

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

دانشگاه یزد

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

فیزیک اتمی و مولکولی

شبیه‌سازی انتشار سالیتون‌های زمانی در موجبرهای فراماده

استاد راهنما:

دکتر محسن حاتمی

استاد مشاور:

دکتر محمد کاظم توسلی

پژوهش و نگارش:

مینا آذری

اسفند ۱۳۹۱

چکیده

دستیابی به ساختارهای مصنوعی الکترومغناطیسی با خواص مطلوب و قابل کنترل از سالیان گذشته همواره مورد توجه پژوهش‌گران بوده است. دسته خاصی از این ساختارها تحت عنوان فرامواد از سال‌های پایانی قرن بیستم میلادی مورد توجه خاص قرار گرفته است. این ساختارهای مصنوعی الکترومغناطیسی خواص جالبی از خود بروز می‌دهند که به‌طور معمول در مواد طبیعی یافت نمی‌شود. علاوه بر این کاربردهای جالب و روز افزون این ساختارها در علوم و فنون، این بخش از علم را به یکی از فعال‌ترین شاخه‌های فیزیک مبدل ساخته است. از آنجا که اپتیک غیرخطی واکنش یک سیستم مادی به میدان خارجی را به شدت وابسته می‌کند، هم‌اکنون ظهور فرامواد در بررسی‌های اپتیک غیرخطی، راهی تازه برای دستیابی به خواص غیرخطی فراتر از مواد معمولی ارائه می‌دهد. در این پایان‌نامه پس از ارائه فیزیک ساختارهای فراماده در بستر نگاهی تاریخی، فرامواد غیرخطی و موجبرهای فراماده را معرفی می‌کنیم. سپس معادلات مربوط به انتشار موج الکترومغناطیسی در موجبری با هسته فراماده را به‌دست آورده‌ایم. نشان می‌دهیم که معادلات به‌دست آمده دو معادله جفت‌شده نامتقارن است و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی انتشار موج سالیتون پایه را شبیه‌سازی می‌کنیم. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی درمی‌یابیم که جواب سالیتونی معادله شرودینگر، جواب سالیتونی این معادلات نیست. در نتیجه به بررسی جواب‌های سالیتونی این معادلات می‌پردازیم. در نهایت با رویکردی تحلیلی-عددی امکان انتشار امواج سالیتونی را مورد بررسی قرار داده‌ایم و به شبیه‌سازی رفتار چنین امواجی توجه کرده‌ایم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	۱- اپتیک غیرخطی
۲.....	۱-۱ محیط اپتیکی غیرخطی.....
۴.....	۲-۱ معادله غیرخطی موج.....
۵.....	۳-۱ اپتیک غیرخطی مرتبه دوم.....
۶.....	۴-۱ اپتیک غیرخطی مرتبه سوم.....
۷.....	۵-۱ اثر اپتیکی کر.....
۷.....	۶-۱ مدولاسیون خودفازی.....
۸.....	۷-۱ بهره رامان.....
۸.....	۸-۱ خودکانونی.....

۲- فیبر نوری

۱۱.....	۱-۲ فیبر نوری.....
۱۳.....	۲-۲ اتلاف فیبر.....
۱۴.....	۳-۲ پاشندگی رنگی.....
۱۵.....	۴-۲ انتشار پالس در فیبرهای نوری.....
۱۵.....	۱-۴-۲ معادلات ماکسول در فیبرهای نوری.....
۱۸.....	۵-۲ مدهای فیبر.....
۱۸.....	۱-۵-۲ معادله ویژه مقدری.....
۱۹.....	۶-۲ معادله غیرخطی انتشار پالس در فیبرهای نوری.....
۲۳.....	۷-۲ اثرات غیرخطی مراتب بالاتر.....

۳- سالیتون

- ۱-۳ مدولاسیون خودفازی پالس..... ۲۷
- ۲-۳ انتشار پالس در محیط پاشنده..... ۲۸
- ۳-۳ سرعت گروه..... ۲۸
- ۴-۳ پاشندگی سرعت گروه..... ۲۹
- ۵-۳ پاشندگی عادی و غیرعادی..... ۳۰
- ۶-۳ سالیتون‌های نوری..... ۳۱
- ۷-۳ سالیتون‌های روشن و تاریک..... ۳۲

۴- فرامواد

- ۱-۴ فرامواد..... ۳۴
- ۲-۴ تاریخچه..... ۴۱
- ۳-۴ کاربرد فرامواد..... ۴۴
- ۴-۴ ساختارهای فراماده..... ۴۶
- ۴-۵ نتیجه‌گیری و چشم‌انداز کلی..... ۶۰

۵- بررسی و شبیه‌سازی انتشار سالیتون‌های زمانی در موجبر فراماده غیرخطی

- ۱-۵ موجبرهای فراماده..... ۶۲
- ۲-۵ فرامادی غیرخطی..... ۶۵
- ۳-۵ معادلات جفت‌شده انتشار موج الکترومغناطیسی در موجبر فراماده غیرخطی..... ۷۰
- ۴-۵ نتیجه‌گیری..... ۸۸
- پیشنهادات..... ۸۹
- منابع..... ۹۰

