

طراحی و ساخت مدوله‌کننده هتروداین الکترواپتیک در لیتیوم نایوبایت

هادی دهقان نیری، رضا اسدی و مهدی خواجه

دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۱۰/۰۳)

چکیده

در این تحقیق طراحی و ساخت یک مدوله‌کننده الکترواپتیک هتروداین مجتمع در لیتیوم نایوبایت ارائه شده است. در این مدوله‌کننده از روش تبادل پروتون برای ساخت موجبر استفاده شده و برای اعمال دو سیگنال بسامد بالا به مدوله‌کننده از الکترودهای لایه‌نشانی شده که هر یک از شاخه‌های موجبر ماخ زندر بین آنها قرار گرفته، استفاده شده است. در این روش هر یک از سیگنال‌های الکتریکی به یکی از شاخه‌های موجبر ماخ زندر اعمال شده و بنابراین هر یک از آنها می‌تواند با یک بسامد مشخص تحریک شود. در نهایت این دو سیگنال به صورت اپتیکی با هم جمع شده که باعث ایجاد بسامدهایی معادل جمع بسامد دو سیگنال ورودی و تفریق آنها در خروجی می‌شود. همین‌طور با استفاده از روش المان محدود تأثیرات میزان نفوذ پروتون در شکل مد نوری خروجی، و ابعاد و شکل الکترودها در ضریب هم‌پوشانی میدان الکتریکی و مد موجبر و همین‌طور امپدانس الکترودها شبیه‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: مدوله‌کننده نوری، هتروداین، لیتیوم نایوبایت، موجبر، نفوذ پروتون

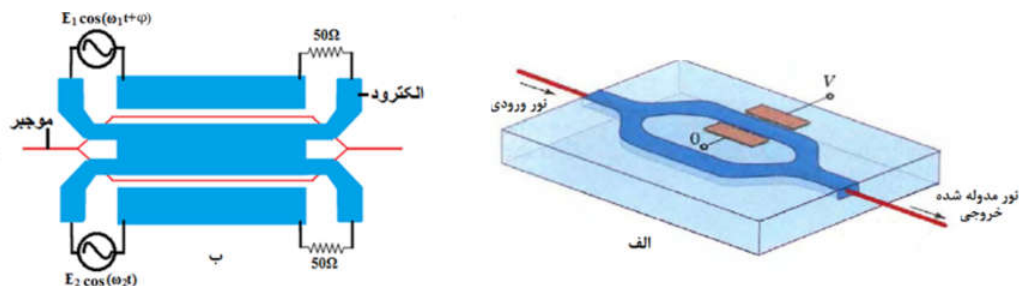
۱. مقدمه

کاربردهایی نظیر آنتن‌های دور از مدار^۱ و تلویزیون‌های کابلی بسیار مورد توجه هستند [۲]. همچنین تحقیقات زیادی در مورد لینک‌های آشکارسازی مستقیم^۲ مدوله شده به صورت AM انجام گرفته است [۳ و ۴]. مدوله‌کننده این لینک‌ها به صورت مستقیم (مدوله‌کننده منبع نور) و یا خارجی صورت می‌گیرد. هر چند تا کنون مدوله‌کننده مستقیم بیشتر مورد توجه بوده است اما مدوله‌کننده خارجی امکان بهینه‌سازی منبع نور و مدوله‌کردن را به صورت

با توجه به رشد روز افزون مخابرات نوری در دنیا، در سال‌های اخیر برای ساخت انواع مختلف مدوله‌کننده‌های نوری، تلاش‌های زیادی انجام گرفته است. این نوع مدوله‌کننده‌ها می‌توانند برای کاربردهای دیجیتال یا آنالوگ مورد استفاده قرار گیرند. مدوله‌کننده‌های دیجیتال تا کنون پیشرفت بسیار چشمگیری داشته‌اند و مدوله‌کننده‌های مجتمع تا بسامد کاری بیش از ۱۰۰ GHz به صورت آزمایشگاهی ساخته شده است [۱]. لینک‌های آنالوگ اپتیکی نیز برای

۱. Antenna remoting

۲. Direct detection(DD)



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) طرحواره یک مدوله‌کننده ماخ-زندر با تحریک یکی از شاخه‌های موجبر (ب) طرح‌واره مدوله‌کننده هتروداين ساخته شده.

استفاده از موجبرهای تبادل پروتون شده به شکل ماخ-زندر و تحریک هر یک از شاخه‌ها به صورت جداگانه در زیرلایه لیتیم نایوبایت (LN) و استفاده از الکترودهای لایه‌نشانی شده آلومینیومی ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده تا بسامدهای بیش از ۱/۲ GHz نیز ارائه شده است.

در شکل ۱، تفاوت ساختار مدوله‌کننده هتروداين با مدوله‌کننده‌های متداول، نشان داده شده است. در این شکل، در نمونه (الف)، فقط یکی از شاخه‌های موجبر توسط الکترودها مجاور آن تحریک می‌شود و در مورد مدوله‌کننده هتروداين (شکل ۱ ب)) هر دو شاخه به صورت مستقل توسط دو الکترودها مجزا تحریک می‌شوند.

