بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی برق-الکترونیک

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک

طراحی مدارات مجتمع نوری

عنوان پایان نامه

کاهش آستانه توان عملکرد گیت های نوری در رژیم نور کند در بستر کریستال فوتونیکی

استاد راهنما

دکتر سامیه مطلوب

استاد مشاور

دکتر علی رستمی

پژوهشگر

علی فخرالدین

بهمن ماه ۱۳۹۳

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

سپاس گذاری...

از اساتید بزرگوارم جناب آقای پروفسور علی رستمی و سرکار خانم دکتر مطلوب که در تمام مراحل انجام این پایان نامه،

همواره از راهنمایی های ارزنده شان بهره برده ام سپاسگذارم.

نام خانوادگی: فخرالدین **نام:** علی

عنوان پایان نامه: کاهش آستانه توان عملکرد گیت های نوری در رژیم نور کند در بستر کریستال فوتونیکی

استاد راهنما: دکتر سامیه مطلوب

استاد مشاور: دکتر علی رستمی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق-الکترونیک

گرایش: طراحی مدارات مجتمع نوری

دانشگاه: دانشگاه تبریز **دانشکده:**مهندسی برق و کامپیوتر

تاریخ فارغ‌التحصیلی: بهمن ۱۳۹۳ **تعداد صفحات: ۹۵**

کلیدواژه‌ها: کریستال فوتونیکی ـ نور کند ـ گیت های منطقی

چکیده:

ساختارهای پریودیک به دلیل توانایی که در کنترل طول موج انتشار و در نتیجه مدیریت انتشار امواج الکترومغناطیسی بخصوص نور دارند، از مدت ها پیش مورد توجه دانشمندان قرار گرفته اند. کریستال های فوتونیکی دو بعدی از جمله این ساختارهای پریودیک می باشند که به دلیل وجود باند ممنوعه و با توجه به نمودار پاشندگی در نزدیکی لبه باند می توان سرعت گروه را کاهش داد. کاهش سرعت نور در ساختار کریستال فوتونیکی مانند یک فیبر نوری کریستال فوتونیکی با تغییر نرخ فوتون های ورودی و در نتیجه با افزایش دامنه پالس سیگنال ورودی در داخل شبکه کریستالی این امکان را فراهم می آورد که برای انتقال سیگنال، با کاهش توان مصرفی و در نتیجه عدم نیاز به تزریق توان اضافی به بازده مورد نظر دست یافت. در این پایان نامه هدف طراحی و شبیه سازی یک گیت منطقی است که در ساختار کریستال فوتونیکی دو بعدی پیاده سازی می شود و این طراحی به گونه ای صورت می گیرد که گیت مورد نظر در حوزه نور کند کار کرده و با کاهش سرعت نور حتی الامکان بتوان با حداقل توان مصرفی به بیشترین بازده دست پیدا کرد یعنی سعی بر این خواهد بود که توان مصرفی گیت منطقی مورد نظر به اندازه ای مینیمم گردد که به کارکرد عادی گیت لطمه ای وارد نسازد.