فهرست شکل‌ها

شماره شکل	صفحه
۱-۱:	رابطه بین P و E در حالت الف) خطی، ب) غیر خطی..... ۲
۲-۱:	یک میدان الکتریکی سینوسی با فرکانس زاویه‌ای ω در یک محیط اپتیکی غیرخطی مرتبه دوم، یک مؤلفه ی قطبش در 2ω (هماهنگ مرتبه دوم) و یک مؤلفه ی پایا، تولید می‌کند..... ۵
۳-۱:	غیر خطی بودن مرتبه سوم..... ۶
۴-۱:	یک محیط غیرخطی مرتبه سوم مثل یک عدسی رفتار می‌کند که هم‌گرایی آن به شدت پرتو فرودی بستگی دارد..... ۹
۱-۲:	فیبر نوری یک موجبر دی‌الکتریک استوانه‌ای با یک هسته ی داخلی و غلاف خارجی است..... ۱۱
۲-۲:	الف) فیبر اپتیکی ضریب پله‌ای ب) فیبر اپتیکی ضریب تدریجی..... ۱۳
۱-۳:	مدولاسیون خودفازی و چیرپ شدن پالس نوری با عبور از محیط غیرخطی کر..... ۲۸
۲-۳:	انتشار پالس در محیط پاشنده ضعیف، به‌طوری‌که سرعت‌گروه مستقل از فرکانس است. پوش با سرعت‌گروه v حرکت می‌کند درحالی‌که موج اصلی با سرعت فاز c حرکت می‌کند..... ۲۹
۳-۳:	یک پالس نوری که در محیط پاشنده منتشر می‌شود و با آهنگی متناسب با ضریب پاشندگی D_{ν} پهن می‌شود..... ۳۰
۴-۳:	انتشار پالس نوری از میان محیطی با پاشندگی عادی و غیرعادی. در محیطی با پاشندگی عادی، مؤلفه‌های فرکانسی بزرگتر بعد از مؤلفه‌های فرکانسی کوچکتر می‌رسند. محیطی با پاشندگی غیرعادی رفتاری مخالف این دارد..... ۳۱
۵-۳:	الف) سالیتون روشن و ب) سالیتون تاریک..... ۳۲

- ۱-۴: دو ساختار فراماده ای در ناحیه میکروموج- شکل (الف) یک ساختار تناوبی است که معادل یک محیط همگن می باشد و شکل (ب) یک ساختار غیرپریویک است که معادل یک محیط ناهمگن می باشد.....۳۵
- ۲-۴: تمام خصوصیات ممکن مواد ایزوتروپیک بدون اتلاف در حوزه $\epsilon-\mu$۳۶
- ۳-۴: الف) قانون اسنل در RHM و ب) قانون اسنل در LHM.....۴۰
- ۴-۴: نمونه ای از یک TL CMM تناوبی (۴۰×۲۱ سلول، ۲۰۰×۱۰۵ میلی متر).....۴۳
- ۵-۴: ساختار SRR.....۴۶
- ۶-۴: ساختار SRR در معرض میدان الکترومغناطیسی الف) وقتی میدان مغناطیسی عمود بر سلول واحد است. ب) وقتی میدان مغناطیسی موازی با سلول واحد است.....۴۷
- ۷-۴: توان عبوری برای ساختار SRR در معرض میدان الکترومغناطیسی با میدان مغناطیسی عمودی.....۴۸
- ۸-۴: ترکیب SRR و سیم راست نازک متقاطع در معرض میدان الکترومغناطیسی.....۴۹
- ۹-۴: مدار معادل ساختار SRR.....۵۱
- ۱۰-۴: ساختار CRR.....۵۱
- ۱۱-۴: طیف عبوری اندازه گیری شده برای ساختار SRR (نمودار سیاه) و CRR (نمودار قرمز).....۵۱
- ۱۲-۴: پارامترهای ساختاری در SRR.....۵۲
- ۱۳-۴: ساختار SRR الف) تک حلقه ای تک شکافی، ب) تک حلقه ای دو شکافی، ج) تک حلقه ای چهار شکافی.....۵۳
- ۱۴-۴: ساختار SRR مربعی الف) تک حلقه ای تک شکافی، ب) تک حلقه ای دو شکافی، ج) تک حلقه ای چهار شکافی.....۵۴
- ۱۵-۴: ساختار فراماده دو بعدی شامل SRR و سیم های راست نازک متقاطع در دو سمت صفحات دی الکتریک.....۵۵

