فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحه**

صفحه عنوان	الف
چکیده فارسی	ح
فهرست مطالب	۱
فهرست شکل‌ها	۴
فهرست جدول‌ها	۷
مقدمه	۸
فصل ۱: ساختار و عملکرد انواع سوئیچهای نوری	۱۰
۱-۱- مقدمه‌ای بر سوئیچ نوری	۱۰
۱-۲- اهمیت مدارهای مجتمع نوری و سوئیچهای نوری	۱۱
۱-۳- سوئیچهای نوری و انواع آن	۱۳
۱-۴- نحوه‌ی عملکرد سوئیچ ماخ‌زندر	۱۹
فصل ۲: مبانی نظری مدارهای مجتمع نوری	۲۱
۲-۱- بررسی کلی موجبرهای دی الکتریک	۲۱
۲-۲- موجبر تخت	۲۲
۲-۳- موجبرهای کانالی دی الکتریک	۲۶
۲-۴- موجبرهای ضریب شکست تدریجی	۳۰
۲-۵- موجبر کانالی با دیواره‌های ضریب شکست تدریجی	۳۳
۲-۶- موجبرهای با سطح مقطع متغیر	۳۴
۲-۷- تداخل سنج ماخ-زندر	۳۶
۲-۸- تزویج گرسمتی	۳۸

فصل ۳: سالیتون‌ها و اساس غیر خطی ۴۱

۳-۱- سالیتون‌ها ۴۲

۳-۲- محیط کِر و محیط ناهمگن ۴۸

۳-۳- حرکت نوسانی سالیتون در یک محیط ناهمگن ۴۹

۳-۴- انتشار امواج الکترومغناطیسی ۴۹

۳-۵- انتشار در محیط خطی ۵۰

۳-۶- انتشار در محیط غیرخطی ۵۲

۳-۷- سالیتون‌های زمانی ۵۵

۳-۸- سالیتون‌های مکانی ۵۷

۳-۹- معادله شرودینگر غیرخطی در محیط کِر ۵۷

۳-۱۰- معادله شرودینگر غیرخطی تعمیم یافته ۵۹

فصل ۴: طراحی و مدل‌سازی سوئیچ N × ۱ تمام نوری کنترل شونده با توان و طول موج ورودی ۶۲

۴-۱- مقدمه‌ای بر تداخل‌سنجی ۶۳

۴-۱-۱- دسته بندی تداخل‌سنج ها ۶۳

۴-۱-۲- کاربردهای تداخل‌سنجی ۶۳

۴-۱-۳- انواع تداخل‌سنج ۶۴

۴-۲- مدل فیزیکی سوئیچ ۶۹

۴-۳- آنالیز ریاضی مدل فیزیکی ۷۰

۴-۴- نتایج و شبیه‌سازی عددی ۷۲

۴-۵- طراحی سوئیچ N ×۱ ۸۲

۴-۶- نتیجه‌گیری ۸۴

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۸۵

۵-۱- نتیجه‌گیری ۸۶

۵-۲- پیشنهادها ۸۸

پیوست‌ها ۸۹

پیوست ۱: واژگان از فارسی به انگلیسی ۸۹

پیوست ۲: واژگان از انگلیسی به فارسی ۹۲

مراجع ۹۵

چکیده انگلیسی ۱۰۰

فهرست اشکال

عنوان **شماره صفحه**

شکل ۱-۱- مدار مجتمع نوریِ سیستم نوشتن و خواندن CD. ۱۲

شکل ۱-۲- سیستم سرعت سنج لیزری مجتمع. ۱۳

شکل ۱-۳- سوئیچ نوری مکانیکی با ابعاد میکرومتری. ۱۴

شکل ۱-۴- سوئیچهای الکترواپتیک. ۱۵

شکل ۱-۵- سوئیچ ۴×۴ الکترواپتیک. ۱۵

شکل ۱-۶- سوئیچ ماخ‌زندر حرارتی- نوری با بلور فوتونی. ۱۶

شکل ۱-۷- سوئیچ ماخ‌زندر الکترواپتیکی در بلور فوتونی. ۱۷

شکل ۱-۸- سوئیچ تمام‌نوری مبتنی بر بلور فوتونی. ۱۸

شکل ۱-۹- سوئیچ ماخ‌زندر متقارن در بلور فوتونی با استفاده از اثرات غیرخطی. ۱۸

شکل ۱-۱۰- نمایی از ساختار یک تداخل‌سنج ماخ-زندر مرسوم. ۱۹

شکل ۲-۱- موجبر تخت دی‌الکتریک. ۲۲

شکل ۲-۲- حل ترسیمی برای مدهای زوج TE در موجبر تخت. ۲۵

شکل۲-۳- تحلیل پرتوی انتشار نور در موجبر. خطوط عمود بر راستای انتشار موج، صفحات همفاز را نشان می‌دهند. ۲۶

شکل ۲-۴- تحلیل پرتوی انتشار نور در موجبر کانالی. ۲۷

شکل ۲-۵- توزیع میدان الکتریکی برای چند مد اول شبه TM . ۲۸

شکل ۲-۶- مراحل اعمال روش ضریب شکست مؤثر برای تحلیل موجبرهای کانالی. ۲۹

شکل ۲-۷- مقطع موجبر مستطیلی. ۲۹

شکل ۲-۸- موجبر ضریب شکست تدریجی و تابع تغییرات ضریب شکست آن. ۳۰

شکل ۲-۹- مقایسه دو تابع گاوسی و عکس مجذور کسینوس‌ها پربولیک. ۳۱

شکل ۲-۱۰- مقایسه توزیع میدان در موجبر ضریب شکست پله‌ای و موجبر گاوسی. خط پررنگ مربوط به موجبر گاوسی می‌باشد. ۳۲