فهرست مطالب

فصل اول: بررسی منابع..... ۱

مقدمه ۲

۱-۱-مقدمه ای بر الکترومغناطیس محیط های همگن..... ۵

۱-۱-۱-امواج الکترومغناطیس و معادلات ماکسول ۵

۱-۱-۲- مودهای انتشاری *TE* و *TM*..... ۷

۱-۲-آشنایی با کریستال های فوتونیکی ۹

۱-۲-۱-تاریخچه پیدایش کریستال های فوتونیکی ۱۰

۱-۲-۲- مشکلات ساخت..... ۱۱

۱-۲-۳- کاربردها ۱۳

۱-۳-انواع کریستال های فوتونیکی..... ۱۶

۱-۳-۱-ساختارهای یک بعدی و دوبعدی متناوب ۱۶

۱-۴- انواع شبکه در ساختار کریستال فوتونیکی ۱۷

۱-۴-۱-شبکه مربعی – شبکه مثلثی..... ۱۷

۱-۵- ساختار باند در شبکه کریستال فوتونیکی ۱۸

۱-۵-۱- شکاف باند فوتونی..... ۱۸

۱-۵-۲- منحنی پاشندگی برای ساختار متناوب..... ۲۱

۱-۵-۳- نواحی بریلوییِن در شبکه معکوس ۲۳

۱-۵-۴- ساختار نوارهای فرکانسی ۲۴

۱-۶- روش های تحلیل کریستال فوتونیکی ۲۷

۱-۶-۱- روش تفاضل های متناهی در حوزه زمان ۲۸

۱-۶-۲- شرایط مرزی ۳۴

۱-۶-۳- انواع منابع ۳۷

فصل دوم: مواد و روش ها ۳۹

۲-۱- سرعت انتشار امواج ۴۰

۲-۱-۱- سرعت فاز – سرعت گروه – سرعت انرژی ۴۰

۲-۱-۲- سرعت گروه و پاشندگی رنگی در ساختارهای کریستال فوتونیکی ۴۳

۲-۱-۳- تعامد مودها و سرعت گروه ۴۵

۲-۲-گیت های نوری ۴۸

۲-۲-۱- اصول حاکم بر گیت های نوری در شبکه کریستال فوتونیکی ۴۹

۲-۲-۲- مزایا و کاربرد کریستال فوتونیکی به عنوان گیت نوری ۴۹

۲-۲-۳- ساختارهای مختلف گیت های نوری در بستر کریستال فوتونیکی ۵۰

۲-۲-۴- گیت *OR* با دو ورودی و اختلاف فاز صفر ۵۱

۲-۲-۵- گیت *XOR* با دو ورودی و اختلاف فاز غیرصفر ۵۳

۲-۲-۶- گیت *NOT* با اختلاف فاز غیرصفر ۵۴

۲-۳- روش های مختلف برای تحقق نور کند ۵۵

۲-۴- موجبرهای نور کند ۵۶

۲-۴-۱-موجبر با بی نظمی خطی ۵۷

۲-۴-۲- موجبر با بی نظمی صفحه ای ۵۸

۲-۴-۳- موجبر با سوراخ مرکزی ۶۰

۲-۵- اصول طراحی ساختار نور کند در شبکه کریستال فوتونیکی ۶۲

فصل سوم: نتایج ۶۳

۳-۱- استخراج ساختار باند ۶۴

۳-۲- محاسبه سرعت گروه ۶۸

۳-۳- طراحی و شبیه سازی موجبر ۷۰

۳-۴- طراحی و شبیه سازی موجبر نور کند ۷۳

منابع و مراجع ۹۰

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: دیود نوری *GAN* با بهره گیری از کریستال فوتونیکی ۱۴

شکل۱-۲: مشخصه های جریان- ولتاژ و شدت نور – جریان..... ۱۴

شکل ۱-۳: کریستال فوتونیکی یک بعدی و پاسخ آن به دو طول موج متفاوت..... ۱۶

شکل ۱-۴: نمایش دو هندسه پایه کریستال فوتونیکی دوبعدی ۱۷

شکل ۱-۵: نمایش تقارن دورانی و سلول واحد در کریستال های فوتونیکی دوبعدی ۱۸

شکل ۱-۶: نسبت پاشندگی برای ماده متجانس و یک ماده با شکاف باند فوتونی..... ۱۹

شکل۱-۷: الگوهای شدت موج ایستا که در تشدید براگ رخ می دهد ۲۰

شکل ۱-۸: ترسیم معادله پاشندگی محیط همگن ۲۱

شکل ۱-۹: نمایش ساختار باند فرکانسی کریستال فوتونیکی یک بعدی..... ۲۱

شکل ۱-۱۰:منحنی پاشندگی یک کریستال فوتونیکی یک بعدی که در ناحیه کاهش ناپذیر برلوییین نشان داده شده است..... ۲۳

شکل ۱-۱۱: نماش ناحیه اول بریلوییین و ناحیه کاهش ناپذیر ۲۴

شکل ۱-۱۲: نمایش مخروط نور برای محیط همگن دوبعدی..... ۲۵

شکل۱-۱۳:نمایش منحنی پاشندگی برای محیط همگن دوبعدی با ناهمگنی افزوده متناوب و بسیار کوچک ۲۵

شکل ۱-۱۴: منحنی های فرکانس ثابت برای کریستال فوتونیکی حاصل از دی الکتریک همگن. ۲۶