برای ساخت موجبر در LN، روش‌های مختلفی مانند تبادل پروتون با استفاده از اسیدهایی مانند اسید بنزوئیک و اسید گلوواتریک، کاشت یون‌هایی مانند هلیومو نفوذ فلزاتی مانند تیتانیوم، کروم و مس [۷] تاکنون استفاده شده است. از بین این روش‌ها، نفوذ تیتانیوم (Ti) و تبادل پروتون بیش از دیگر روش‌ها مورد توجه بوده است. LN یک ماده دوشکستی^۲ است و با نفوذ Ti در آن هر دو ضریب شکست عادی و غیرعادی در آن افزایش داده شده و با نفوذ پروتون تنها ضریب شکست غیرعادی آن افزایش می‌یابد. 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 بلور) از خود عبور می‌دهد. برای

جداگانه فراهم می‌کند. همچنین استفاده از مدوله‌کننده‌های خارجی، امکان استفاده از لیزرهای پرتوان پیوسته را در این نوع از لینک‌ها میسر می‌کند. اصلی‌ترین قطعه در این نوع از لینک‌ها، مدوله‌کننده هتروداين است که معمولاً با استفاده از تداخل سنج ماخ-زندر ساخته می‌شود.

از کاربردهای دیگر این نوع از مدوله‌کننده‌های هتروداين نوری، می‌توان به حسگرهای میدان نزدیک الکترواپتیکی اشاره کرد [۵]. در این روش با استفاده از یک مدوله‌کننده هتروداين الکترواپتیکی با نویز کم و بسامد بالا، یک میدان الکترومغناطیسی نوار رادیویی با یک نور مدوله شده ترکیب شده و بسامد آن پایین آورده می‌شود.

کاربرد دیگر مدوله‌کننده هتروداين نوری برای اندازه‌گیری جابجایی‌های بسیار کوچک در حد چند نانومتر است. کول^۱ و همکاران با استفاده از یک مدوله‌کننده هتروداين و آشکارساز که هر دو بر روی یک ویفر پیاده‌سازی شده بود، توانستند یک بازه ۱ mm در ۶ mm را با دقت ۲ nm اندازه‌گیری کنند [۶].

این نوع از مدوله‌کننده‌ها می‌تواند در موادی مانند شیشه، سیلیسیم، پلیمر و لیتیم نایوبایت ساخته شود. از این بین، بهترین ضرایب الکترواپتیکی و مشخصات عملکردی مانند پایداری، مربوط به لیتیم نایوبایت است که استفاده از آن باعث کوچک‌تر شدن قطعات ساخته شده و مجتمع شدن بیشتر آنها می‌شود.

در این تحقیق چگونگی ساخت مدوله‌کننده هتروداين با

۲. Birefringent

۱. Cole

شدت نور) است و از رابطه (۲) به دست می‌آید [۸]

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

در رابطه (۲)، V ولتاژ اعمال شده به الکترودها، E_{el} میدان الکتريکی اعمال شده توسط الکترودها در موجبر و E_{opt} میدان الکتريکی مربوط به مد نور انتشاری در موجبر است. با توجه به رابطه (۱) و (۲) ولتاژ نیم موج، بستگی زیادی به همپوشانی توزیع میدان الکتريکی الکترودها و توزیع شدت مد نور دارد. توزیع شدت مد نور نیز خود به مشخصات موجبر و شرایط ساخت آن بستگی دارد. برای به دست آوردن مد نور 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 نور به دست آمد.

نفوذ پروتون به درون زیرلایه در دو مرحله تبادل پروتون و بازپخت انجام می‌شود و با نظریه نفوذ می‌تواند مدل‌سازی شود. در این مدل عمق نفوذ اولیه پروتون‌ها (h) در مرحله تبادل پروتون (که با تقریب، فقط در جهت عمق در نظر گرفته می‌شود) از رابطه (۳) به دست می‌آید [۹]

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

در رابطه بالا D_0 ثابت نفوذ هیدروژن برای اسید بنزوئیک (0.48×10^8 میکرومتر مربع بر ساعت)، R ثابت جهانی گازها، T دمای مطلق تبادل پروتون، Q انرژی فعال‌سازی بر حسب ژول بر مول (77×10^3) و t زمان تبادل پروتون است [۹]. در مرحله تبادل پروتون، یک ترکیب شیمیایی به شکل $\text{H}_p\text{Li}_{1-p}\text{NbO}_3$ ایجاد می‌شود که در آن P تمرکز نسبی پروتون است. چگونگی توزیع پروتون‌ها بعد از بازپخت را می‌توان به صورت رابطه (۴) تخمین زد [۹]

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

در رابطه (۴)، x فاصله از مرکز موجبر در راستای افقی، y

افزایش وضوح مدوله‌کننده (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 (با استفاده از تارهای نگهدارنده قطبش^۱) حذف شود یا این که از موجبرهای تک قطبش، 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.

الکترودهای این نوع از مدوله‌کننده‌ها نیز معمولاً با استفاده از لایه‌نشانی فلزاتی مانند آلومینیوم و یا آبکاری فلزاتی نظیر طلا ایجاد می‌گردد. در این تحقیق با توجه به موارد ذکر شده در بالا از روش تبادل پروتون برای ساخت موجبر و از یک لایه آلومینیوم برای ساخت الکترودها استفاده شد.