شکل ۲-۱۱- مقطع عرضی یک موجبر کانالی ضریب شکست تدریجی. ۳۳
شکل ۲-۱۲- مقطع عرضی موجبر کانالی با ضریب شکست تدریجی در راستای y. ۳۳
شکل ۲-۱۳- (الف) موجبر باریک شونده، (ب) مراحل تقریب به صورت پله‌ای. ۳۵
شکل ۲-۱۴- دو شاخه‌ی y شکل، (الف) دو شاخه‌ی متقارن، (ب) تقریب دو شاخه به صورت موجبرهای متوالی، (ج) دو شاخه‌ی معکوس. ۳۷
شکل ۲-۱۵- تداخل سنج ماخ-زندر. ۳۸
شکل ۲-۱۶- تزویج‌گر سمتی. ۳۹
شکل ۳-۱- نمایش (الف) پهن شدگی پالس نوری در حال انتشار در یک محیط خطی (ب) انتشار سالیتون دریک محیط غیرخطی با طراحی مناسب. ۴۳
شکل ۳-۲- نمایش سه بعدی انتشار دو سالیتون قبل، در حال وبعد از برخورد با یکدیگر. ۴۴
شکل ۳-۳- نمایش اثر جذبی دو سالیتون هم‌فاز در هنگام انتشار به‌موازات هم: (الف) شمای سه بعدی، (ب) نما ازبالا. ۴۵
شکل ۳-۴- رفتار ضریب شکست بر حسب طول‌موج طبق رابطه اسلیمیر. ۴۷
شکل ۴-۱- ساختار تداخل‌سنج فابری- پرو. ۶۴
شکل ۴-۲- ساختار تداخل‌سنج مایکلسون. ۶۵
شکل ۴-۳- ساختار تداخل‌سنج ساناک. ۶۵
شکل ۴-۴- ساختار تداخل‌سنج ماخ-زندر. ۶۶
شکل ۴-۵- ساختار ساده تداخل‌سنج ماخ-زندر. ۶۶
شکل ۴-۶- ساختار فیزیکی سوئیچ ماخ-زندر نامتقارن غیرخطی. ۶۹
شکل ۴-۷- ساختار فیزیکی سوئیچ ماخ-زندر متقارن با یک بازوی خطی. ۷۰
شکل ۴-۸- عملکرد سوئیچ نامتقارن برای سیگنال‌های ورودی در بازه ۱/۵ تا ۱/۶۴۵ میکرومتر. ۷۴
شکل ۴-۹- عملکرد سوئیچ نامتقارن برای سیگنال‌های ورودی در بازه ۱/۶۴۵ تا ۱/۷۳۰ میکرومتر. ۷۴
شکل ۴-۱۰- عملکرد سوئیچ نامتقارن برای سیگنال‌های ورودی در بازه ۱/۷۳۱ تا ۱/۹۰ میکرومتر. ۷۵

شکل ۴-۱۱- عملکرد سوئیچ نامتقارن برای سیگنال‌های ورودی در بازه ۱/۹۰۱ تا ۲ میکرومتر. ۷۵

شکل ۴-۱۲- عملکرد سوئیچ نامتقارن برای سیگنال‌های ورودی در بازه ۲/۰۰۱ تا ۲/۰۵ میکرومتر. ۷۵

شکل ۴-۱۳- عملکرد سوئیچ متقارن برای توان سیگنال‌های ورودی در بازه ۱۰ تا ۱۰/۶۲ وات. ۷۷

شکل ۴-۱۴- عملکرد سوئیچ متقارن برای توان سیگنال‌های ورودی در بازه ۱۰/۶۳ تا ۱۱/۵۳ وات. ۷۷

شکل ۴-۱۵- عملکرد سوئیچ متقارن برای توان سیگنال‌های ورودی در بازه ۱۱/۵۴ تا ۱۳/۱۸ وات. ۷۷

شکل ۴-۱۶- عملکرد سوئیچ متقارن برای توان سیگنال‌های ورودی در بازه ۱۳/۱۹ تا ۱۵/۳۱ وات. ۷۸

شکل ۴-۱۷- عملکرد سوئیچ متقارن برای توان سیگنال‌های ورودی در بازه ۱۵/۳۲ تا ۴۰ وات. ۷۸

شکل ۴-۱۸- شبیه سازی انتشار پالس بطور همزمان در هر پنج کانال خروجی برای سوئیچ های پیشنهادی با استفاده ازنرم افزار متلب. ۷۹

شکل ۴-۱۹- نمودار جابجایی مکانی پالس در برابر طول موج در توان‌های مختلف در سوئیچ متقارن. ۸۱

شکل ۴-۲۰- نمودار جابجایی مکانی پالس در برابر طول موج در توان‌های مختلف در سوئیچ نامتقارن. ۸۱

شکل۴-۲۱- نمودار نشان دهنده‌ی عرض ناحیه واسط غیرخطی (طبقه میانی سوئیچ) برای N=۵ تا N=۳۰. ۸۲

شکل ۴-۲۲- سوئیچ ماخ-زندر ۱۷×۱ نامتقارن غیرخطی . ۸۳

شکل ۴-۲۳- شبیه سازی و انتشار سیگنال ورودی درسوئیچ ماخ-زندر ۱۷×۱ نامتقارن غیرخطی . ۸۴

فهرست جداول

عنوان **شماره صفحه**

جدول ۴-۱- پارامترهای طراحی سوئیچ‌های پیشنهادی. ۷۳

جدول ۴-۲- بازه‌های طول‌موج سیگنال ورودی و کانال‌های خروجی متناظر برای سوئیچ‌های متقارن و نامتقارن. ۷۳

جدول ۴-۳- بازه‌های توان سیگنال ورودی و کانال‌های خروجی متناظر برای سوئیچ‌های متقارن و نامتقارن. ۷۶

جدول ۴-۴- مقادیر جابجایی مکانی پالس دربرابر طول‌موج درتوان‌های مختلف در سوئیچ ماخ-زندر متقارن. ۸۰

جدول ۴-۵- مقادیر جابجایی مکانی پالس دربرابر طول‌موج در توان‌های مختلف در سوئیچ ماخ-زندر نامتقارن. ۸۰

مقدمه

پس از اختراع لیزر به‌عنوان یک منبع همدوس نور، به‌طور همزمان با پیشرفت فناوری ساخت فیبر نوری شیشه‌ای، طراحی و ساخت منابع نوری همدوس و آشکارسازهای نوری پیشرفت چشمگیری داشته‌اند. این امر باعث شد تا استفاده از سامانه‌های ارتباطات نوری به‌طور روزافزون توسعه یابد. سامانه‌های ارتباطات نوری متداول از اجزایی تشکیل شده‌اند که ماهیت آن‌ها نوری، اپتوالکترونیکی یا الکترواپتیکی است. روند توسعه فناوری ارتباطات نوری به‌سوی تمام‌نوری کردن سامانه‌های ارتباطات نوری است. در واقع تلاش براین است که اجزاء الکترونیکی سامانه‌های اپتوالکترونیکی در صورت امکان با افزاره‌های تمام‌نوری جایگزین شوند. استفاده از موجبرهای نوری در ساخت افزاره‌های تمام‌نوری منجر به پیشرفت‌های چشم‌گیردر سیستم‌های نوری شده است. مزیت‌های افزاره‌های تمام نوری در مقابل افزاره‌های اپتوالکترونیکی شامل: پهنای باند بسیار وسیع، تضعیف کم، نرخ خطای بسیار پایین، حجم و وزن کم، قابلیت مجتمع‌سازی در یک تراشه، قابلیت انعطاف زیاد، کاهش استراق سمع و هزینه تولید پایین آنها هستند. بنابراین با پیشرفت سریع فناوری ارتباطات، ضروری است که از افزاره‌های تمام نوری استفاده شود. محققان با استفاده از آثار غیرخطی، افزاره‌های تمام‌نوری طراحی نموده‌اند که زمینه گسترده‌ای در مخابرات نوری برای انتقال داده با نرخ ارسال بیت بالا ایجاد کرده است. مسیریاب‌های تمام نوری از افزاره‌های بسیار مهم در مخابرات نوری هستند. استفاده از نور غیرخطی در طراحی سوئیچ N ×۱ از بخش‌های مهم مسیریاب‌های مخابراتی می‌باشد. در این پایان‌نامه سوئیچ ۵ ×۱ تمام نوری متقارن و نامتقارن کنترل شونده بر اساس طول موج و توان ورودی طراحی می‌شود و بر اساس این طراحی سوئیچ N × ۱ پیشنهاد می‌گردد.

