به نام خدایی که در این نزدیکی است

دانشکده علوم پایه

پایان نامه کارشناسی ارشد

فوتونیک

شبیه سازی انتشار امواج نوری در سوئیچ‌های نوری با روش انتشار پرتو

از

سمیه فتاحی

استاد راهنما

دکتر حمید رضا مشایخی

خرداد ۱۳۸۹

دانشکده علوم پایه

پایان نامه کارشناسی ارشد

فوتونیک

شبیه سازی انتشار امواج نوری در سوئیچ‌های نوری با روش انتشار پرتو

از

سمیه فتاحی

استاد راهنما

دکتر حمید رضا مشایخی

خرداد ۱۳۸۹

نهال را باران باید تا بشوید غبار نشسته بر برگهایش و سیرابش کند از آب حیات

و آفتاب باید تا بتاباند نیرورا و محکم کند شاخه های تازه روییده را

به نام مادر

بوسه ای باید زد دست هایی را می شویند غبار خستگی روزگار را و سیراب می کنند روح تشنه را

به نام پدر

بوسه ای باید زد دست هایی را که می تابانند نیرورا و محکم می کنند استواری پایه های زیستن را

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

و تقدیم به

کسی که به من امید، شجاعت و عشق داد.

توفیق دادار بزرگ اگر رفیق نمی بود، این کار رنگ بودن نمی گرفت. او را به سبب این توفیق و همه توفیق ها شکر می نهم.

بر خود لازم می دانم که از استاد ارجمندم جناب دکتر حمید رضا شایخی که بحق کار علمی و اخلاق متعالی ایشان بر کسی پوشیده نیست، کمال قدردانی را در به انجام رساندن این پروژه داشته باشم. از سروران ارجمندم جناب دکتر سعید باطبی و جناب دکتر سید محمد روضاتی که در سمت اساتید ممتحن زحمت مطالعه پایان نامه را تقبل نمودند کمال سپاس گذاری را دارم. بدون ابراز سپاس از پدر و مادر و خانواده ام نیز نمی توان بر این سطور نقطه پایان گذاشت. روزگارشان خوش و وجودشان آزرده گزند مباد. همچنین مایلم حق شناسی خود را به دوستان و تمام کسانی که در به انجام رسیدن این پروژه سهمی داشته اند، ارائه نموده و تشکر نمایم.

در پایان از پدر و مادر و خانواده ام کمال عذر خواهی را دارم که با حوصله تمام کار و پروژه پر مشقت مرا تحمل کردند.

برای همگان از خداوند بزرگ قدرت و موفقیت بیشتر را مسئلت می کنم.

تهران

خرداد ۱۳۸۹

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده فارسی	خ
چکیده انگلیسی	د
مقدمه	۱
فصل ۱ فوتونیک مجتمع	**٤**
۱-۱ مقدمه‌ای بر فوتونیک مجتمع	۵
۱-۱-۱ تاریخچه مختصری از فوتونیک مجتمع	۸
۱-۲ سوئیچینگ نوری	۱۱
۱-۲-۱ سوئیچینگ نوری در مقابل سوئیچینگ فوتونیکی	۱۲
۱-۲-۲ تکنولوژی‌های سوئیچ نوری	۱٤
۱-۲-۳ ادوات سوئیچینگ نوری	۱۵
۱-۳ برتری‌های فوتونیک مجتمع	۱٦
فصل ۲ روش انتشار باریکه	**۱۹**
۲-۱ انتخاب روش عددی برای BPM	۲۰
۲-۱-۱ روش انتشار پرتو بر پایه تبدیلات سریع فوریه (FFT_BPM)	۲۰
۲-۱-۲ روش انتشار پرتو بر اساس تفاضل محدود (FD_BPM)	۲۱
۲-۲ فرمول‌بندی تحلیلی FD_BPM	۲۱
۲-۲-۱ FD_BPM دو بعدی	۲۲
۲-۳ مزایا و محدودیت‌های روش انتشار پرتو	۲٤
۲-٤ شرایط مرزی عددی	۲٦
۲-٤-۱ شرایط مرزی شفاف (TBC)	۲۸
فصل ۳ شبیه‌سازی انتشار نور در فیبر نوری خمیده و تفکیک‌کننده توان ۲×۱	**۳۱**
۳-۱ شبیه‌سازی انتشار مد پایه در یک تقسیم‌کننده توان ۲×۱	۳۲
۳-۱-۱ شبیه‌سازی انتشار مد پایه در یک Y-branch	۳۲
۳-۲ شبیه‌سازی دو بعدی یک فیبر خمیده سینوسی به روش FD_BPM	۳۷
۳-۲-۱ توان نسبی در طول انتشار	۳۸
۳-۲-۲ هم‌پوشانی توان	۳۹
۳-۲-۳ توان در فیبر	٤۰