۲. طراحی و شبیه‌سازی مدوله‌کننده

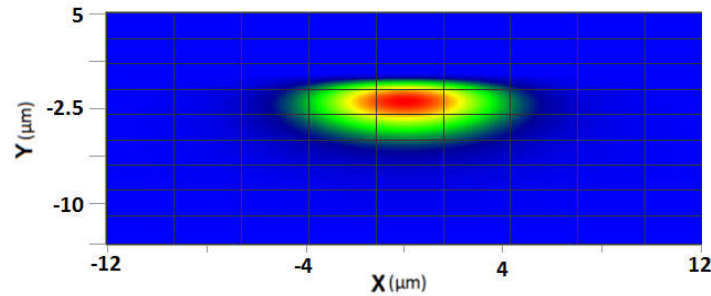
برای داشتن برآوردی از میزان ولتاژ مورد نیاز برای مدوله کردن نور هر یک از شاخه‌های ماخ-زندر، لازم است ابتدا چگونگی توزیع شدت نور در موجبر و سپس توزیع میدان الکتريکی ایجاد شده توسط الکترودها در محل مد نوری و چگونگی تأثیر آن بر مد نوری به دست آید.

برای یک مدوله‌کننده ماخ-زندر که میدان الکتريکی اعمالی توسط الکترودها در جهت Z بلور اعمال می‌شود و مد نوری عبوری در همین جهت قطبیده است، ولتاژ مورد نیاز برای ایجاد یک اختلاف فاز 180° در آن (ولتاژ نیم موج یا V_{π}) با رابطه (۱) به دست می‌آید [۸]

$$V_{\pi} = \frac{\lambda G}{n^3 r_{33} \Gamma L} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، λ طول موج نور در خلأ، G فاصله بین الکترودها، n ضریب شکست مؤثر مد نوری انتشاری در موجبر، r_{33} ضریب الکترواپتیک LN برای قطبش در جهت محور Z کریستال و Γ ضریب همپوشانی (میدان الکتريکی و

۱. Polarization maintaining fiber



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مد نور موجبر با عرض پوشش $6\mu\text{m}$ با تبادل پروتون یک ساعت در دمای 170°C درجه و بازپخت ۵ ساعت در دمای 375°C درجه در طول موج 1550nm .

این رابطه برای تمرکز پروتون‌های $P < 0.16$ تقریب خوبی ارائه می‌دهد و با توجه به این که مقدار تمرکز کمتر پروتون‌ها، باعث دستیابی به موجبر با کیفیت بهتر از لحاظ تلفات انتشاری می‌شود، در این مقاله نیز از این محدوده برای طراحی موجبر استفاده شده است. 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 شبیه‌سازی عددی مانند روش انتشار پرتو^۲ به دست آورد. به عنوان مثال در شکل ۲، شکل مد خروجی یک موجبر با عرض $6\mu\text{m}$ میکرومتر، با تبادل پروتون یک ساعت در دمای 180°C در اسید بنزوئیک و بازپخت ۵ ساعت در دمای 375°C نشان داده شده است. این دما و زمان برای تبادل پروتون و بازپخت، یک موجبر تک مد در طول موج 1550nm ایجاد می‌کند.

برای محاسبه ضریب همپوشانی میدان الکتریکی و توزیع شدت نور در موجبر (Γ)، 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. پس از

فاصله از موجبر در راستای عمودی، w عرض موجبر، P میزان تمرکز پروتون بعد از عملیات بازپخت و P_0 میزان تمرکز اولیه پروتون‌ها است که به صورت تقریبی برابر نصف تعداد اتم‌های لیتیم (0.5) در نظر گرفته می‌شود [۱۰]. مقادیر dx و dy به ترتیب طول نفوذ افقی و عمودی است و از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید [۹]

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

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

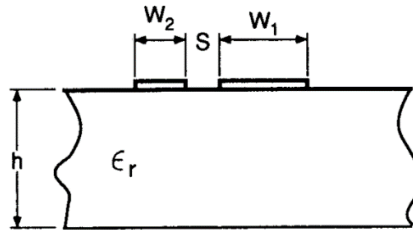
در روابط (۵) و (۶) زمان مرحله بازپخت، T_{aneal} دمای مطلق آن و K ثابت بولتزمن است. $D_{x,x}$ و $D_{y,y}$ ثابت نفوذ پروتون در جهت افقی و عمودی بوده و به ترتیب برابر 0.44×10^{12} و 22×10^{12} هستند، همچنین H_x و H_y به ترتیب برابر $1/5$ و $1/77$ هستند [۹].

لازم به ذکر است در این روش با توجه به عمق نفوذ کم پروتون‌ها در مرحله تبادل پروتون (نسبت به عرض موجبر)، نفوذ پروتون‌ها در مرحله تبادل پروتون به صورت یک‌بعدی در نظر گرفته می‌شود اما در مرحله بازپخت نفوذ به صورت دو بعدی با فرض یک منبع محدود از پروتون‌ها (با توجه به قوانین فیک^۱) در نظر گرفته شده است.