در فصل اول با توجه به موضوع این پایان‌نامه مقدمه‌ای در رابطه با سوئیچ‌های نوری بیان می‌شود و در ادامه‌ی این فصل اهمیت مدارهای مجتمع نوری و سوئیچ‌های نوری مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین در ادامه، انواع سوئیچ‌های نوری مطرح می‌گردد و به دلیل استفاده از سوئیچ ماخ زندر در این تحقیق به شرح کامل عملکرد این سوئیچ می‌پردازیم.

در فصل دوم به بررسی تحلیلی موجبرهای دی‌الکتریک می‌پردازیم. در ابتدای این فصل به تحلیل کلی موجبرها پرداخته پس از آن مرور مختصری بر نحوه‌ی انتشار نور در ادوات مجتمع نوری و سوئیچهای نوری خواهیم داشت. همچنین بررسی خروجی این موجبرها مورد بحث قرار خواهند گرفت.

در فصل سوم سعی شده با توجه به موضوع تحقیق که از خواص غیرخطی و انتشار پالس در محیط‌های غیرخطی استفاده شده است، خواص سالیتون‌های زمانی و مکانی و روابط حاکم بر آن‌ها و انتشار در محیط خطی و غیرخطی با رجوع به منابع مربوط، به‌طور اجمال مرور شود.

در فصل چهارم با توجه به آنچه در فصل‌های ابتدائی گفته شد سوئیچ ماخ زندر تمام نوری ۵ ×۱ کنترل شونده بر اساس طول موج و توان ورودی طراحی می‌شود، مدل فیزیکی و نتایج عددی این طراحی به طور کامل ارائه می‌گردد. در ادامه‌ی فصل بر اساس مدل طراحی شده سوئیچ N×۱ طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. در نهایت، نتایج حاصل از این پایان نامه در فصل پنجم بیان می‌شود.

فصل اول

ساختار و عملکرد انواع سو ئیچهای نوری

۱-۱- مقدمه‌ای بر سوئیچ نوری

دو اصل اساسی برای پیشرفت علم و تکنولوژی محاسبات و ارتباطات نوری با سرعت بالا می‌باشد. از طرف دیگر مزایای مدارهای مجتمع، اهمیت قطعات و مدارهای طراحی شده‌ای را که قابل استفاده به‌صورت مجتمع باشند نشان می‌دهد موجبرها و سوئیچ‌های نوری به‌دلیل داشتن قابلیت مجتمع‌سازی دریچه‌ی جدیدی را به ساخت ادوات اپتیکی باز کرده‌است. با مطالعه بر روی ساختارهای مبتنی بر ادوات نوری مشاهده می‌شود که تداخل‌سنج ماخ‌زندر در فیلترها، مدولاتورها، سوئیچ‌ها و گیت‌های منطقی نوری به دفعات استفاده شده‌است [۲-۱]. همچنین از بین بلوک‌های ساختاری که برای شبکه‌های ارتباطی و ساختارهای محاسباتی استفاده می‌شوند، بخشی که سوئیچینگ را به‌صورت بهینه انجام دهد بیشترین اهمیت را داراست. برای شبیه‌سازی چنین بلوک‌هایی چندین ساختار نوری و الکترونیکی تاکنون ارائه شده است [۳]. البته ساختارهای الکتریکی پیشنهاد شده از نظر کارکرد بهینه و عملکرد سریع دارای محدودیت‌هایی هستند [۴]. در حوزه‌ی نوری نیز روش‌های متفاوتی برای طراحی و کنترل سوئیچ‌های نوری وجود دارد. یکی از این تکنیک‌ها شبیه‌سازی و پیاده‌سازی سوئیچ‌های نوری-حرارتی است که چندین نمونه از آن تاکنون گزارش شده است [۶-۵].

۱-۲- اهمیت مدارهای مجتمع نوری و سوئیچهای نوری

اگر بخواهیم توصیفی از روند توسعه‌ی فناوری معاصر داشته باشیم، می‌توان صنعت مکانیک را به عنوان زیر بنایی‌ترین و اولین رکن فناوری امروزی دانست. پس از آن پیشرفتهایی که در زمینه‌ی برق و مدارات الکتریکی صورت گرفت به عنوان مرحله‌ی دوم توسعه‌ی ادوات فنی نمایان گردید. با آغاز مرحله‌ی سوم که با اختراع ترانزیستور و به دنبال آن توسعه‌ی الکترونیک و مدارهای مجتمع[1] شکل گرفت این روند وارد مرحله‌ی جدیدی شد که توانایی، دقت و سرعت ادوات فنی در همه‌ی زمینه‌ها را به نحو چشمگیری افزایش داد. همچنین توسعه‌ی مدارهای مجتمع، خود مرحله‌ی چهارمی را به وجود آورد که آن هم دنیای نرم‌افزارها و فن‌آوری رایانه‌ها بود.

در کنار همه‌ی این‌ها صنعت اپتیک وابزارهای نوری تا قبل از اختراع لیزر نقش فرعی و تکمیلی را در صنعت ایفا می‌کرد و دارای هویت مستقلی نبوده است. ولی امروزه با ساخت ادوات فوتونیکی خاص و کاربردهای روز افزون لیزر شاهد پر رنگ‌تر شدن نقش این صنعت می‌باشیم. یکی از زمینه‌های بسیار مهم صنعت فوتونیک، مخابرات و انتقال اطلاعات با استفاده از نور می‌باشد. نور به دلیل فرکانس بالایی که دارد (۳×۱۰^{۱۴} Hz) قادر به ارسال اطلاعات با نرخ بیش از ۴۰ Gb/s می‌باشد. در صورتی که حداکثر نرخ ارسال اطلاعات به روشهای دیگر حدود ۱۰ Mb/s می‌باشد [۷]، لازم به ذکر است با مطالعاتی که در سالهای اخیر صورت گرفته این نرخ انتقال برای روشهای غیر از انتقال‌های نوری افزایش پیدا کرده ولی باز هم بسیار پایین تر از نرخ انتقال به روشهای نوری است. اولین گام مخابرات نوری، استفاده از فیبرنوری به جای کابلهای مسی برای ارسال داده‌ها بوده است. گامهای بعدی توسعه‌ی مخابرات نوری، جایگزینی دستگاههای تقویت کننده و سوئیچهای الکترونیکی با معادلهای فوتونیکی آنها می‌باشد.

