاژ نیم موج حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. نکته دیگر آنست که امپدانس مشخصه مدولاتور برای فاصله‌های بین الکتروودی کم، کمتر از ۵۰ اهم است (و با کاهش فاصله بین الکتروودها و افزایش عرض الکتروود وسط کاهش می‌یابد) و مدولاتور نمی‌تواند با منبع و بار متصل به آن تطبیق داشته باشد.

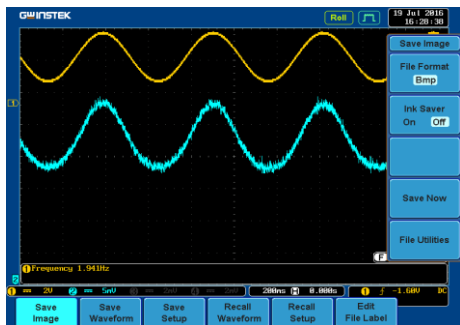


شکل ۳: چگونگی تغییر امپدانس مشخصه و ولتاژ نیم موج مدولاتور با تغییر عرض الکتروود وسط برای فاصله بین الکتروودهای مختلف برای الکتروودها با ضخامت $1\mu\text{m}$

برای تطبیق امپدانس مدولاتور با یک منبع و بار ۵۰ اهم می‌توان با استفاده از تئوری خط انتقال، از یک خط انتقال باریک شونده مانند خط باریک شونده نمایی استفاده کرد. در این نوع از تطبیق امپدانس، خطوط طوری طراحی می‌شوند که امپدانس مشخصه خط به صورت نمایی تغییر کند:

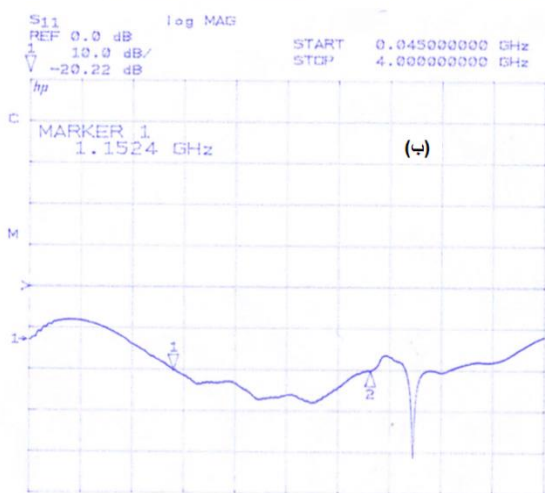
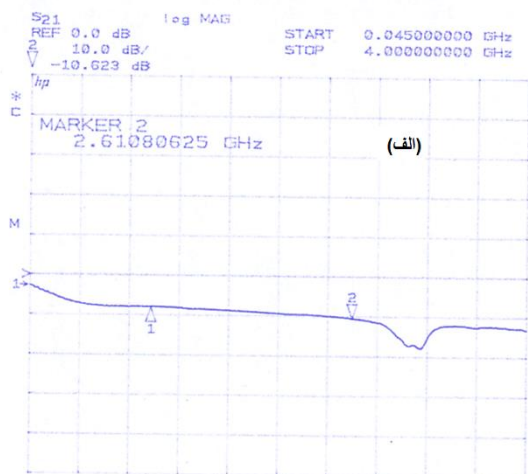
$$Z(z) = z_0 \exp(az) \quad 0 < z < L \quad (7)$$

$$a = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{Z_L}{Z_0}\right) \quad (8)$$



شکل ۶: نمونه‌ای از سیگنال روی دتکتور (نمودار آبی) و ولتاژ اعمالی به مدولاتور (نمودار زرد). با دامنه ولتاژ ۵V در طول موج ۱۵۵۰ nm (شکل بالا) و ۲V در طول موج ۱۳۱۰nm (شکل پایین)

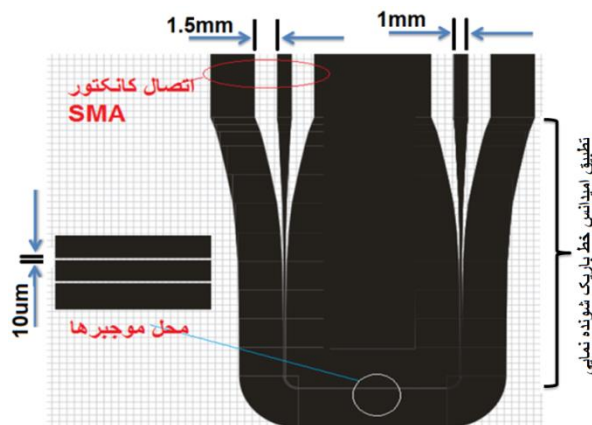
برای ارزیابی عملکرد خط انتقال باریک شونده و الکترودها از لحاظ مقدار بازتاب و تلفات ولتاژ اعمالی، پارامترهای پراکندگی S_{11} و S_{21} در بازه فرکانسی ۴۵ MHz تا ۴ GHz اندازه گیری شد که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است.