۳-۳ شبیه‌سازی دو بعدی یک فیبر خمیده کسینوسی به روش FD_BPM ٤١
٤-۳ نتایج ٤٤

فصل ٤ سوئیچینگ الکترواپتیکی ٤٦
٤-١ مشخصات لیتیوم نیوبایت ٤٩
٤-٢ تولید ادوات سوئیچ الکترواپتیک لیتیوم نیوبایت ٥١
٤-٣ سوئیچینگ الکترواپتیکی ٥٨
٤-٣-١ سوئیچ الکترواپتیکی ماخ-زندر (Mach-Zehnder) ٥٩
٤-٤ شبیه‌سازی دو بعدی یک سوئیچ الکترواپتیک ماخ-زندر به روش FD_BPM ٦٤
٤-٤-١ نتایج شبیه‌سازی ماخ-زندر ٦٥
٤-٤-٢ تحلیل نتایج شبیه‌سازی ٦٩
٤-٤-٣ بررسی انتشار در طول‌موج‌های مختلف ٧٣

فصل ٥ نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای ادامه کار ٧٦
٥-١ نتیجه‌گیری ٧٧
٥-٢ پیشنهاد برای ادامه کار ٧٨

پیوست ٨٠
مراجع ٨٩

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱ نمایش ارتباط حوزه‌های مختلف با فوتونیک مجتمع. ۷

شکل ۱-۲ نمایش ساختار اولیه موجبر: (الف) فیبر اپتیکی (ب) موجبر کانالی (پ) موجبر صفحه‌ای. ۱۱

شکل ۱-۳ ادوات تداخل‌سنجی. ۱۵

شکل ۱-٤ ادوات دیجیتال. ۱٦

شکل ۱-۲ سه رویه مورد کاربرد در شبیه‌سازی انتشار نور بر اساس تفاضل محدود (الف): ForwardیاFully explicit، دقت مرتبه اول دارد و فقط برای گام‌های انتشار کوچک پایدار است. (ب): BackwardیاFully implicit، برای گام‌های انتشار بزرگ دلخواه پایدار است ولی دقت مرتبه اول دارد. (ج): کرانک نیکلسون، دقت مرتبه دوم دارد و برای گام‌های انتشار بلند پایدار است. ۲٦

شکل ۲-۲ شرط مرزی شفاف یک بعدی. ۲۸

شکل ۳-۱ سوئیچ $Y-branch$. ۳۲

شکل ۳-۲ مد پایه منتشره در $Y-branch$. ۳۳

شکل ۳-۳ نمایش ضریب شکست در قطعه $Y-branch$. ۳٤

شکل ۳-٤ انتشار مد در $Y-branch$ به طول μm ٦۰۰۰ در طول موج μm ۱/۳. ۳٤

شکل ۳-۵ توان در طول انتشار مد پایه در $Y-branch$ ، (الف) بدون اتلاف، (ب) با اتلاف. ۳۵

شکل ۳-٦ تغییرات توان خروجی برحسب زاویه $Y-branch$ با محور z. ۳۵

شکل ۳-۷ توان مد پایه در یک سوئیچ $Y-branch$با شاخه‌های متفاوت. ۳٦

شکل ۳-۸ تغییرات توان خروجی برحسب طول موج. ۳٦

شکل ۳-۹ انتشار یک مد پایه LP_{01} با پلاریزاسیون TE در فیبر خمیده سینوسی. ۳۷

شکل ۳-۱۰ پروفایل ضریب شکست در فیبر خمیده سینوسی. ۳۸

شکل ۳-۱۱ توان نسبی در طول انتشار mm ٦ در فیبر خمیده سینوسی. ۳۹

شکل ۳-۱۲ انتگرال هم‌پوشانی توان با میدان مد پایه در طول انتشار در فیبر خمیده سینوسی. ٤۰