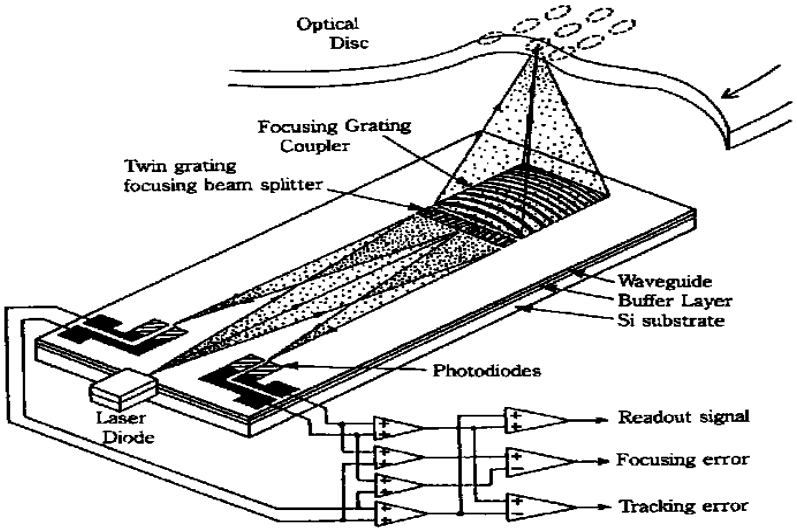
استفاده از ادوات الکترونیکی در مخابرات با سرعت بالا به دلیل محدودیت بسامد کاری این قطعات مشکل‌ساز خواهد بود. هر چه قدر عرض پالسهای نوری کمتر شود، نیاز به مدارهای الکترونیک پیچیده‌تر و گران قیمت‌تر افزایش می‌یابد. یک راه حل ساده‌تر و اقتصادی‌تر، آن است که علایم نوری را از یک نقطه از شبکه مخابراتی به هر نقطه‌ی دیگر به طریق کاملاً نوری انتقال دهیم و زمانی آنها را دوباره به علایم الکترونیکی تبدیل کنیم که بخواهیم در مقصد تحویل مدارات الکترونیک دهیم. انتقال کاملاً نوری بدین معناست که فرآیندهای تقویت، تقسیم توان، تفکیک طول موج و سوئیچ کردن را به صورت نوری و نه با واسطهای الکترونیکی انجام دهیم.

سوئیچ کردن از اعمال اساسی و غیرقابل اجتناب شبکه‌های مخابراتی است. همچنین اساس کامپیوترهای رقمی (دیجیتال) و ادوات پردازش سیگنال، عمل سوئیچ کردن می‌باشد. توسعه‌ی مخابرات فیبرنوری با قابلیت انتقال داده‌ها با نرخ ارسال بالا نیازمند ادوات پردازش سیگنال با ظرفیت و سرعت زیاد برای پردازش علایم نوری می‌باشد که آن هم مستلزم ساخت سوئیچهای نوری با سرعت بالا می‌باشد. به همین ترتیب اگر سوئیچها و گیتهای منطقی نوری و همچینین حافظه‌های بسیار سریع به وجود آیند می‌توان به ساخت و توسعه‌ی محاسبه‌گرهای فوق‌العاده سریع نوری امیداور بود. با تحقیقاتی که هم اکنون بر روی ساخت گیتها، مدارهای منطقی نوری و همچنین مطالعه بر روی فیبرهای نوری وجود دارد، ساخت پردازشگرهای نوری در آینده دور از انتظار نیست [۹-۸].

[1]- Integrated circuit

سوئیچهای نوری به منزله‌ی اولین گام برای گسترش مخابرات نوری و پردازشگرهای نوری می‌باشند. سوئیچهای تمام نوری[1]، یعنی سوئیچهایی که در آنها علاوه بر سیگنال سوئیچ شونده، سیگنال کنترل کننده هم نور می‌باشد نیز اهمیت مضاعفی دارند. زیرا این نوع سوئیچ به منزله‌ی ترانزیستور نوری می‌باشد. اگر یک سوئیچ تمام نوری مجتمع با ویژگیهای مطلوب همانند سرعت مناسب، توان مصرفی پایین و اندازه‌ی مناسب ساخته شود، در واقع اولین گام ساخت پردازش‌گرهای نوری برداشته شده است. تاکنون یک سوئیچ تمام نوری که همه‌ی ویژگیهای فوق را داشته باشد ساخته نشده است. مثلاً سوئیچهای تمام نوری مجتمع که با استفاده از آثار غیرخطی نورِ کنترل، عمل می کنند با وجود داشتن سرعت فوق‌العاده و اندازه‌ی مناسب، جهت ظهور آثار غیرخطی می‌بایست نورِ کنترل دارای شدت زیادی باشد.

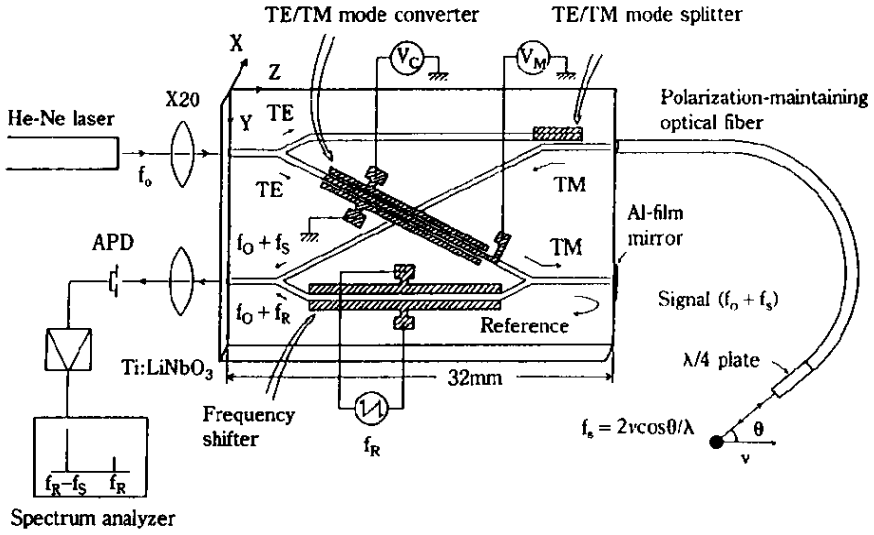
گذشته از سوئیچ نوری که به طور خاص مورد توجه است، سایر ادوات مجتمع نوری که بر اساس فناوری مدارهای مجتمع نوری[2] شکل می‌گیرد، می‌توانند جهت کاربردهای ویژه طراحی شوند. در یک مدار مجتمع نوری موجبر[3] و توری[4] بنیادی‌ترین اجزا می‌باشند. موجبرها که مسیرهای هدایت نور می‌باشند می‌توانند برای تقسیم توان نیز مورد استفاده قرار گیرند. توریها نیز که به صورت ساختارهای متناوب می‌باشند برای بازتابگر و پالایه (فیلتر) مورد استفاده قرار می گیرند. ترکیبی از موجبر و توری به علاوه‌ی الکترودهای فلزی و احتمالاً ساختارهای حفره مانند به عنوان کاواک، روی یک لایه‌ی نازکِ لایه نشانی شده بر زیر لایه‌ای به ابعاد چند سانتی‌متر مربع، یک مدار مجتمع نوری را به وجود می‌آورد. علاوه بر ساختارهای اساسی مانند قطبشگر، مدوله کننده و تزویجگرِ[5] مجتمع، مدارهای پیچیده‌تری برای کاربردهای خاص می‌توان طراحی کرد. به عنوان مثال شکل ۱-۱ یک دستگاه خواندن و ثبت اطلاعات بر CD را نشان می‌دهد که به طور مجتمع ساخته شده است [۱۰].