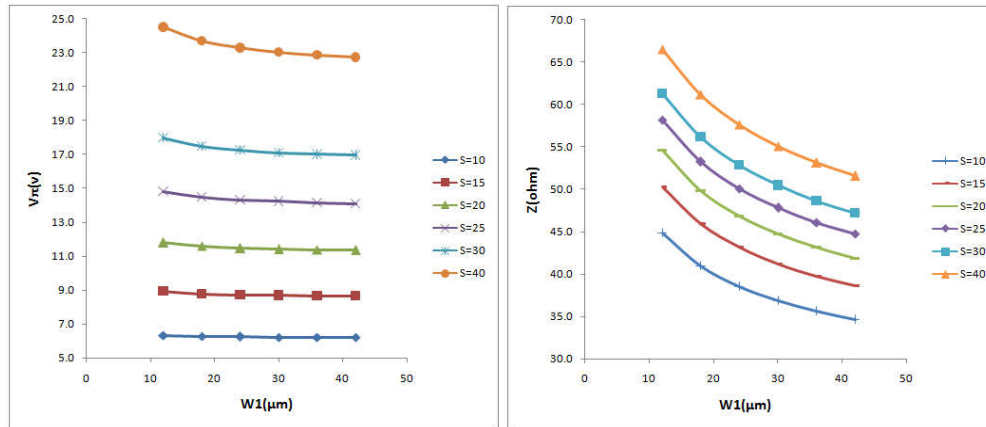
اختلاف ضریب شکست ایجاد شده بر حسب تمرکز

پروتون‌ها با رابطه (۷) به دست می‌آید [۱۰]

$$\Delta n_\alpha = \left(0.3226P + 0.183P^2\right) e^{-\sqrt{14}P} \quad \text{for } P < 0.16 \quad (7)$$



شکل ۳. ابعاد یک زوج الکتروود نامتقارن برای محاسبه امپدانس مشخصه آن.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) چگونگی تغییر ولتاژ نیم موج (V_{π}) و امپدانس مشخصه مدوله‌کننده (Z_0) با تغییر عرض یکی از شاخه‌های الکتروود با فاصله بین الکتروودهای مختلف.

$$Z_0 = \frac{\epsilon_0 \pi K'(k_f)}{\sqrt{\epsilon_{re}} K(k_f)}, \quad (8)$$

که در آن K انتگرال بیضیوی کامل و K' مکمل آن است و ϵ_{re} از رابطه (۹) به دست می‌آید [۱۱]

$$\epsilon_{re} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K(k_f) K'(k_f)}{K'(k_f) K(k_f)}, \quad (9)$$

$$k_f = \sqrt{\frac{W_1}{W_1 + S} \frac{W_f}{W_f + S}} k_f$$

$$= \sqrt{\frac{\sinh(\frac{\pi W_1}{2h}) \sinh(\frac{\pi W_f}{2h})}{\sinh(\frac{\pi(W_1 + S)}{2h}) \sinh(\frac{\pi(W_f + S)}{2h})}}$$

در روش نگاشت، ضخامت الکتروودها ناچیز در نظر گرفته می‌شود که با توجه به ضخامت لایه‌نشانی استفاده شده در این تحقیق (یک میکرومتر) تقریب مناسبی است.

در شکل ۴ چگونگی تغییر ولتاژ نیم موج مدوله‌کننده و امپدانس مشخصه آن با تحریک یکی از شاخه‌های آن بر

محاسبه توزیع میدان الکتریکی الکتروودها، می‌توان انتگرال رابطه (۲) و در نتیجه V_{π} را محاسبه کرد.

برای کاربردهای بسامد بالا، نیاز است الکتروودها به صورت موج رونده^۱ استفاده شوند و همچنین امپدانس مشخصه الکتروودها باید با امپدانس بار و منبع (که معمولاً ۵۰ اهم در نظر گرفته می‌شوند) تطبیق داشته باشد تا تلفات موج الکتریکی برگشتی از مدوله‌کننده به حداقل برسد. برای محاسبه امپدانس مشخصه مدوله‌کننده به صورت تحلیلی می‌توان از روش نگاشت^۲ استفاده کرد. می‌توان اثبات نمود که با یک نگاشت مناسب یک زوج الکتروود به صورت نامتقارن^۳ به شکل ۳ را می‌توان به صورت دو صفحه خازن موازی تبدیل کرد و امپدانس مشخصه را به صورت رابطه (۸) به دست آورد [۱۱]

۱. Traveling wave

۲. Conformal mapping method

۳. Coplanar strip line

$$\Psi_{\pm} = \exp(\pm j\varphi_{\pm}) \frac{\sin(\varphi_{\pm})}{\varphi_{\pm}}, \quad (11)$$

$$\varphi_{\pm} = \gamma_{\pm} \frac{L}{v} - j\alpha_m \frac{L}{v}, \quad (12)$$

$$\gamma_{\pm} = \pm \pi(n_m \mp n_o) \frac{f}{c}, \quad (13)$$

$$\alpha_m = \alpha_o \sqrt{f}, \quad (14)$$

$$\rho_1 = \frac{Z - Z_s}{Z + Z_s}, \quad (15)$$

$$\rho_2 = \frac{Z_l - Z}{Z_l + Z}, \quad (16)$$

در روابط بالا f بسامد کاری مدوله‌کننده، L طول الکترودها، c سرعت نور در خلأ، n_m ضریب شکست امواج رادیویی در الکترودهای مدوله‌کننده، n_o ضریب شکست امواج نوری در موجبر مدوله‌کننده، α_o ضریب تضعیف امواج رادیویی در بسامد یک گیگاهرتز، Z امپدانس مشخصه مدوله‌کننده، Z_s امپدانس منبع، Z_l امپدانس متصل شده به مدوله‌کننده به عنوان بار، ρ_1 ضریب عدم تطبیق مدوله‌کننده و منبع و ρ_2 ضریب عدم تطبیق مدوله‌کننده و بار هستند. رابطه (۱۰) با استفاده از نظریه خطوط انتقال مایکروویو قابل به دست آوردن است. ولتاژ نیم‌موج در بسامدهای بالا را می‌توان از ضرب $R(f)$ در V_{π} به دست آورد.