شکل ۳-۱۳ توان در فیبر خمیده سینوسی. ٤۰

شکل ۳-۱٤ نمایی از تطابق میدان و ضریب شکست در طول انتشار در فیبر خمیده سینوسی. ٤۱

شکل ۳-۱۵ پروفایل ضریب شکست در فیبر خمیده کسینوسی. ٤۱

شکل ۳-۱٦ انتشار یک مد پایه LP_{01} با پلاریزاسیون TEرا در فیبر خمیده کسینوسی. ٤۲

شکل ۳-۱۷ توان نسبی در طول انتشار mm ٦ در فیبر خمیده کسینوسی. ٤۲

شکل ۳-۱۸ توان در فیبر خمیده کسینوسی. ٤۳

شکل ۳-۱۹ انتگرال هم‌پوشانی توان با میدان مد پایه در طول انتشار در فیبر خمیده کسینوسی. ٤۳

شکل ۳-۲۰ نمایی از تطابق میدان و ضریب شکست در طول انتشار در فیبر خمیده کسینوسی. ٤٣
شکل ۳-۲۱ مقایسه توان نسبی انتشار در فیبر خمیده سینوسی و کسینوسی. ٤٤
شکل ۳-۲۲ مقایسه همپوشانی توان در فیبر خمیده سینوسی و کسینوسی در طول انتشار $٦mm$. ٤٤
شکل ۳-۲۳ مقایسه توان در فیبر خمیده سینوسی و کسینوسی در طول انتشار $٦mm$. ٤٤
شکل ٤-۱ اثر الکترواپتیک. ٤٧
شکل ٤-۲ وابستگی ضریب شکست به میدان الکتریکی(الف) محیط $Kerr$. (ب) محیط $Pockels$. ٤٨
شکل ٤-۳ ساختار کریستالی لیتیوم نیوبایت. ٤٩
شکل ٤-٤ تغییرات ضریب شکست کریستال لیتیوم نیوبایت با طول موج. ٥٠
شکل ٤-٥ ساختار الکترود. ٥١
شکل ٤-٦ تولید قطعه LN. ٥٢
شکل ٤-۷ ساختار الکترود در سوئیچ الکترواپتیک ماخ-زندر. ٥٦
شکل ٤-۸ حالت‌های مستقیم و ضربدری سوئیچینگ. ٥٨
شکل ٤-۹ اساس عملکرد ماخ-زندر. ٦٠
شکل ٤-۱۰ تداخل‌سنج اپتیکی ماخ-زندر. ٦٢
شکل ٤-۱۱ ساختار سوئیچ الکترواپتیک ماخ-زندر. ٦٤
شکل ٤-۱۲ ضریب‌شکست ساختار سوئیچ الکترواپتیک ماخ -زندر. ٦٤
شکل ٤-۱۳ اندازه میدان الکتریکی در خروجی موجبرها در ولتاژهای مختلف. ٦٧
شکل ٤-۱٤ چگونگی تغییرات خروجی موجبر پایین در ولتاژهای مختلف. ٦٧
شکل ٤-۱٥ توان نسبی در طول انتشار در ولتاژهای مختلف. ٦٨
شکل ٤-۱٦ منحنی سوئیچینگ در یک سوئیچ الکترواپتیک ماخ-زندر. ٦٩
شکل ٤-۱۷ میدان در خروجی اولین کوپلردر $V = ٠/٠$. ٦٩
شکل ٤-۱۸ خروجی کوپلر ورودی در$V = ٠/٠$. ٧٠
شکل ٤-۱۹ میدان کوپلر خروجی در $V = ٠/٠$. ٧١
شکل ٤-۲۰ حالت ضربدری سوئیچینگ در $V = ٠/٠$. ٧١
شکل ٤-۲۱ میدان در ورودی کوپلر خروجی بعد از عبور از ناحیه سوئیچینگ. ٧٢
شکل ٤-۲۲ میدان در کوپلر خروجی در $V = ٦/٧٥$. ٧٢
شکل ٤-۲۳ حالت مستقیم سوئیچینگ در$V = ٦/٧٥$. ٧٣
شکل ٤-۲۳ بررسی انتشار نور در ولتاژ ٦/٤ در طول‌موج الف) ۱/٥٥ ب) ۱/۳٥ ج) ۱/۱٥ د) ۰/۹٥ ه) ۰/۷٥ میکرومتر. ٧٤

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول ۱-۱ ضرایب شکست مواد در تکنولوژی فوتونیک مجتمع. ۱۰

جدول ۳-۱ مشخصات قطعه تقسیم‌کننده توان ۲×۱. ۳۳

جدول ٤-۱ ضرایب الکترواپتیک خطی باتوجه به برش کریستال و پلایزاسیون نور. ۵۳

جدول ٤-۲ مشخصات کریستال $LiNbO_3$ در این شبیه‌سازی . ۵۵

جدول ٤-۳ مشخصات $Ti:LiNbO_3$ در این شبیه‌سازی. ۵۵

جدول ٤-٤ مشخصات ساختار الکترود در سوئیچ الکترواپتیک ماخ-زندر در این شبیه‌سازی . ۵۷