شکل ۱-۱- مدار مجتمع نوریِ سیستم نوشتن و خواندن CD.

[1]- All optical switch
[2]- Optical integrated circuit
[3]- Waveguide
[4]- Grating
[5]- Coupler

در شکل صفحه قبل، نور یک لیزر دیودی (LD) مستقیماً به لایه موجبر تزویج می‌شود و در انتهای موجبر توسط یک توری به بیرون از لایه‌ی موجبر و روی سطح CD هدایت می‌شود. نور بازگشتی نیز توسط همان توری به لایه‌ی نازک موجبر تزویج می‌شود. سپس توسط یک توری دیگر به دو دیود آشکار ساز مجتمع در لایه‌ی نازک می‌رسد. در این سیستم از مدارهای نوری با موجبرهای کانالی استفاده نشده است. شکل ۱-۲ یک نمونه‌ی پیچیده‌تر از مدارهای مجتمع نوری که با استفاده از مدارهای نوری طراحی شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- سیستم سرعت سنج لیزری مجتمع.

شکل فوق مدار یک سیستم اندازه‌گیری سرعت اجسام با استفاده از انتقال بسامد دوپلری[1] که به وسیله‌ی تزویج نور لیزر در یک مدار مجتمع نوری کار می‌کند را نشان می‌دهد.

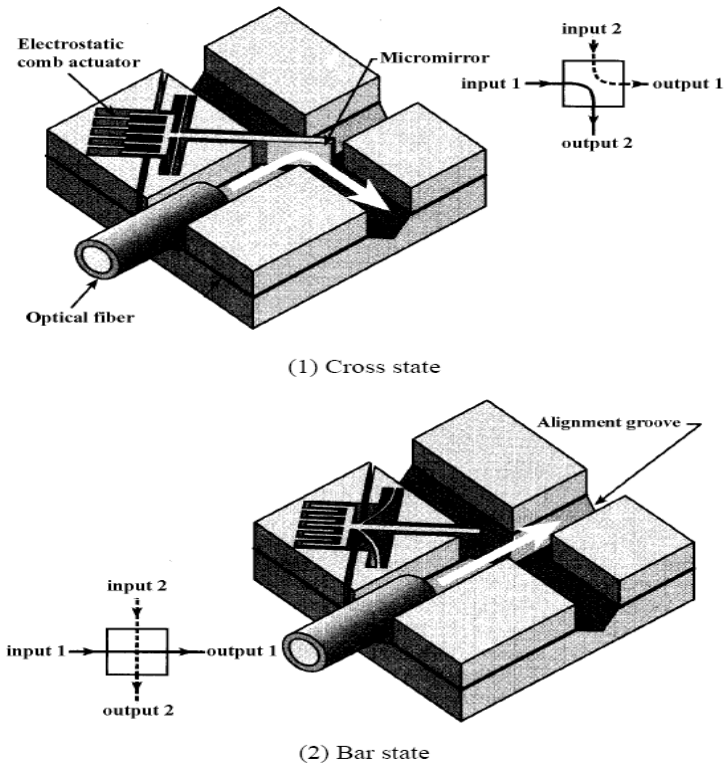
۱-۳- سوئیچهای نوری و انواع آن

در این قسمت مرور کوتاهی بر مشخصات و نحوه‌ی عملکرد انواع سوئیچهای نوری از جمله سوئیچ تمام نوری خواهیم داشت [۱۱]. مشخصات یک سوئیچ عبارتند از: زمان لازم برای سوئیچ کردن، انرژی لازم برای هر بار سوئیچ کردن، توان اتلافی سیگنال در سوئیچ، درصدی از توان سیگنال که به کانال دلخواه هدایت می‌شود یا عمق مدوله کردن، نفوذ نامطلوب توان به کانالهای دیگر و در نهایت ابعاد فیزیکی سوئیچ [۱۲].

به طور کلی سوئیچهای‌نوری را در پنج دسته‌ی سوئیچهای‌نوری مکانیکی، سوئیچهای الکترواپتیکی[2]، سوئیچهای آکوستواپتیکی[3]، سوئیچهای‌نوری مغناطیسی[4] و سوئیچهای‌تمام نوری معرفی می‌کنند.

---

[1]- Doppler shift
[2]- Electro- optic switch
[3]- Acoustico- optic switch
[4]- Magneto- optic switch



شکل ۱-۳- سوئیچ نوری مکانیکی با ابعاد میکرومتری.

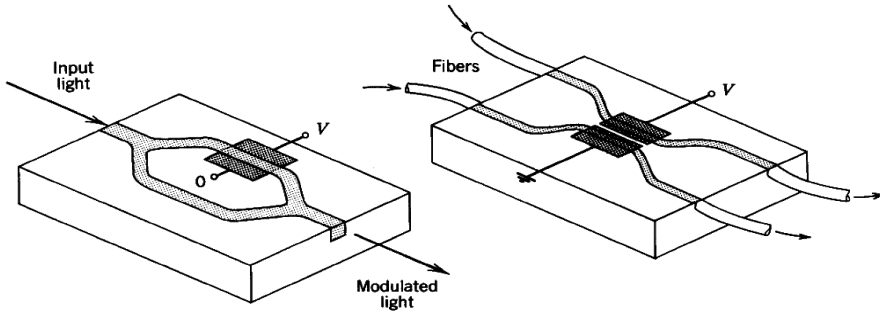
سوئیچهای مکانیکی معمولاً شامل آینه، منشور و یا یک توری متحرک برای تغییر مسیر نور می‌باشند. معمولاً از قطعات پیزوالکتریک[1] برای ایجاد حرکتهای سریع استفاده می‌شود. البته روشهای دیگری هم می‌تواند وجود داشته باشد، مثلاً سوئیچهایی که از حرکت جیوه در لوله‌های موئین استفاده می‌کنند و یا سوئیچهایی که مکان سر فیبر را در مقابل چند فیبر دیگر تغییر می‌دهند ساخته شده‌اند. در هر حال در اینجا بیشتر سوئیچهای قابل کاربرد در مدارهای مجتمع نوری مورد نظر است. سوئیچهای مکانیکی که این ویژگی را دارا هستند، سوئیچهای MEMS[2] هستند. شکل ۱-۳ یک نمونه از این سوئیچها را که با استفاده از یک آینه‌ی میکرومتری با حرکت کشویی کار می‌کند، نشان می‌دهد [۱۳].