با محاسبه رابطه (۱۰) برای حالت‌های مختلف، می‌توان دریافت که در حالت کلی هر چه اختلاف امپدانس مشخصه مدوله‌کننده با بار و منبع بیشتر و طول مدوله‌کننده بزرگ‌تر باشد، پاسخ نوری مدوله‌کننده کاهش یافته و در نتیجه ولتاژ نیم‌موج مدوله‌کننده در بسامدهای بالا افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است، برای ساخت یک مدوله‌کننده هتروداین هر یک از شاخه‌های مدوله‌کننده با یک بسامد مشخص تحریک شده، در نهایت نور دو شاخه با هم ترکیب و هر یک از بسامدهای ω_1 و ω_2 و جمع و تفریق آنها در خروجی ایجاد می‌شوند. باید توجه کرد که هر یک از قسمت‌های تحریک موجبرها به صورت الکترودهای موج رونده در نظر گرفته شده است. در این طرح، الکترودها به صورت قسمتی از خط انتقال توان الکترونیکی از منبع به بار هستند و در صورتی که الکترودها

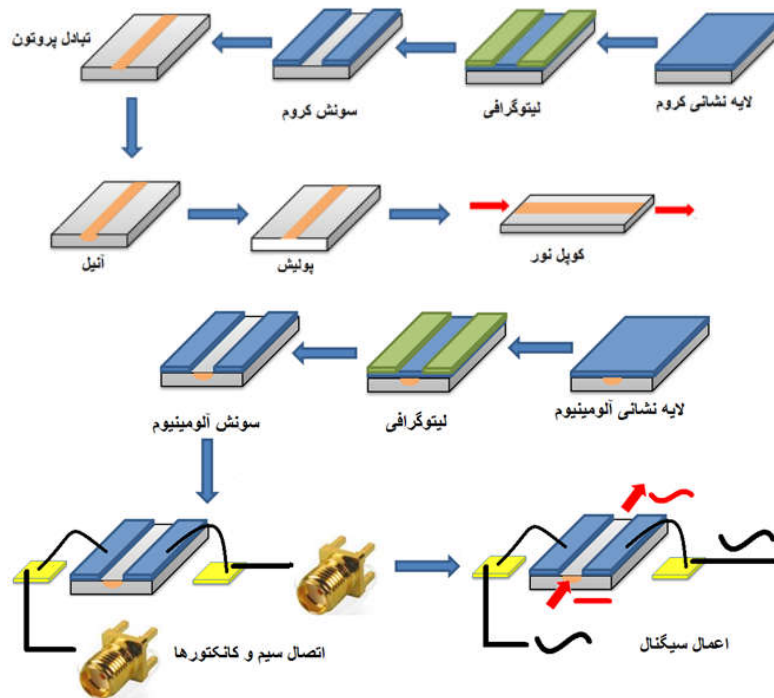
حسب عرض الکتروود این شاخه (W_1) و با فرض ثابت و بزرگ بودن عرض الکتروود دیگر ($W_2 = 100 \mu\text{m}$) برای فاصله‌های مختلف بین دو الکتروود (S) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است با افزایش عرض الکتروود ولتاژ نیم موج مدوله‌کننده کمی کاهش می‌یابد که این کاهش برای فواصل بزرگتر بین الکتروودها بیشتر است. همچنین با افزایش عرض الکتروود امپدانس مشخصه مدوله‌کننده (به علت افزایش خازن بین الکتروودها) کاهش می‌یابد، به عنوان مثال برای فاصله بین الکتروود $20 \mu\text{m}$ وقتی عرض الکتروود از $12 \mu\text{m}$ به $42 \mu\text{m}$ افزایش می‌یابد V_{π} مدوله‌کننده از $11/8$ به $11/37$ و امپدانس مشخصه آن از $54/6$ به $41/9$ اهم کاهش می‌یابد.

کاهش فاصله بین الکتروودها نیز باعث کاهش V_{π} و امپدانس مشخصه مدوله‌کننده می‌شود. به عنوان مثالی دیگر با فرض عرض الکتروود $36 \mu\text{m}$ وقتی فاصله بین الکتروودها از $40 \mu\text{m}$ به $10 \mu\text{m}$ کاهش می‌یابد V_{π} مدوله‌کننده از $22/9$ به $6/27$ و امپدانس مشخصه آن از $53/1$ به $35/6$ اهم کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و با توجه به دقت هم‌راستاسازی امکان‌پذیر در آزمایشگاه برای پوشش موجبر و الکتروود، برای ساخت عملی مدوله‌کننده در آزمایشگاه عرض موجبر $6 \mu\text{m}$ و فاصله بین الکتروودها $20 \mu\text{m}$ ، و عرض الکتروود $36 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شد.