جدول ٤-۵ ضریب‌شکست‌غیرعادی کریستال لیتیوم‌نیوبایت در طول موج‌های مختلف. ۷۳

چکیده

شبیه سازی انتشار امواج نوری در سوئیچ‌های نوری با روش انتشار پرتوBPM

سمیه فتاحی

انتقال سوئیچینگ به حوزه نوری برای شبکه‌های ارتباطی مزایای چشمگیری به همراه داشته است. بالا بردن ظرفیت حمل اطلاعات شبکه به سطحی ورای آنچه با سوئیچ‌های الکترونیکی قابل دستیابی بود، از مزایای آن است. بدین سبب شناخت حوزه فوتونیک مجتمع و تکنولوژی‌های آن، از جمله تکنولوژی سوئیچینگ در راس اهداف این پروژه قرارگرفت. با توجه به اهمیت روش عددی در شبیه‌سازی، روش عددی انتشار پرتو بر اساس تفاضل محدود انتخاب و در پی آن شبیه‌سازی چند سوئیچ فوتونیکی از جمله یک تفکیک‌کننده توان ۲×۱، شبیه‌سازی و مقایسه دو فیبر خمیده سینوسی و کسینوسی انجام شده است. در نتیجه پیشرفت‌های جدید در حوزه اپتیک، حوزه‌های جدیدی مثل الکترواپتیک ظاهر شدند که ادوات اپتیکی را مطالعه می‌کند که در آنها، برهم کنش الکتریکی در کنترل شار نور نقشی ایفا می‌کند. در این راستا با شبیه سازی یک سوئیچ الکترواپتیک که روی زیربنای لیتیوم نیوبایت، کاشت شده است، تاثیر پارامترهای مختلف در اثر الکترواپتیکی، تغییر ضریب شکست در اثر EO، ناشی ازاعمال یک میدان، مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه: روش انتشار پرتو ، انتشار نور، سوئیچ‌های نوری، اثر الکترواپتیک.

مقدمه

امروزه، ارتباطات از راه دور نقش حیاتی در جهان ما ایفا می‌کنند و این ایفای نقش تا مادامی که ما به ارتباط با یکدیگر نیاز داریم، ادامه خواهد داشت. اساس ساختار شبکه‌های ارتباطی، پایانه‌ها و رابط‌های مخابراتی و مراکز سوئیچینگ می‌باشند. سوئیچینگ نوری اساس ساختار شبکه‌های ارتباطی آینده است به طوری‌که بخش بنیادین حل درازمدت بسیاری از مشکلات شبکه می‌باشد. بدون شک، شایستگی سوئیچ نوری به محض کامل‌شدن تکنولوژی‌اش، انگیزه قوی برای بهره برداری گسترده از آن در آینده فراهم خواهد کرد.

دانشمندان، قرن نوزدهم را به عنوان دوران الکترونیک می‌شناختند و قرن بیستم را عصر فوتونیک خواندند. در عصر حاضر، کوچک‌کردن مولفه‌های اپتیکی نقش مهمی در موفقیت ادوات فوتونیک پیشرفته مبتنی بر موجبرها ایفا خواهد کرد. با آغاز فوتونیک مجتمع، تکنولوژی‌های بسیاری در تولید موجبر ارایه گردید و برای تشکیل موجبرهای اپتیکی مختلف روی یک تنوعی از زیرلایه‌ها، مورد استفاده قرار گرفت. مفهوم فوتونیک مجتمع شامل درک ادوات اپتیکی و الکترواپتیکی می‌باشد که به تعداد زیادی روی یک زیرلایه منفرد ساخته می‌شوند. گوناگونی کاربرد ادوات فوتونیکی مجتمع، محققان را به بررسی دقیق تعداد زیادی از موجبرها و همچنین ماده سازنده زیرلایه آنها جلب کرده است.

اهداف این پروژه را می‌توان این‌گونه خلاصه کرد:

- شناخت حوزه فوتونیک مجتمع و تکنولوژی‌های آن، از جمله تکنولوژی سوئیچینگ.
- معرفی روش عددی مناسب برای حل عددی معادله هلمهولتز وتحلیل و شبیه‌سازی انتشار نور.
- شبیه‌سازی انتشار نور در دو نوع فیبر نوری خمیده S شکل سینوسی و کسینوسی.
- شبیه‌سازی انتشار نور در ساده‌ترین قطعه سوئیچینگ ،Y branch.
- آشنایی با زیرلایه مناسب برای تولید ادوات الکترواپتیکی و مطالعه اثرالکترواپتیک بر یک سوئیچ الکترواپتیک.