در واقع سویئچهای MEMS سوئیچهای نوری با عملکرد مکانیکی هستند که ابعاد مکانیکی دارند. در مجموع سوئیچهای مکانیکی سرعت پایینی دارند (در حدود میلی ثانیه) ولی عمق مدولاسیون بالا و اتلاف کمی دارند.

دسته‌ی دوم سوئیچهای نوری که کاربرد بسیار بیشتری دارند، سوئیچهای الکترواپتیکی می‌باشند. این سوئیچها براساس تغییر ضریب شکست با اعمال ولتاژ کار می‌کنند و علاوه بر کاربردهایی مانند سوئیچ Q در لیزرها غالباً به صورت مدارهای مجتمع نوری قابل پیاده‌سازی می‌باشند. شکل ۱-۴ دو نمونه از سوئیچهای الکترواپتیک که به صورت ایجاد الکترود روی یکی از بازوهای یک تداخل سنج ماخ-زندر[3] و همچنین روی

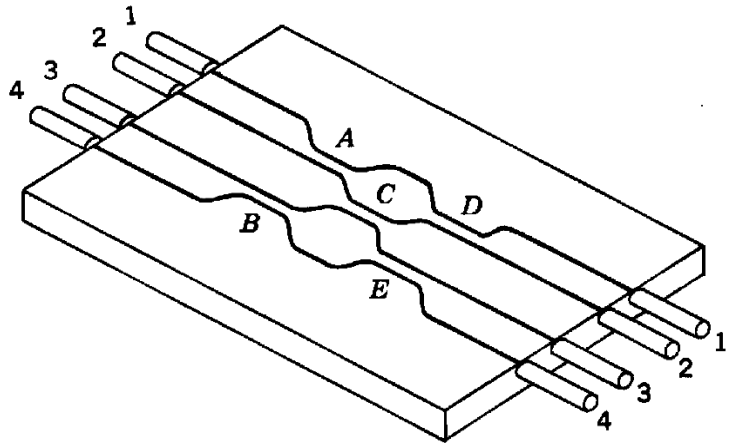
[1]- Piezoelectric
[2]- Micro- Electro- Mechanical system
[3]- Mach- Zehnder Interferometer

محل تزویج دو موجبر موازی در یک تزویج‌گر سمتی[1] ایجاد شده اند را نشان می‌دهد. این دو سوئیچهای ۱×۱ و ۲×۲ می‌باشد.



شکل ۱-۴- سوئیچهای الکترواپتیک.

شکل ۱-۵ یک سوئیچ ۴×۴ الکترواپتیک را که از ترکیب پنج سوئیچ ۲×۲ ساخته شده است را نشان می‌دهد. به همین ترتیب می‌توان سوئیچهای N×N الکترواپتیک را ساخت.



شکل ۱-۵- سوئیچ ۴×۴ الکترواپتیک.

گرچه سوئیچهای الکترواپتیک مزایایی چون قابلیت تطبیق و کنترل آسان با مدارهای الکترونیک و همچنین سرعتهای تا بیش از ۲۰GHz دارند ولی محدودیتهایی هم دارند. از جمله اینکه به دلیل لزوم طول معین ماخ-زندر و تزویج گر سمتی، تعداد زیادی از آنها را نمی‌توان در واحد سطح ایجاد کرد. به دلیل مستطیلی بودن سطح مقطع موجبرهای این ادوات، هنگام تزویج نور فیبر شاهد اتلاف زیادی خواهیم بود.

سوئیچهای اکوستواپتیکی نیز با روانه کردن موجهای صوتی در فیلمهای نازک، ساختارهای متناوب یا همان توریها را ایجاد می‌کنند و به وسیله‌ی آن نور را کنترل می‌کند. با تنظیم بسامد موج صوتی می‌توان سیگنال نوری را در جهت دلخواه سوئیچ کرد. سوئیچهای نوری مغناطیسی هم با استفاده از آثار مغناطیسی‌ای همچون اثر فاراده نور را سوئیچ می‌کنند. سرعت این سوئیچها تا حدود ns ۱۰۰ می‌باشد.

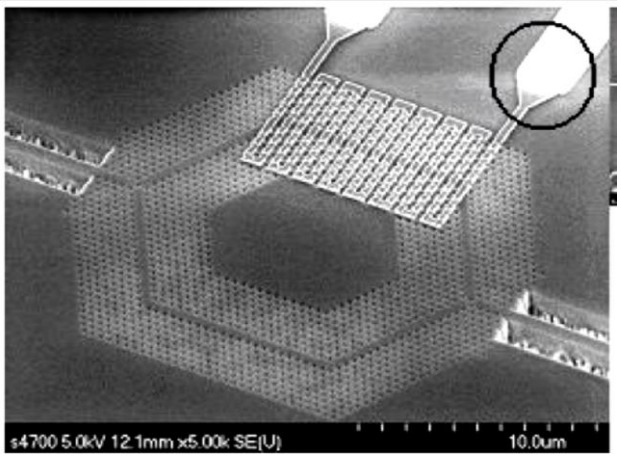
[1]- Directional coupler

سوئیچهای تمام نوری هم به طرق مختلف می‌توانند طراحی شوند. ولی اغلب سوئیچهای تمام نوری با استفاده از خاصیت غیرخطی مواد کار می‌کنند. عمل سوئیچ نور سیگنال می‌تواند توسط تغییر ضریب شکست یا تغییر ضریب جذب محیط به وسیله‌ی نور کنترل صورت گیرد. در واقع نور کنترل می‌تواند باعث تغییر شدت و یا تغییر مسیر نور سیگنال شود. به عنوان نمونه در یک تداخل سنج ماخ-زندر با تابش نور کنترل بر یک بازو می‌توان نور سیگنال را مدوله کرد.

سرعت سوئیچهای غیرخطی بسیار بالا می‌باشد به گونه‌ای که از لحاظ نظری به جز اصل عدم قطعیت انرژی-زمان، محدودیت دیگری برای مدت زمان هربار سوئیچ کردن وجود ندارد. ولی نمود آثار غیرخطی مستلزم انرژی بالایی می‌باشد که علاوه بر اتلاف توان مشکلات دیگری همچون دفع گرما را در پی دارد. برای خنک‌سازی سیستم سوئیچ کننده می‌بایست تعداد سوئیچها در واحد زمان را کاهش داد. به این ترتیب با وجود سرعت بالای هر بار سوئیچ یک محدودیت عملی برای نرخ تکرار سوئیچ ایجاد می‌شود. این مشکلات در مدارهای مجتمع نوری بیشتر نمایان می‌شود. مشکل دیگری که برای سیستم های مجتمع وجود دارد این است که روانه کردن نور با انرژی بالا در موجبرها و ادوات با ابعاد چند میکرون بسیار مشکل می‌باشد.