لازم به ذکر است رابطه (۱) ولتاژ نیم موج مدوله‌کننده را در بسامد صفر به دست می‌دهد و بنابراین عدم تطبیق امپدانس مدوله‌کننده در آن لحاظ نشده است. اگر بخواهیم تأثیر عوامل عدم تطبیق امپدانس مشخصه مدوله‌کننده با امپدانس بار و امپدانس منبع و میزان تلفات الکتروودها را بر روی V_{π} مدوله‌کننده در نظر بگیریم، می‌توان از رابطه (۱۰) به دست آوردن پاسخ نوری مدوله‌کننده استفاده کرد [۱۲]

$$R(f) = \left| \frac{(\Psi_+ + \rho_2 \Psi_-)(1 + \rho_1)}{\exp(\gamma_2 j \varphi_+) + \rho_1 \rho_2 \exp(-\gamma_2 j \varphi_-)} \right|, \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) هر یک از پارامترها به صورت روابط زیر تعریف می‌شوند [۱۲]



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرحواره‌ای از مراحل ساخت مدوله کننده.

خروجی دارای یک جمله تناوبی با بسامد معادل با اختلاف بسامد میدان اعمالی به دو شاخه است. به این ترتیب می‌توان با اعمال دو سیگنال سینوسی با بسامد زیاد با اختلاف بسامد کم، حتی با یک آشکارساز بسامد پایین، عملکرد مدوله کننده در بسامد بالا را بررسی کرد.

۳. ساخت مدوله کننده

در شکل ۵ طرح‌واره‌ای از مراحل ساخت مدوله کننده نشان داده شده است. برای ساخت موجبرهای مدوله کننده، بعد از برش LN در ابعاد مورد نیاز و شستشوی آنها، یک لایه کروم به ضخامت حدود ۲۰۰ nm با استفاده از دستگاه اسپاترینگ جریان مستقیم، بر روی نمونه‌ها نشانده می‌شود. از این لایه به عنوان پوشش برای مرحله تبادل پروتون استفاده می‌شود. دقت در لایه‌نشانی کروم و تنظیم نرخ رشد لایه و میزان خلأ درون محفظه لایه‌نشانی برای به دست آوردن یک لایه چسبنده به زیرلایه و با استحکام مناسب بسیار مهم است. همچنین شستشوی مناسب قطعه‌ها قبل از لایه‌نشانی از اهمیت بالایی

با امپدانس مشخصه ۵۰ اهم ساخته شوند، خازن‌های پارازیتی الکترونها تأثیری در عملکرد مدوله کننده در بسامدهای زیاد ندارند.

اگر میدان الکتریکی اعمال شده به شاخه اول $E_1 \cos(\omega_1 t + \varphi)$ و میدان الکتریکی اعمال شده به شاخه دوم $E_2 \cos(\omega_2 t)$ باشد و ماخ-زندر شدت نور را به صورت مساوی بین شاخه‌ها تقسیم کند، قسمت متغیر شدت نور خروجی متناسب با رابطه (۱۸) خواهد بود

$$\begin{aligned}
 I &\propto [E_1 \cos(\omega_1 t + \varphi) + E_2 \cos(\omega_2 t)]^2 \\
 &= \frac{E_1^2}{2} [1 + \cos(2(\omega_1 t + \varphi))] + \frac{E_2^2}{2} [1 + \cos 2\omega_2 t] \\
 &\quad + E_1 E_2 [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi + \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi] \\
 &= \frac{E_1^2 + E_2^2}{2} + \frac{E_1^2}{2} \cos(2(\omega_1 t + \varphi)) \\
 &\quad + \frac{E_1^2}{2} \cos 2\omega_2 t + \frac{E_1 E_2}{2} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi] \\
 &\quad + \frac{E_1 E_2}{2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi]
 \end{aligned} \tag{18}$$

جمله فرکانس کم

همان طور که در رابطه (۱۸) مشاهده می‌شود، شدت نور

برخوردار است و در صورتی که شستشوی قطعات LN مناسب نباشد، در محل های وجود آلودگی، چسبندگی لایه کروم به زیرلایه کم شده و امکان دارد در طی مراحل بعدی لایه کروم در این نواحی از روی نمونه جدا شود.

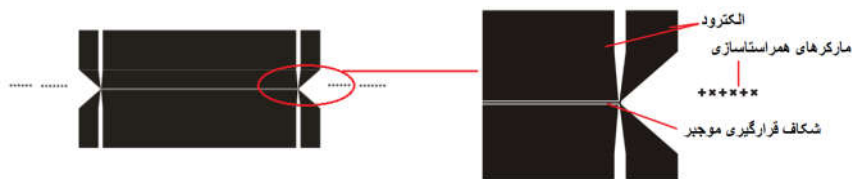
در مرحله لیتوگرافی، در ابتدا فتورزیست به طور کامل بر روی نمونه ریخته می شود به طوری که سراسر نمونه را فرا بگیرد. بعد از ریختن فتورزیست نمونه با سرعت مشخصی چرخانده می شود تا فتورزیست به صورت یکنواخت بر روی سطح پخش شود. برای این منظور از فتورزیست Shipley ۱۸۱۳ با سرعت چرخش ۳۰۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد، که باعث ایجاد ضخامت حدود ۱/۷ میکرومتر می شود. بعد از نشان دادن فتورزیست، نمونه به مدت دو دقیقه در دمای ۱۱۵ درجه حرارت داده می شود سپس نمونه را زیر پوشش مورد نظر در دستگاه پوشش الاینز قرار داده و به مدت زمان مشخصی نور ماوراء بنفش به آن تابانده می شود. زمان تابش معمولاً به صورت تجربی به دست می آید چرا که با توجه به میزان شفافیت پوشش، حداقل ابعاد موجود در پوشش و چگونگی طرح، زمان بهینه تابش تفاوت می کند. بعد از مرحله تابش، نمونه درون محلول سود ۰/۵٪ قرار داده می شود تا قسمت های تحت تابش از بین برود. سپس نمونه با آب مقطر شسته شده و دوباره به مدت دو دقیقه در دمای ۱۱۵ درجه حرارت داده می شود (به این مرحله پخت ثانویه نیز می گویند) تا فتورزیست در زمان شستشو (یا سونش) کروم از بین نرود.