شبیه‌سازی‌ها با نرم افزارهای MATLAB و OPTIWAVE و RSOFT PHOTONICS انجام شده است.

با توجه به اهداف ذکرشده فوق، این پایان‌نامه دربرگیرنده ۵ فصل می‌باشد:

فصل اول به ارائه مشخصات اصلی فوتونیک مجتمع اختصاص دارد و پیرامون ادوات نوری و تکنولوژی سوئیچ نوری بحث می‌کند.

فصل دوم به بررسی روشهای عددی برای تحلیل و شبیه‌سازی انتشار پرتو می‌پردازد. در این فصل، روش BPM به عنوان یک روش بسیار کارآمد معرفی و چگونگی استفاده از شرایط مرزی در این روش توضیح داده شده است.

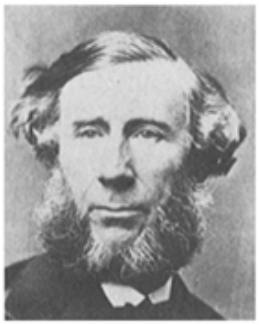
فصل سوم، شبیه‌سازی یک تفکیک‌کننده توان ۲×۱ با استفاده از نرم‌افزار Rsoft و سپس شبیه‌سازی و مقایسه دو فیبر خمیده سینوسی و کسینوسی با استفاده از نرم‌افزار Optiwave و Mat lab ارایه گردیده است. البته برنامه Mat lab این ادوات اپتیکی در پیوست مطالب گنجانده شده است. در این فصل وابستگی توان به ماده دارای اتلاف، زاویه Y branch با محور z وهمچنین تفکیک‌کننده‌های غیرمتقارن مورد بررسی واقع شده‌اند.

فصل چهارم با معرفی کریستال الکترواپتیک لیتیوم نیوبایت آغاز شده و سپس با شبیه‌سازی یک سوئیچ الکترواپتیکی ماخ–زندر با زیرساختار لیتیوم نیوبایت و تاثیر پارامترهای مختلف در اثر الکترواپتیکی ادامه می‌یابد. این شبیه‌سازی نیز با استفاده از نرم‌افزار Optiwave انجام گرفته است.

نتیجه و پیشنهادات برای ادامه کار در فصل پنجم در دسترس می‌باشند.

فصل ۱

فوتونیک مجتمع



John Tyndall (1820–1893)

اولین کسی بود که بازتابش داخلی کلی را شرح داد که اساس اپتیک هدایت موج است .

۱-۱ مقدمه‌ای بر فوتونیک مجتمع

کلمه فوتونیک مجتمع[۱] به تولید و به‌هم‌پیوستن چندین مولفه فوتونیکی روی یک زیرساختار صفحه‌ای معمولی اشاره دارد. این مولفه‌ها شامل شکاف‌دهنده‌های باریکه[۲]، توری‌ها[۳]، جفت‌گرها[۴]، پلاریزورها[۵]، تداخل‌سنج‌ها[۶]، منابع[۷] و آشکارسازها[۸]، و... می‌باشند.

موجبرهای اپتیکی عنصر کلیدی ادوات فوتونیک مجتمع هستند که نه تنها هدایت سیگنال را انجام می‌دهند، که تزویج[۹]، سوییچینگ[۱۰]، شکاف دهندگی[۱۱]، مولتی پلکسینگ[۱۲] و دی مولتی پلکسینگ[۱۳] سیگنال را هم انجام می‌دهند.

اپتیک می‌تواند به عنوان شاخه‌ای از علم فیزیک تعریف گردد که با تولید و هدایت نور و برهم‌کنش آن با ماده سروکار دارد. در طول ربع قرن گذشته، علم اپتیک به واسطه پیشرفت‌های کلیدی مختلف یک رنسانس غیرعادی را متحمل شده است. بدون شک، اولین واقعه انقلابی در اپتیک مدرن، اختراع لیزر توسط T.H.Maiman در سال ۱۹۶۰ در Research Laboratories Hughes در Malibo بود[۱]. دومین گام رو به جلوی مهم، گسترش ادوات اپتیکی نیم‌رسانا برای تولید و آشکارسازی نور بود، و آخرین گام، با ارائه یک تکنیک جدید تولید برای دستیابی به فیبرهای اپتیکی ارزان با اتلاف انتشار بسیار پایین، اتفاق افتاده است.