تاکنون تلاش شده است تا با ساخت مواد با ضریب غیرخطی بالا این مشکلات برطرف شود. همچنین با ساخت مشددها مانند مشددهای حلقه‌ای[1] در سیستم‌های مجتمع، برای امکان ایجاد شدت بالا تلاش شده است.

در ادامه چند نمونه از روش‌های ساخت سوئیچ‌های‌نوری که اساس ساختارشان تداخل سنج ماخ-زندر می‌باشد آورده شده است برای مثال در نمونه‌ای که در شکل ۱-۶ آمده است، ضریب شکست بازوی بالایی ماخ زندر توسط اعمال گرما تغییر می‌کند و شیفت فاز π درجه که برای سوئیچینگ مورد نیاز است به دست می‌آید. روش دیگر، استفاده از سوئیچ‌های الکترواپتیکی است که سرعت آنها توسط ولتاژ اعمالی محدود می‌شود [۱۵-۱۴]. مکانیسم عملکرد چنین سوئیچ‌هایی همانند آن‌چه که در شکل ۱-۷ آمده‌است به این صورت می‌باشد که با تغییر هدایت در منطقه‌ی تزویج بین دو موجبر و مدوله کردن ضریب تزویج سوئیچینگ اتفاق می‌افتد. تغییر هدایت به‌صورت الکتریکی با تزریق حامل و به‌صورت نوری با ایجاد ترکیب جفت الکترون-حفره ایجاد می‌شود.

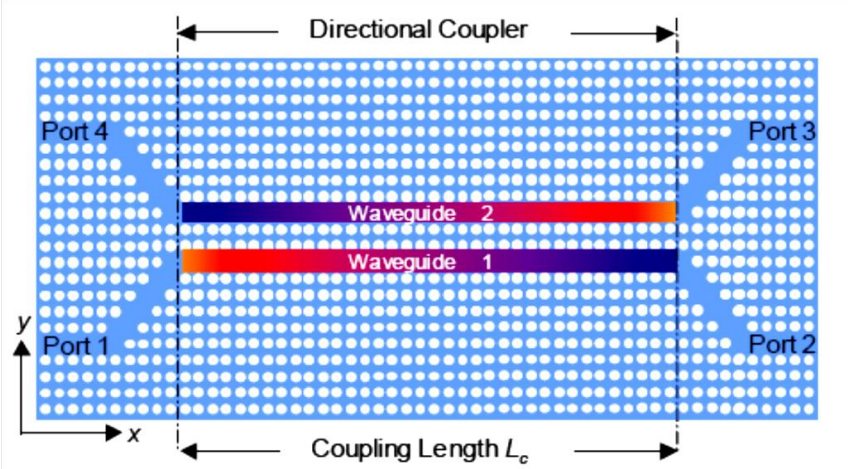


شکل ۱-۶- سوئیچ ماخ‌زندر حرارتی- نوری با بلور فوتونی [۱۵-۱۴].

[1]- Ring resonator

روش طراحی این نوع سوئیچ به این صورت است که وقتی دو موجبر تقریباً به هم نزدیک می‌شوند تزویجگر سمتی[1] را تشکیل می‌دهند و تحت شرایط مناسب موج الکترومغناطیسی که در یک موجبر حرکت می‌کند می‌تواند در موجبر نزدیک خودش کوپل شود. توان موج می‌تواند به طور پیوسته بین دو موجبر تاجایی که طول موجبر اجازه دهد مبادله شود. مبادله کامل توان نوری بین مدهایی امکان پذیر است که سرعت فاز و ثابت انتشار یکسان دارند. یکسان بودن ثابت انتشار که به عنوان سنکرون سازی فاز نیز شناخته می‌شود تنها وقتی اتفاق می‌افتد که دو موجبر ایده‌آل باشند، در این حالت تمام مدهای دو موجبر از نظر فاز سنکرون هستند و در تمام طول موج‌ها می‌توانند در یکدیگر کوپل شوند. وقتی این دو موجبر باهم ترکیب می‌شوند، یک موجبر عریض‌تر که تک مد نیست را ایجاد می‌کنند و به‌جای آن اکنون دو حل مد ویژه دارد. مد زوج (متقارن) و مد فرد (نامتقارن) که ثابت‌های انتشارشان کمی باهم متفاوت است و بنابراین سرعت‌های انتشار متفاوتی دارند. برای محاسبه طول تزویجی که نیاز است تا موج با یک طول موج خاص بتواند به طور کامل از یک موجبر به موجبر دیگر برود، در ابتدا باید وابستگی ثابت انتشار مد زوج و فرد به فرکانس مشخص شود. این طول تزویج برای مد فرد و مد زوج متفاوت خواهد بود. ثوابت انتشار مدهای زوج و فرد از روی نمودار پاشندگی موجبر محاسبه می‌شود و با توجه به آن ها طول تزویج محاسبه می‌شود.

$$L_c = \frac{\pi}{(\beta_e - \beta_o)} \qquad (۱-۱)$$

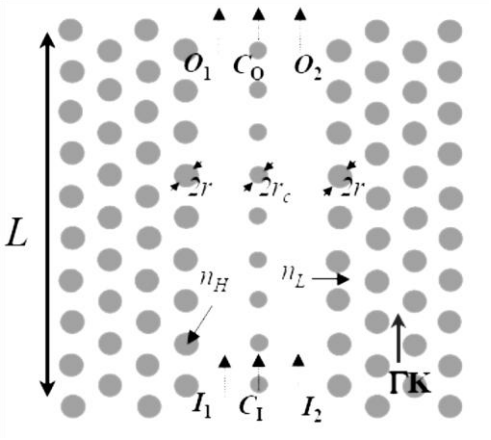


شکل ۱-۷- سوئیچ ماخزندر الکترواپتیکی در بلور فوتونی [۱۵-۱۴].

با تغییر هدایت الکتریکی این ثوابت و در نتیجه طول تزویج تغییر می‌کند و بنابراین با داشتن طول ثابت برای سوئیچ، صفر و یک ایجاد می‌شود.

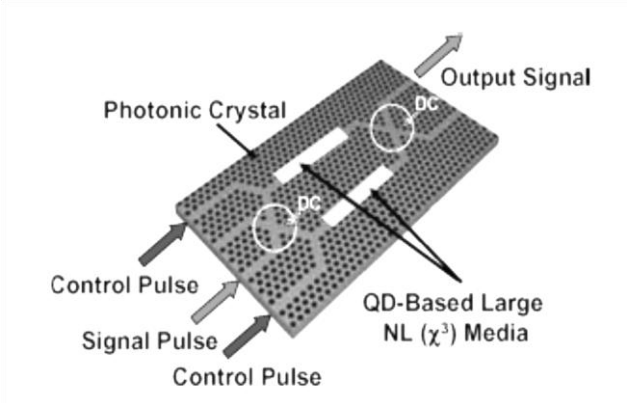
روش سوم، پیاده‌سازی ساختارهای سوئیچینگ بر اساس کوپلرهای هدایتی تمام‌نوری است که اکثر این ساختارها به دلیل داشتن طول تزویج بالا، توان مصرفی بالایی برای سیگنال کنترلی نیاز دارند. نمونه‌ای از آن در شکل ۱-۸ آمده است.