شکل ۱-۱۵: ساختار کلی تقسیم بندی روش های تحلیل عددی در کریستال های فوتونیکی ۲۸

شکل ۱-۱۶: شبکه بندی فضای دو بعدی برای تحلیل *FDTD*..... ۲۹

شکل ۱-۱۷: گسسته سازی میدان های الکتریکی و مغناطیسی در سه بعد..... ۳۲

شکل ۱-۱۸: سلول واحد مورد تحلیل در خانواده ۱ ..... ۳۵

شکل ۱-۱۹: نمایش مرزها و نحوه اعمال شرایط مرزی متناوب..... ۳۵

شکل ۱-۲۰: نمایش دو مثال از خانواده ۳۶

شکل ۱-۲۱: شرط مرزی شفاف در چهار سوی یک کاواک که در خانواده ۳ اعمال می شود. ۳۶

شکل ۱-۲۲: شرط مرزی شفاف در چهار سوی یک موجبر کریستال فوتونیکی که در خانواده ۴ اعمال می شود..... ۳۷

شکل ۲-۱: سرعت گروه و پاشندگی رنگی..... ۴۵

شکل ۲-۲: ساختار گیت *OR* در شبکه کریستال فوتونیکی ۵۱

شکل ۲-۳: نحوه توزیع و انتشار میدان در داخل گیت *OR*..... ۵۲

شکل ۲-۴: نحوه توزیع و انتشار میدان در داخل گیت *XOR*..... ۵۳

شکل ۲-۵: نحوه توزیع و انتشار میدان در داخل گیت *NOT*..... ۵۵

شکل ۲-۶: ساختار موجبر با بی نظمی خطی..... ۵۷

شکل ۲-۷: دیاگرام باند برای موجبر ساده *W1* نشان داده شده در شکل ۲-۶..... ۵۸

شکل ۲-۸: موجبر با ساختار صفحه ای ۵۹

شکل ۲-۹:دیاگرام باند برای موجبر صفحه ای. ۶۰

شکل ۲-۱۰: ساختار موجبر با سوراخ مرکزی..... ۶۱

شکل ۲-۱۱: دیاگرام باند ساختار موجبر با سوراخ مرکزی ۶۱

شکل ۳-۱: نمایش سلول واحد در ساختار مربعی..... ۶۵

شکل ۳-۲: ساختار باند برای مود *TM* در شبکه مثلثی..... ۶۶

شکل ۳-۳: ساختار باند برای مود *TM* در شبکه مربعی ۶۷

شکل ۳-۴: ساختار باند برای مود *TE* در شبکه مربعی..... ۶۷

شکل ۳-۵: ساختار باند برای مود *TE* در شبکه مثلثی..... ۶۷

شکل ۳-۶: دیاگرام مود پایه از منحنی پاشندگی شبکه مربعی ۶۸

شکل ۳-۷: نمودار سرعت گروه بر حسب بردار موج برای مود پایه شبکه مربعی ۶۹

شکل ۳-۸: نمودار سرعت گروه بر حسب بردار موج به صورت درصدی از سرعت نور در خلاء..... ۶۹

شکل ۳-۹: نواحی شبیه سازی برای دو حالت مختلف..... ۷۱

شکل ۳-۱۰: منحنی تابع انتقال برای موجبر ساده در پلاریزاسیون *TM*..... ۷۲

شکل ۳-۱۱: نحوه توزیع میدان در داخل موجبر ساده ۷۲

شکل ۳-۱۲: ساختار باند برای موجبر ساده ۷۴

شکل ۳-۱۳: مود انتشاری موجبری در داخل باند ممنوعه شبکه کریستال فوتونیکی ۷۴

شکل ۳-۱۴: نمودار سرعت گروه مود انتشاری بر حسب بردار موج که به صورت درصدی از سرعت انتشار نور در خلاءاست. ۷۵

شکل ۳-۱۵: سرعت گروه مود انتشاری بر حسب بردار موج بر حسب متر بر ثانیه ۷۵

شکل ۳-۱۶: ساختار باند برای موجبر نور کند ۷۷

شکل ۳-۱۷: نمای کلی موجبر نور کند. ۷۸

شکل ۳-۱۸: مود انتشاری موجبر نور کند که در محدوده فرکانس مخابراتی است. ۷۹

شکل ۳-۱۹: نمودار سرعت گروه مود انتشاری موجبر نور کند بر حسب درصدی از سرعت انتشار نور در خلاء ۷۹

شکل ۳-۲۰: نمودار سرعت گروه مود انتشاری موجبر نور کند بر حسب متر بر ثانیه..... ۸۰

شکل ۳-۲۱: ساختار کلی گیت *OR* به همراه موجبر نور کند..... ۸۱

شکل ۳-۲۲: نحوه توزیع میدان برای گیت با موجبر نور کند ۸۱

شکل ۳-۲۳: ساختار باند برای موجبر نور کند در حضور ماده جدید *AL2O3*..... ۸۲

شکل ۳-۲۴: مود انتشاری برای موجبر نور کند در حضور ماده جدید *AL2O3*..... ۸۲

شکل ۳-۲۵: نمودار سرعت گروه مود انتشاری در حضور *AL2O3* به صورت درصدی از سرعت نور در خلاء ۸۳