---

[۱] Integrated Photonics.
[۲] Beam Splitters.
[۳] Gratings.
[۴] Couplers.
[۵] Polarisers.
[۶] Interferometers.
[۷] Sources.
[۸] Detectors.
[۹] Coupling.
[۱۰] Switching.
[۱۱] Splitting.
[۱۲] Multiplexing.
[۱۳] Demultiplexing.

در نتیجه این پیشرفت‌های جدید و پیوستن با دیگر فناوری‌ها مثل الکترواپتیک، حوزه‌های جدیدی در رابطه با اپتیک ظاهر شدند: الکترواپتیک، اپتوالکترونیک، کوانتوم الکترونیک، تکنولوژی موجبر و.... . بنابراین اپتیک کلاسیک، که در ابتدا با لنزها، آینه‌ها و فیلترها سروکار داشت، وادار به توصیف خانواده جدیدی از ادوات مرکب‌تر مثل لیزرها، آشکارسازهای نیم رسانا، مدولاتورهای نور، و.... شد. عملکرد این ادوات باید برحسب اپتیک و الکترونیک توضیح داده شود که یک زمینه ترکیبی به نام فوتونیک به وجود می‌آورد. این حوزه جدید بر نقش رو به افزایش الکترونیک که در ادوات اپتیکی ایفا می‌کند، تاکید دارد.

اگر الکترونیک می‌تواند حوزه‌ای در نظر گرفته شود که شار الکترون‌ها را توضیح دهد، فوتونیک بر کنترل فوتون دلالت می‌کند. با این وجود، این دو حوزه به وضوح در بسیاری از حالات هم‌پوشانی دارند، زیرا فوتون‌ها می‌توانند شار الکترون‌ها را کنترل کنند، برای مثال در آشکارسازها، و الکترون‌ها خودشان می‌توانند خواص انتشار نور را معین کنند، در لیزرهای نیم رسانا یا مدولاتورهای اپتیکی.

این حوزه جدید دربرگیرنده الکترواپتیک[۱]، اپتوالکترونیک[۲]، کوانتوم اپتیک[۳]، کوانتوم الکترونیک[۴]و اپتیک غیرخطی[۵]و.... است. الکترواپتیک، ادوات اپتیکی را مطالعه می‌کند که در آنها برهم‌کنش الکتریکی نقشی در کنترل شار نور ایفا می‌کند مثل مدولاتورهای الکترواپتیک یا انواع خاصی از لیزرها. اکوستواپتیک علم و فناوری است که مربوط به ادوات اپتیکی است که با امواج صوتی کنترل می‌شوند. سیستم‌هایی که شامل نور هستند اما اساسا الکترونیکی هستند تحت عنوان اپتوالکترونیک می‌باشند، این ادوات در بیشتر حالت‌ها ادوات نیمه‌هادی مثل دیودهای نور گسیلی[۶]، لیزرهای نیم رسانا و فوتودایودها هستند. کلمه الکترونیک کوانتومی در ارتباط با ادوات و سیستم‌هایی است که مبتنی بر برهم‌کنش بین نور و ماده هستند مثل تقویت کننده‌های نوری. طبیعت کوانتومی نور و خواص همدوسی آن در اپتیک کوانتومی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. حوزه‌ای که شامل پاسخ‌های غیرخطی محیط اپتیکی می‌باشد تحت عنوان اپتیک غیرخطی پوشش داده می‌شود. در نهایت چندین حوزه

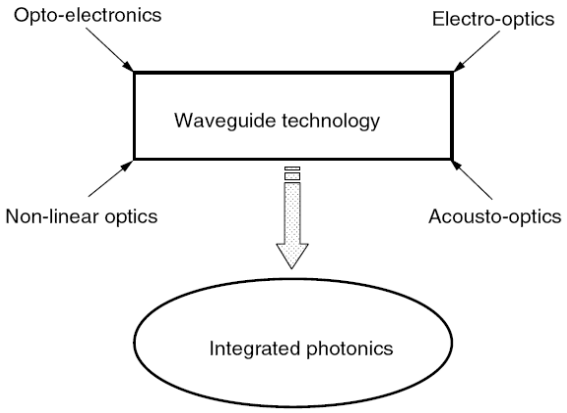
---

[۱] Electro-Optics.
[۲] Opto-Electronics.
[۳] Quantum Optics.
[۴] Quantum Electronics.
[۵] Non-linear Optics.
[۶] Light-Emitting Diodes (LEDs).