بعد از درآوردن طرح موجبر بر روی فتورزیست، نمونه درون محلول سریم آمونیوم (۳/۲ گرم)، آب (۱۶ گرم) و اسید نیتریک (۰/۸ گرم) با نسبت های وزنی ۰/۴٪، ۰/۸۰٪ و ۰/۱۶٪، قرار داده می شود. این محلول به راحتی در ناحیه ای که فتورزیست وجود ندارد کروم روی نمونه را در خود حل می کند و طرح موجبر مورد نظر به کروم منتقل می شود. در زمان قرار گرفتن نمونه درون محلول، ظرف حاوی محلول باید به خوبی تکان داده شود تا عملیات سونش کروم به درستی صورت پذیرد چرا که اگر محلول درون ظرف راکد بماند قسمتی از محلول اشباع شده و سرعت سونش در

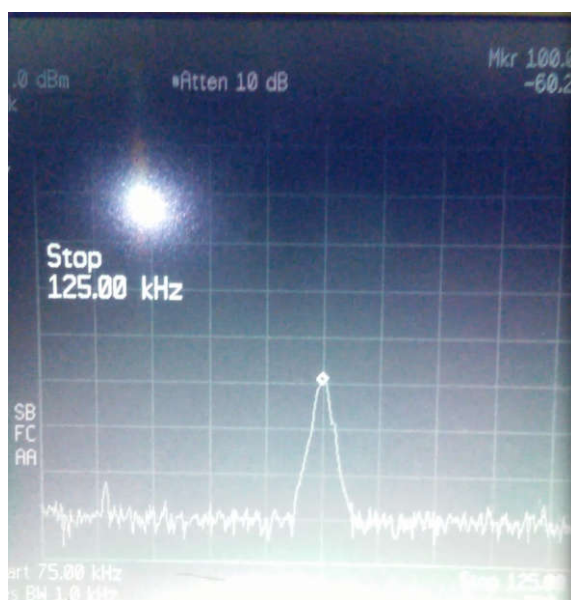
قسمت های مختلف نمونه با هم یکسان نخواهد بود. بعد از به وجود آمدن شیارهای موجبر بر روی لایه کروم، نمونه درون پودر اسید بنزوئیک قرار داده می شود و به آن حرارت داده می شود تا اسید به حالت مایع در آید و به درجه حرارت مورد نظر (۱۸۰°C) برسد. مدت زمان تبادل پروتون یک ساعت در نظر گرفته شده است. نکته ای که در مورد تبادل پروتون نیز باید در نظر گرفت این است برای جلوگیری از شوک حرارتی، نمونه نباید به صورت ناگهانی در اسید با دمای بالا قرار داده شود.

بعد از این مرحله نمونه به مدت ۵ ساعت در دمای حدود ۳۷۵°C درون کوره بازپخت قرار داده می شود. برای جلوگیری از کاهش اکسیژن زیرلایه در زمان بازپخت، به علت برون رفت اکسیژن، گاز اکسیژن با نرخ یک لیتر بر دقیقه از روی نمونه ها عبور داده شد. پس از این مرحله، لبه های نمونه با یک روش پولیش مناسب با دقت بهتر از یک میکرومتر پولیش داده شد. برای جفت کردن نور به درون موجبر از طول موج ۶۵۰nm استفاده شد. برای مشخصه یابی موجبرها از روش تزویج مستقیم فیبر (با استفاده از یک لیزر با قابلیت اتصال به تار، استفاده شد. با توجه به حساسیت میزان جفت شدگی به دقت هم راستایی موجبر و فیبر، از یک میز ۶ درجه آزادی با قابلیت تنظیم بهتر از یک میکرومتر استفاده شد و برای اندازه گیری شدت و مشاهده شکل مد خروجی موجبر، از یک عدسی شیئی ۴۰x با روزنه عددی ۰/۶ که نور خروجی را بر روی پرده و یا آشکارساز متمرکز می کند، استفاده شد. با استفاده از این روش، میزان تلفات نور برای قطبش نور در راستای محور Z بلور، حدود ۵/۲dB به دست آمد. البته این مقدار علاوه بر مشخصات موجبر، به شرایط تنظیم تار و موجبر و همین طور مشخصات کیفیت پولیش سطح ورودی موجبر و تار نیز بستگی دارد.

برای ایجاد الکترودهای مدوله کننده با استفاده از روش کند و پاش (یا اسپاترینگ)، یک لایه آلومینیوم به ضخامت یک میکرومتر بر روی نمونه لایه نشانی شد و سپس طرح الکترودها با استفاده از لیتوگرافی ماوراء بنفش بر روی این



شکل ۶. طرح پوشش مورد استفاده برای ایجاد الکتروودها.