شکل ۳-۲۶: نمودار سرعت گروه برای موجبر نور کند در حضور *AL2O3* بر حسب متر بر ثانیه..... ۸۴

شکل ۳-۲۷: نحوه توزیع میدان برای موجبر نور کند در حضور AL2O3..... ۸۴

شکل ۳-۲۸: منحنی تابع انتقال موجبر نور کند در حضور AL2O3..... ۸۵

شکل ۳-۲۹: توزیع میدان برای موجبر ساده با فعال بودن ورودی اول..... ۸۶

شکل ۳-۳۰: توزیع میدان برای موجبر ساده با فعال بودن ورودی دوم..... ۸۷

شکل ۳-۳۱: توزیع میدان برای موجبر ساده با فعال بودن هر دو ورودی..... ۸۷

شکل ۳-۳۲: توزیع میدان برای موجبر نور کند با فعال بودن ورودی اول..... ۸۸

شکل ۳-۳۳: توزیع میدان برای موجبر نور کند با بعال بودن ورودی دوم ۸۸

شکل ۳-۳۴: توزیع میدان برای موجبر نور کند با فعال بودن هر دو ورودی..... ۸۸

فهرست جداول

جدول ۳-۱: مقادیر پارامترهای طراحی برای استخراج ساختار باند..... ۶۴

جدول ۳-۲: مشخصات موجبر ساده شبیه سازی شده..... ۷۶

جدول ۳-۳: مشخصات پارامترهای به کار رفته در موجبر نور کند ۷۸

جدول ۳-۴: جدول درستی عملکرد گیت *OR*..... ۸۶

فصل اول:

بررسی منابع

مقدمه

طی چندین دهه گذشته الکترونیک در حوزه نور از اهمیت ویژه ای برای محققان و دانشمندان برخوردار بوده است به طوری که اکثر مطالعات دانشمندان در دنیا به سوی آن معطوف گردیده است. ورود به حوزه الکترونیک نوری[۱] اهمیت فراوانی به دلایل زیر دارد:

سرعت بسیار بالای پردازش در حوزه نور، تبادل اطلاعات به صورت کاملاً سالم[۲]، رنج فرکانس کاری بسیار بالای آن نسبت به الکترونیک . نیز ذات پردازش موازی در حوزه الکترونیک نوری که سرعت محاسبات را چندین برابر می نماید.

کریستال های فوتونیکی نیز یکی از بسترهای مناسب برای استفاده در الکترونیک نوری می باشند. خواص بسیار جالب توجهی که کریستال های فوتونیکی دارند باعث شده تا ساختارهای پریودیک و شبه پریودیک از آنها ساخته شده و بتوان از خواص آنها برای طراحی المان های نوری استفاده کرد.

یکی از مهمترین مزایای کریستال های فوتونیکی وجود باند ممنوعه[۳] در آنها می باشد که با استفاده از این خاصیت ذاتی می توان به طراحی فیلترهای نوری، سوییچ های نوری و دیگر المان های همانند دسترسی پیدا کرد.

ساخت گیت های نوری برای مقاصد سرعت بالا از مدت ها پیش هدف دانشمندان بوده است. از جمله مشکلاتی که کارکرد گیت های معمولی و حتی گیت های تمام نوری را محدود می کرد. سرعت پایین و اتلاف توان در عملکرد این گونه گیت ها بوده است، به گونه ای که در ساخت و بهره برداری از گیت های دیجیتال تمام نوری برای بهبود عملکرد گیت و افزایش سرعت و بازده آن انتظار افزایش توان مصرفی می رفت یا به عبارت دیگر برای این منظور می بایست توان ورودی تزریقی به داخل سیستم گیت نوری افزایش می یافت که این امر هم خود باعث افزایش اتلاف توان در هنگام کاکرد گیت نوری می شود و هم نیاز به تزریق توان اضافی در شبکه ای مشتمل بر هزاران گیت مقرون به صرفه نمی باشد به همین دلیل تمامی تلاش ها بر آن است که علاوه بر بهبود و افزایش سرعت عملکرد گیت های دیجیتال، برای بهبود بازده و نیز کاهش اتلاف توان و در نتیجه کاهش توان مصرفی گیت ها پیشرفت هایی صورت گیرد.