کاربردی دیگر در این زمینه سربرمی‌آورند که شامل مخابرات نوری[۱]، محاسبات اپتیکی[۲]، حسگرهای اپتیکی[۳]، سیستم‌های تصویر و نمایش[۴] و....می‌باشند. به ویژه، لغت تکنولوژی موجبر برای تشریح ادوات و سیستم‌هایی استعمال می‌شود که به طور طور گسترده در مخابرات نوری و هم‌چنین در محاسبات اپتیکی و پردازش نوری و حسگرهای نوری به کار گرفته می‌شوند.

یک مثال روشن از شاخه اپتیک که برخی حوزه‌های بالا را ترکیب می‌کند، حوزه‌ای است به نام اپتیک مجتمع یا دقیق‌تر، فوتونیک مجتمع.

فوتونیک مجتمع دربرگیرنده ترکیبی از تکنولوژی موجبر و حوزه‌های دیگر مثل الکترواپتیک، اکوستواپتیک، اپتیک غیر خطی و اپتوالکترونیک است.



شکل۱- ۱: ارتباط حوزه‌های مختلف با فوتونیک مجتمع.

ایده اساسی در پشت فوتونیک مجتمع استفاده از فوتون‌ها به جای الکترون‌ها می‌باشد. لغت "اپتیک مجتمع" اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط S.E.Miller برای تاکید بر شباهت بین تکنولوژی مدارهای اپتیکی مسطح و مدارهای میکروالکترونیک مجتمع ساخته شده، مطرح گردید[۲].

اجزای اپتیکی موجود در ادوات اپتیکی مجتمع شامل مولفه‌های اصلی برای تولید، همگرایی، تلفیق، پیوند، تزویج، کنترل ایزولاسیون، کنترل پلاریزاسیون، سوییچینگ، مدولاسیون، فیلترینگ و آشکارسازی نور می‌باشد.

---

[۱] Optical Communications.
[۲] Optical Computing.
[۳] Optical Sensing.
[۴] Image and Display systems.

بنابراین هدف اصلی فوتونیک مجتمع کوچک‌کردن سیستم‌های اپتیکی است، مشابه هدفی که مدارهای الکترونیکی مجتمع در کوچک‌کردن ادوات الکترونیکی دنبال می‌کنند، که این، در سایه طول موج کوچک نور که اجازه ساخت مدارها و ادوات فوتونیکی با سایز در حد میکرون را می‌دهد، امکان‌پذیر است.

۱-۱-۱ تاریخچه مختصری از فوتونیک مجتمع

تا سی سال بعد از ابداع ترانزیستور، پردازش و انتقال اطلاعات مبتنی بر الکترونیک بود که از ادوات نیمه‌هادی برای کنترل شار الکترون بهره گرفته می‌شد. ولی در اوایل سال ۱۹۸۰، الکترونیک تدریجا با اپتیک تکمیل و یا حتی جایگزین شد و فوتون‌ها جایگزین الکترون‌ها به عنوان حامل‌های اطلاعات شدند.

تاریخچه فوتونیک مجتمع مشابه تاریخچه دیگر تکنولوژی‌های مرتبط است: کشف، سیر تکامل سریع ادوات، زمان انتظار طولانی برای به کارگیری[۳].

اولین موجبرهای اپتیکی، تولید شده در اواخر سال ۱۹۶۰، ادوات یک بعدی روی زیرساختار مسطح بودند. در اواسط سال ۱۹۷۰، بهره‌برداری موفقی از موجبرهای سه بعدی در یک تنوع وسیعی از مواد، از شیشه تا کریستال و نیمه هادی‌ها، اتفاق افتاد. برای ساخت ادوات اساسی در هندسه موجبر، لیتیوم نیوبایت[۱] به سرعت به عنوان ماده نویددهنده‌ای به رسمیت شناخته شد. تولید موجبر با زیرساختار لیتیوم نیوبایت که تیتانیوم در آن پخش شده است، در آزمایشگاه AT&T Bell به نمایش گذاشته شد که منجر به توسعه موجبرهای کانالی با مواد کم‌اتلاف و اثرات قابل ملاحظه الکترواپتیک و اکوستواپتیک گردید.

در اواسط سال ۱۹۸۰، امکان‌پذیری ساخت ادوات براساس لیتیوم نیوبایت، مثل مدولاتورهای شدت تا حدود GHZ ۴۰، مجتمع‌سازی ۵۰ سوییچ در یک قطعه فوتونیکی منفرد در آزمایشگاه به اثبات رسید.