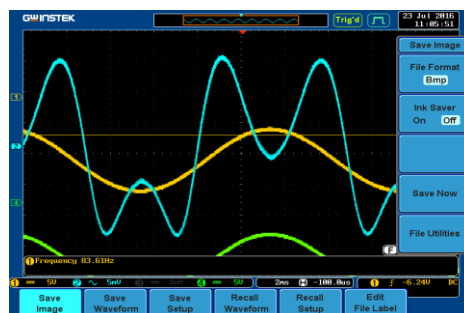
شکل ۷. پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده برای مدولاتور ساخته شده با طرح الکترودها شکل ۵. (الف) پارامتر S_{21} در بازه فرکانسی ۴۵MHz تا ۴GHz

استفاده برای اتصال به منبع ولتاژ، مشخصات خط بار بصورت محدودیت ابعاد در نظر گرفته شد. $L=2\text{cm}$ و $Z_L=60\Omega$ کانکتور (که در اینجا از نوع SMA میباشد) باعث انتخاب $Z_L=60\Omega$ شده است. به این معنی که اگر کانکتور SMA به وسیله یک خط CPW به الکترودها متصل شود، با توجه به فاصله بین پایه های کانکتور و عرض آنها، امپدانس مشخصه الکترودها (به ضخامت یک میکرومتر) در این قسمت برابر 60Ω میشود

در شکل ۶ یک نمونه از نتایج به دست آمده با اعمال یک سیگنال سینوسی به الکترودها با دامنه ولتاژ ۵V (شکل بالا) و عبور نور در طول موج ۱۵۵۰nm و در طول موج ۱۳۱۰nm با دامنه ولتاژ ۲V (شکل پایین) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ با اندازه‌گیری ولتاژ متناظر ورودی بین یک نقطه بیشینه و کمینه در خروجی، V_{π} این مدولاتور حدود ۶V به دست می‌آید.



شکل ۵. طرح ماسک الکترودها و موجبر، طول الکترودها در ناحیه اطرف موجبر ۱cm، طول ناحیه باریک شونده خط انتقال ۲ cm است.



- [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, pp 5690 - 5697, 2009.
- [3] M. Rangaraj, T. Hosoi, and M. Kondo, "A wide-band Ti:LiNbO₃ optical modulator with a conventional coplanar waveguide type electrode", *IEEE Photon. Techn. Lett.*, vol. 4, no. 9, 1992.
- [4] K. Noguchi, O. Mitomi, H. Miyazawa, and S. Seki, "A Broadband Ti : LiNbO₃ Optical Modulator with a Ridge Structure", *J. Lightwave Techn.*, vol. 13, no. 6, pp 1020-1022, 1995.
- [5] S.J. Chang, C.L. Tsai, Y.B. Lin, J.F. Liu and W.S. Wang, "Improved electrooptic modulator with ridge structure in x-cut LiNbO₃", *J. Lightwave. Tech.*, vol. 17, no. 5, pp 843-847, 1999.
- [6] W. K. Burns, M. M. Howerton, R. P. Moeller, R. Krahenbuhl, R. W. McElhanon, and A. S. Greenblatt, "Low Drive Voltage, Broad-Band LiNbO₃ Modulators With and Without Etched Ridges", *J. Lightwave Tech.*, vol. 17, no. 12, pp 2551 - 2555, 1999.
- [7] C.M Kim R.V Ramaswamy "Overlap Integral Factors in Integrated Optic Modulators And Switches" *J. Lightwave Techn.*, vol. 7, no. 7, 1989.
- [8] J. M. M. d. Almeida, "Design methodology of annealed H⁺ waveguides in ferroelectric LiNbO₃", *Optical Engineering*, vol. 46, no. 6, pp. 064601-1-064601-13, 2007.
- [9] 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.

همانطور که از شکل ۷ (ب) مشاهده می شود استفاده از قسمت تطبیق امپدانس باعث شده تا میزان پارامتر S_{11} (که همان میزان سیگنال بازگشتی به منبع است) در بازه فرکانسی وسیعی کمتر از -10 dB شود. پارامتر S_{21} (که میزان عبور سیگنال از منبع به بار را نشان می دهد) نیز برای بازه فرکانسی کمتر از 2 GHz ، بالای -10 dB اندازه گیری شده است. تلفات مدولاتور را می توان به ضخامت کم لایه آلومینیوم و تشعشعات الکترودهای مدولاتور در فرکانسهای بالا مربوط دانست. با توجه به پارامترهای پراکندگی مدولاتور و با توجه به این مطلب که محدودیت فرکانس اینگونه از مدولاتورها تنها به الکترودهای آن مربوط میشود (و نه به محدودیت فرکانس اثر پاکلز) می توان از این مدولاتور برای فرکانس های تا بیش از 2 GHz استفاده کرد. با توجه به پارامتر S_{21} مدولاتور و افت اولیه این پارامتر در فرکانسهای پایین پهنای 3 dB مدولاتور حدود 100 MHz به دست می آید اما اگر تلفات الکترودهای مدولاتور در فرکانسهای کمتر از 400 MHz (که بیشتر به علت ضخامت کم الکترودها است) در نظر گرفته نشود پهنای 3 dB مدولاتور حدود 2.6 GHz به دست خواهد آمد.

نتیجه گیری

در این مقاله طراحی و ساخت یک مدولاتور الکترواپتیک مجتمع با ولتاژ نیم موج پایین با استفاده از موجبرهای تبادل پروتونی و استفاده از فاصله صفر بین موجبر و الکتروود شرح داده شد. اضافه کردن یک بخش برای تطبیق امپدانس الکتروودها باعث کاهش تلفات بازتابی میدان الکتریکی و در نتیجه کاهش ولتاژ مدولاسیون میشود. فاصله صفر بین الکتروود و موجبر می تواند با استفاده از قسمتی از ماسک قسمت تبادل پروتون برای الکتروودها محقق شود.

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.