ورود به حوزه نور و ساخت ادوات تمام نوری به صورت چشمگیری باعث غلبه بر مشکل اولیه گیت های دیجیتال (افزایش سرعت عملکرد گیت های دیجیتال) گردیده است.

---

1 - Optical Electronic
2 - Safety communication information
3 - Band gap

برای غلبه بر مشکل توان در عملکرد گیت ها و افزایش بازده آنها در حوزه نور روشهای مختلفی پیشنهاد گردیده است که برخی از آنها منجر به ورود در حوزه نور کند[1] می شود و از اینجا است که اهمیت نور کند یا به عبارت کلی تر کنترل و مدیریت سرعت انتشار نور در محیط های مختلف آشکار می گردد. در این پایان نامه هدف اصلی کاهش توان عملکرد یک گیت نوری است که در حوزه نور کند کار می کند و در ساختارهای کریستال فوتونیکی پیاده سازی می شود. که برای دستیابی به نور کند طراحی گیت نوری در ساختار کریستال فوتونیکی به گونه ای صورت می گیرد که انتشار امواج الکترومغناطیسی در حوالی لبه باند ممنوعه صورت گیرد.

سرعت نور به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای فیزیکی است که در تئوری الکترومغناطیس ماکسول ظاهر شده و در مخابرات نوری به کار می رود که مقدار آن در خلاء تقریباً ۳×۱۰^{۸} متر بر ثانیه بوده و این سرعت برای طی مسافت ۳۰۰ میلیمتر در مدت ۱ نانوثانیه کافی می باشد. این سرعت بالای انتشار امواج الکترومغناطیسی برای انتقال پربازده اطلاعات بین دو نقطه در مخابرات نوری بسیار سودمند می باشد. به همین دلیل دانشمندان سعی بر اندازه گیری آن با دقت بالا دارند. اگرچه این سرعت بالای انتشار نور و امواج الکترومغناطیسی باعث می شود که کنترل و مدیریت سیگنال های نوری در حوزه زمان مشکل باشد بنابراین کاهش سرعت نور یا به طور کلی مدیریت سرعت نور تکنولوژی است که برای غلبه بر این مشکل به وجود آمده است.

امکان رفتار نور تند یا نور کند یا به طور کلی «slow light» از یک قرن پیش مورد مطالعه قرار گرفته و تا امروز یکی از پرمباحثه ترین بحث ها می باشد. برخی از مباحث و مسائلی که در این حوزه به وجود آمده است به این دلیل می باشد که تصور می شد سرعت انتشار نور در محیط های مختلف محدود به سرعت انتشار آن در خلاء است ولی امروزه نشان داده می شود که رفتار نور کند یا تند با معادلات ماکسول و تئوری انتشار امواج ماکسول که انتشار امواج الکترومغناطیسی را در داخل محیط مختلف تشریح می نمایند، سازگار هستند.

در این پایان نامه از ساختار کریستال های فوتونیکی دو بعدی که در حوزه نور کند کار می کنند برای ساخت گیت مورد نظر استفاده شده است. در بخش های ابتدایی به معرفی ساختار و خواص شبکه های پریودیک (اختصاصاً کریستال های فوتونیکی دو بعدی) پرداخته و پس از بررسی ساختار باند، به معرفی بی نظمی و نحوه استفاده از آن برای طراحی گیت منطقی پرداخته شده است.

---

1 - slow light

سپس به بررسی سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی پرداخته و نحوه کاهش آن در ساختار کریستال فوتونیکی اشاره شده است. در نهایت گیت منطقی پیاده سازی و شبیه سازی شده است.

۱-۱- مقدمه ای بر الکترومغناطیس محیط های همگن

انتشار امواج در محیط های دی الکتریک خطی و ایزوتروپیک توسط معادلات ماکسول کنترل و مدیریت می شوند. معادلات ماکسول در حوزه الکترونیک نوری به عنوان اساسی ترین و پایه ای ترین مفاهیم هستند و برای تحلیل انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط های مختلف، تحلیل و ساده سازی این معادلات لازم است، از اینرو قبل از همه به معرفی و تحلیل و ساده سازی این معادلات پرداخته و حالات خاصی از این معادلات که مورد نیاز ما در ادامه کار خواهد بود و تحت عناوین مودهای انتشاری عرضی و طولی شناخته می شوند را مورد بررسی قرار می دهیم.