ایده اساسی در پشت استفاده از فوتون‌ها به جای الکترون‌ها در خلق مدارهای فوتونیکی مجتمع، فرکانس بالای نور (۲۰۰ THZ) است که پهنای باند بزرگ برای ارسال، مدیریت مبلغ وسیعی از اطلاعات را منجر می‌شود. جایگزین‌کردن الکترونیک با توانمندی‌های فوتونیک دلایل اساسی فیزیکی دارد. نرخ انتقال اطلاعات با استفاده مطلق از وسایل الکترونیکی محدود می‌شود. همان‌طور که فرکانس سیگنال الکتریکی در حال انتشار در یک رسانا افزایش می‌یابد، مقاومت ظاهری رسانا

---

[۱] $LiNbO_3$.

افزایش می‌یابد، بنابراین خصوصیات انتشار کابل الکتریکی کمتر مطلوب خواهد شد. این‌که چرا سیگنال‌های الکتریکی با فرکانس‌هایی بالاتر از MHZ ۱۰ باید توسط رساناهای خاصی به نام کابل‌های هم‌محور، به منظور کاهش اثر تضعیف بالا، حمل شوند، به این دلیل است.

ارتباطات مبتنی بر سیگنال‌های الکتریکی منتشره در کابل‌های هم‌محور، در کاربردهایی که مسافتشان چند ده متر است قابل استفاده هستند، اما آنها برای مسافت‌های بزرگتر از چند کیلومتر قابل استفاده نیستند. در عوض، سیگنال‌های اپتیکی در محیط‌های دی‌الکتریک غیررسانا، که در گستره طول موجی که مواد در آن شدیدا شفاف هستند، منتشر می‌شوند.

برای بیشتر مواد اپتیکی مورد استفاده در ارتباطات نوری و ادوات فوتونیکی، این پنجره شفاف در گستره مرئی و نزدیک مادون قرمز از طیف الکترومغناطیسی قرارگرفته است که منطبق بر گستره فرکانسی THZ ۸۰۰-۱۵۰ یعنی $۱۰^{٦}$ برابر فرکانس مورد کاربرد در انتقال‌های الکترونیکی، می‌باشد.

ادوات فوتونیک مجتمع مبتنی بر مدارهای اپتیکی مجتمع به علت کارکرد در طول موج نسبتا کوچک نور یعنی در گستره (۰/۵-۲ μm)، مزایایی دارد، از جمله این‌که امکان ساخت مولفه‌های بسیار کوچک در سایز میکرو و نانو را میسر می‌سازد.

مفهوم اساسی در مدارهای اپتیک مجتمع شبیه همان چیزی است که در فیبرهای نوری اتفاق می‌افتد: مقید شدن نور. محیطی که ضریب شکست معینی دارد و توسط یک محیط دیگر با ضریب شکست کمتر احاطه شده است، مانند یک تله نور عمل می‌کند که پرتوها به واسطه پدیده‌ای به نام بازتابش داخلی کلی در فصل مشترک دو محیط نمی‌توانند از ساختمان مذکور بگریزند[٤,٥].

پس با این توضیحات، عملکرد تراشه‌های اپتیکی نمی‌تواند برحسب اپتیک پرتو توضیح داده شود، اما به جای آن، نور باید به صورت امواج الکترومغناطیسی درنظرگرفته شود. بنابراین، برای توضیح مناسب رفتار اجزای اپتیکی مختلف که در هر قطعه فوتونیک مجتمع یافت می‌شود، تئوری الکترومغناطیس نور لازم است. در بیشتر حالات، طبیعت برداری امواج الکترومغناطیسی ساده می‌شوند، رفتار نرده‌ای امواج اپتیکی معمولا برای توصیف مستقل پدیده‌های دربرگیرنده، کفایت می‌کند.

ما با شروع از معادله ماکسول برای انتشار نور در فضای آزاد معادله موج را استخراج می‌کنیم و سپس معادله موج در محیط دی‌الکتریک را با تعریف یک ضریب شکست به دست می‌آوریم. حل قسمت زمانی معادله موج، به شکل توابع هارمونیک است که از آن برای استخراج معادله موج برای امواج تکفام استفاده می‌شود که فقط وابستگی مکانی میدان الکترومغناطیسی لازم به درنظرگرفتن است. پس معادله هلمهولتز، معادله آغازین برای تحلیل موجبرهای اپتیکی است.