[1]-Directional coupler



شکل ۱-۸- سوئیچ تمام نوری مبتنی بر بلور فوتونی.

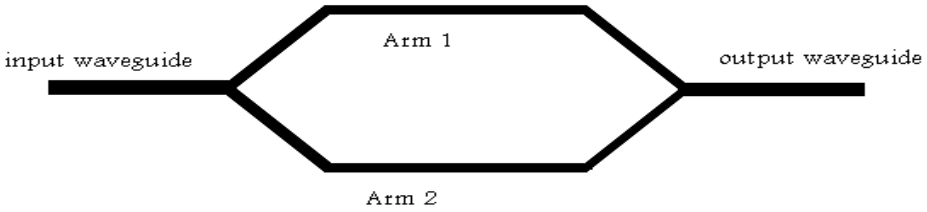
در این ساختار سوئیچینگ مناسب توسط اصلاح ضریب شکست منطقه تزویج بین دو موجبر توسط یک سیگنال کنترلی نوری که در منطقه وسطی محبوس شده است بدست می‌آید. در یک کوپلر هدایتی، نوری که در یک موجبر انتشار می یابد بعد از پیمودن طول تزویج به موجبر دیگر انتقال می‌یابد. به خاطر ثابت انتشارهای متفاوت مدهای زوج و فرد کوپلر، طول تزویج مستقیماً به ضریب تزویج (κ) که توانایی تزویج قطعه را مشخص می‌کند وابسته است و ضریب تزویج زیاد طول تزویج را کم می‌کند. مقدار κ، با تغییر شعاع میله‌های ردیف مرکزی بین دو موجبر و یا به طور کلی‌تر با تغییر ضریب شکست موثر منطقه بین دو موجبر، تغییر می‌کند. از این خاصیت برای اصلاح نوری منطقه بین دو موجبر و در نتیجه سوئیچ‌کردن سیگنال نوری بین دو خروجی کوپلر استفاده می‌شود. البته ساختارهایی با بلور فوتونی نیز گزارش شده‌اند که با استفاده از فرایند غیرخطی نوری به سرعت‌های بالایی دست یافته‌اند [۱۷-۱۶]. در سال‌های اخیر نیز ساختارهای نقطه کوانتومی به‌عنوان منبع ایجاد شیفت فاز غیر خطی در اکثر سوئیچ‌های نوری که بر اساس ماخ زندر متقارن ساخته می‌شوند استفاده شده‌است که نمونه آن در شکل ۱-۹ آمده‌است [۱۸].



شکل ۱-۹- سوئیچ ماخ‌زندر متقارن در بلور فوتونی با استفاده از اثرات غیرخطی [۱۸].

۱-۴- نحوه‌ی عملکرد سوئیچ ماخ‌زندر

ماخ‌زندر از معمولترین تداخل‌سنج هاست که نمایی از ساختار آن در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. تداخل‌سنج‌ها از مدارات نوری معمول هستند که از عناصر اصلی قطعات نوری دیگر مانند مدولاتورها، سوئیچ‌ها و فیلترها به حساب می‌آیند. در ابتدا میدان نوری را به موج‌بر ورودی اعمال می‌کنیم (نور با قطبش TE). فرض می‌کنیم جدا کننده[1] در ورودی ماخ‌زندر نور را از نظر شدت به دو قسمت مساوی در بازوهای ۱و ۲ تقسیم می‌کند. فرض شده است که میدان‌ها دامنه‌های برابر و ثوابت انتشار متفاوت دارند. این دو موج در بازوهای تداخل‌سنج انتشار می‌یابند و در خروجی با هم ترکیب می‌شوند. بعد ازترکیب، این دو موج به دلیل ثوابت انتشار متفاوت و در نتیجه طول‌های متفاوت مسیرهای نوری در بازوها، دیگر هم فاز باقی نمی‌مانند.



شکل ۱-۱۰- نمایی از ساختار یک تداخل‌سنج ماخ‌زندر مرسوم.

$$E_1 = E_0 \sin(\omega t - \beta_1 z) \qquad (۱-۲)$$

$$E_2 = E_0 \sin(\omega t - \beta_2 z) \qquad (۱-۳)$$

وقتی فرکانس نور بالا باشد تنها میانگین زمانی موج (S_T) دیده می‌شود.

$$S_T = [(E_1 + E_2) \times (H_1 + H_2)] = S_0 (E_1 + E_2)^2$$
$$= S_0 \{E_0^{\,2} [1 + \cos(\beta_2 L_2 - \beta_1 L_1)]\} \qquad (۱-۴)$$

در معادلات بالا L_1 و L_2 طول بازوها و β_1 و β_2 ثوابت انتشار نور در آن‌ها هستند. از معادله‌ی (۱-۴) می‌توان دریافت که اگر دو بازوی تداخل‌سنج، موج‌برهای ایده‌آل باشند و بنابراین ثوابت انتشار ایده‌آل داشته باشند تابع انتقال بیشینه خواهد شد یعنی (L_2-L_1) ایجاد تفاوت فاز مضرب 2π می‌کند و اگر تفاوت فاز مضرب فرد π شود انتقال کمینه خواهد شد بنابراین خروجی ماخ‌زندر می تواند صفر یا یک شود. این‌کار با گذاشتن مدولاتور فاز در یکی از بازوهای تداخل‌سنج انجام می گیرد. به این معنا که برای ایجاد تفاوت فاز باید طول مسیر نوری را در یکی از بازوها به نحوی تغییر داد. در ساختارهایی که در قبل ارائه شده این کار توسط اعمال گرما [۱۳] و استفاده از ساختارهای غیرخطی [۱۸] انجام شده است.

هندسه‌ی سوئیچ‌های ماخ‌زندر به‌طور طبیعی پهنای باند کاری بالایی را در اختیار کاربر می‌گذارد ولی به‌دلیل وجود خمیدگی‌ها و اثرات رزونانسی نور با بازوی ایجادکننده‌ی شیفت فاز این پهنای باند کاهش می‌یابد. از

[1]- Splitter

طرفی در این سوئیچ‌ها مصالحه‌ای بین طول و شیفت فاز وجود دارد که با در نظر گرفتن مصالحه‌ی بین طول و توان که در تمامی سوئیچ‌های نوری وجود دارد، باید پارامترهای طول، توان و پهنای باند که مشخص کننده‌ی سرعت سوئیچ است را باید به صورت مناسب بدست آورد. در حقیقت باید بین پارامترهای فیزیکی و عملکرد سوئیچ حالت بهینه را به‌دست آورد.