۱-۱-۱- انتشار امواج الکترومغناطیس و معادلات ماکسول

معادلات ماکسول که شامل چهار معادله است، به صورت زیر بیان می گردد:

$$\nabla . D = \rho \qquad ۱-۱$$

$$\nabla . B = 0 \qquad ۱-۲$$

$$\frac{\partial B}{\partial \mathrm{t}} = -\nabla \times E \qquad ۱-۳$$

$$\frac{\partial D}{\partial \mathrm{t}} = \nabla \times H - \mathrm{Je} \qquad ۱-۴$$

معادله ۱-۱ قانون گوس را برای میدان های الکتریکی بیان می دارد. معادله ۱-۲ قانون گوس را برای میدان های مغناطیسی نشان داده و توصیف می کند. معادله ۱-۳ قانون فارادی را تشریح می کند و معادله ۱-۴ قانون آمپر را بیان می دارد.

در این معادلات D بردار چگالی جابجایی الکتریکی (بر حسب کولمب بر مترمربع) بوده و ρ چگالی بار الکتریکی است. در رابطه دوم و سوم مقدار B همان القای مغناطیسی (بر حسب وبر بر مترمربع) بوده و E بردار میدان الکتریکی (بر حسب ولت بر متر) می باشد. پارامتر H نیز معرف بردار میدان مغناطیسی (بر حسب آمپر بر متر) می باشد و $\mathrm{J_e}$ هم چگالی جریان هادی الکتریکی است. باید دقت شود که در فضای تهی چگالی بار برابر ρ و چگالی جریان صفر است، همچنین برای هر میدان الکترومغناطیسی روابط فوق تحت هر شرایطی باید ارضا شود.

روابط ۱-۱ و ۱-۲ اثر میدان را بر روی ماده نشان می دهند. در حوزه نور نیز با انتشار امواج الکترومغناطیسی در فضایی که چگالی بار الکتریکی آن ρ و چگالی جریان آن J_e است، سر و کار داریم.

همان طور که می دانیم علت حرکت بارهای الکتریکی تغییرات میدان مغناطیسی است که باعث ایجاد جریانی به نام جریان جابجایی شده و این پدیده توسط قانون آمپر توصیف می شود. همچنین در یک مسیر دایروی میدان الکتریکی در حال چرخش باعث ایجاد میدان مغناطیسی متغیر با زمان القایی می شود که توسط قانون فارادی توصیف می گردد، اما معمولاً مواد و محیط های مورد استفاده در حوزه نور به صورت خطی و ایزوتروپیک[1] بوده و لذا معادلات ماکسول در هر سه بعد فضایی با استفاده از معادلات زیر توصیف شوند:

$$B = \mu.H = \mu(H_x , H_y , H_z) \quad , \quad \mu = \mu_0.\mu_r \qquad ۵-۱$$

$$D = \varepsilon.E = \varepsilon(E_x , E_y , E_z) \quad , \quad \varepsilon = \varepsilon_0 .\varepsilon_r \qquad ۶-۱$$

$$J_e = \sigma.E \qquad ۷-۱$$

که در روابط فوق μ_0 و μ_r به ترتیب تنسورهای پرمابلیته برای فضای آزاد و پرمابلیته نسبی هستند که $\mu_0=۴\pi\times۱۰^{-۷}$ بر حسب هانری بر متر است و در حالت کلی μ را پرمابلیته مغناطیسی می نامند.

ε_0 و ε_r به ترتیب تنسورهای پرمیتیویته برای فضای آزاد و نیز پرمیتیویته نسبی هستند که مقدار ε_0 عبارت است از $۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}$ و بر حسب فاراد بر متر است و در حالت کلی ε را پرمیتیویته الکتریکی می نامند.

اعمال میدان الکترومغناطیسی حرکت الکترون در آنها را آشفته کرده و باعث ایجاد نوعی آشوب در آنها می گردد، لذا پلاریزاسیون دو قطبی P نیز در واحد حجم در اثر پدیده فوق به وجود آمده و رابطه ۱-۶ به رابطه ۱-۸ تعمیم می یابد:

$$D = \varepsilon E = \varepsilon\varepsilon_r E + P \qquad ۸-۱$$

که در رابطه ۱-۸ P را پلاریزاسیون الکتریکی می نامند.

مؤلفه های قوانین فارادی و آمپر به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \qquad ۹-۱$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \qquad ۱۰-۱$$

1 Isotropic