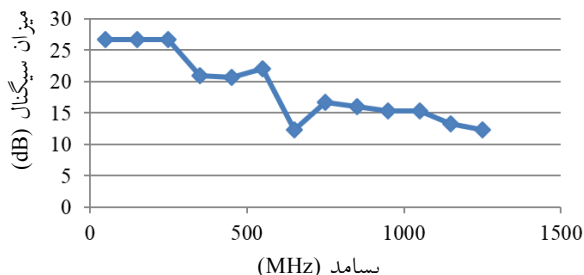
شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) قله بسامدی ۱۰۰KHz آشکار شده با اعمال دو بسامد ۱۰۰MHz و ۱۰۰/۱ MHz به دو بازوی مدوله‌کننده.

۳ ۲/۲MHz استفاده شد. برای بررسی عملکرد مدوله‌کننده در بسامدهای بالا، با استفاده از یک دستگاه تحلیلگر طیف، با اعمال دو سیگنال با بسامدهای نزدیک به هم با اختلاف ۱۰۰KHz (مثلاً ۱۰۰MHz و ۱۰۰/۱ MHz) به دو شاخه مدوله‌کننده، یک قله در بسامد ۱۰۰KHz در خروجی آشکار ساز را می‌توان مشاهده کرد. به عنوان مثال در شکل ۷ نمونه‌ای از تصویر خروجی دستگاه تحلیلگر طیف با اعمال سیگنال‌های ۱۰۰/۰ و ۱۰۰/۱ MHz به دو شاخه مدوله‌کننده نشان داده شده است.

در شکل ۸ چگونگی تغییر میزان سیگنال خروجی آشکار شده (در بسامد ۱۰۰KHz) با اعمال دو سیگنال بسامد بالا با اختلاف ۱۰۰KHz به دو شاخه مدوله‌کننده نشان داده شده است. به عنوان مثال با اعمال سیگنال‌های ۵۰/۰ و

لایه ایجاد شد. برای هم راستا سازی الکتروود و موجبرها در پوشش موجبر و الکتروودها، در ابتدا و انتهای هر یک از موجبرها علامت‌هایی برای هم‌راستاسازی الکتروود و موجبرها در نظر گرفته شد. الکتروود وسط (الکتروود مشترک بین دو زوج الکتروود) دارای عرض ۳۶ μm و فاصله بین الکتروودها ۲۰ μm در نظر گرفته شده است. این انتخاب امپدانس مشخصه مدوله‌کننده نزدیک ۵۰ اهم می‌شود. برای اعمال ولتاژ لازم برای تحریک الکتروودها اتصالات مناسب بر روی نمونه قرار گرفته و با استفاده از چسب نقره اتصالات آن با الکتروودها برقرار شد. در شکل ۶ طرح پوشش الکتروودها مشاهده می‌شود.

پس از تکمیل فرایند، برای آشکار سازی مدوله‌کننده بر روی نور خروجی از یک آشکارساز سیلیسیومی با بسامد dB



شکل ۸. میزان سیگنال اندازه‌گیری شده در بسامدهای مختلف با فاصله ۱۰۰MHz و با شروع از بسامد ۵۰MHz به مدوله‌کننده.

حدود ۱٫۲ GHz دامنه سیگنال آشکارساز نسبت به مقدار اولیه (در بسامد پایین) به نصف کاهش می‌یابد. بنابراین پهنای بسامدی و یا به عبارتی بسامد پاسخ مدلاتور ۱٫۲ GHz است.

۵۰٫۱ MHz به مدوله‌کننده، میزان سیگنال آشکارسازی شده (متوسط در آزمایش‌های مختلف) برابر ۲۷dB بالای سطح نویز اندازه‌گیری شده است.

با توجه به شکل ۸ مشخص است که روند کلی دامنه سیگنال خروجی با افزایش بسامد نزولی است و در بسامد

مراجع

1. D Sun, J Zhang, C Chen, M Kong, J Wang, and H Jiang, *J. Lightwave Technol.* **33**, 10 (2015) 1937.
2. J Ferreira, A Alves, O L Coutinho, C D S Martins, W D S Fegadolli, J A J Ribeiro, V R D Almeida, and J E B Oliveira, *J. Aero. Technol. Manag.* **5**, 2 (2013) 205.
3. B J Schmidt, A J Lowery, and J Armstrong, *J. Lightwave Technol.* **26**, 1 (2008) 196.
4. A Karim and J Devenport, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19**, 5 (2007) 312.
5. M García-Granda, H Hu, J Rodríguez-García, and W Sohler, *J. Lightwave Technol.* **27**, 24 (2009) 5690.
6. C M Kim and R V Ramaswamy, *J. Lightwave Technol.* **7**, 10 (1989) 581.
7. J M M M d Almeida, *Opt. Eng.* **46**, 6 (2007) 64601.
8. C Xiong, W H Pernice, and H X Tang, *Nano Lett.* **12**, 7 (2012) 3562.
9. K Sasagawa and M Tsuchiya, *J. Lightwave Technol.* **26**, 10 (2008) 1242.
10. D B Cole, C Sorace-Agaskar, M Moresco, G Leake, D Coolbaugh, and M R Watts, *Optics Lett.* **40**, 13 (2015) 3097.
11. R Garg, L Bahl, and M Bozzi, "Microstrip Lines and Slotlines", Artech House (2013).
12. O Mitomi, K Noguchi, and H Miyazawa, *IEEE Proc. Optoelectron.* **145** (1998) 360.