- ۱۶-۴: ساختار فراماده شامل SRR و سیم‌های راست نازک متقاطع در دو سمت صفحات دی-الکتریک که به روش لیتوگرافی روی یک تخته مدارچاپی استاندارد تعبیه شده.....۵۵
- ۱۷-۴: ساختار fishnet شامل دو صفحه فلزی موازی و دی‌الکتریک.....۵۶
- ۱۸-۴: پارامترهای ساختاری یک سلول واحد fishnet.....۵۷
- ۱۹-۴: ساختار fishnet همگن.....۵۷
- ۲۰-۴: ساختار fishnet تهیه شده به روش لیتوگرافی.....۵۸
- ۲۱-۴: ساختار Swiss Roll.....۵۸
- ۱-۵: شار انرژی گرداب مانند در یک موجبر فراماده.....۶۵
- ۲-۵: یک فراماده غیرخطی قابل تنظیم تشکیل شده از سلول‌های مربعی غیرخطی SRR. هر SRR شامل یک varactor است، که واکنش غیرخطی وابسته به توان فراهم می‌کند.....۶۹
- ۳-۵: ساختار هسته موجبر فراماده غیرخطی و مدار معادل آن.....۷۰
- ۴-۵: شبیه‌سازی رفتار پالس در موجبر فراماده غیرخطی با دامنه الکتریکی $A = 0.75$ ، طبق معادلات (۷۳-۵) و (۷۴-۵).....۸۳
- ۵-۵: شبیه‌سازی رفتار پالس در موجبر فراماده غیرخطی با دامنه الکتریکی $A = 0.75$ ، طبق معادلات (۷۳-۵) و (۷۴-۵).....۸۴
- ۶-۵: شبیه‌سازی رفتار پالس در موجبر فراماده غیرخطی با دامنه مغناطیسی $A = 1.25$ ، طبق معادلات (۷۳-۵) و (۷۴-۵).....۸۴
- ۷-۵: شبیه‌سازی رفتار پالس در موجبر فراماده غیرخطی با دامنه مغناطیسی $A = 1.25$ ، طبق معادلات (۷۳-۵) و (۷۴-۵).....۸۴
- ۸-۵: شبیه‌سازی رفتار سالیوتونی پایه در موجبر فراماده غیرخطی به ازای $\zeta = sgn(\beta_2) = -1$۲
۸۷
- ۹-۵: شبیه‌سازی رفتار سالیوتونی پایه در موجبر فراماده غیرخطی به ازای $\zeta = 2$ ، $sgn(\beta_2) = +1$۸۷

فصل اول

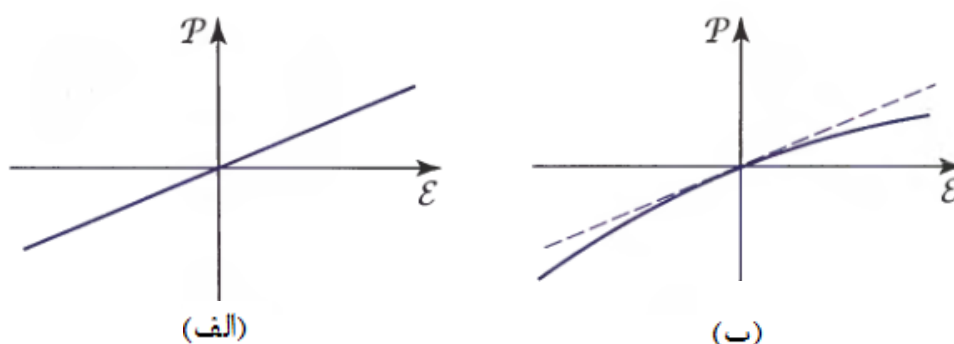
اپتیک غیر خطی

اپتیک غیرخطی مطالعه پدیده‌هایی است که به‌عنوان نتیجه‌ای از تغییر خصوصیات اپتیکی یک سیستم مادی در حضور نور اتفاق می‌افتد. شروع مطالعات در زمینه اپتیک غیرخطی به کشف هماهنگ مرتبه دوم در سال ۱۹۶۱، مدتی پس از اختراع اولین لیزر در سال ۱۹۶۰ باز می‌گردد.

مفهوم غیرخطی در پدیده‌های اپتیک غیرخطی به این معناست که واکنش یک سیستم مادی به شدت میدان اپتیکی اعمالی، یک رفتار غیرخطی است.

۱-۱ محیط اپتیکی غیرخطی

یک محیط دی‌الکتریک خطی با یک رابطه خطی بین میدان الکتریکی E و قطبش P به شکل $P = \epsilon \chi E$ معرفی می‌شود که ϵ ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و χ پذیرفتاری الکتریکی محیط است. از سوی دیگر، یک محیط دی‌الکتریک غیرخطی با یک رابطه غیرخطی بین E و P معرفی می‌شود [۱].



شکل ۱-۱: رابطه بین E و P در حالت الف) خطی، ب) غیر خطی.

رابطه بین E و P وقتی خطی است که E کوچک باشد، اما وقتی که E قابل مقایسه با میدان الکتریکی درون اتمی، که از مرتبه $10^8 - 10^5$ V/m است، باشد، این رابطه غیرخطی می‌شود. این مطلب با یک مدل ساده لورنتز می‌تواند درک شود که در آن ممان دوقطبی $P = -ex$ است که x جابجایی یک جرم با بار $-e$ تحت نیروی الکتریکی اعمال شده $-eE$ است. اگر میدان الکتریکی الاستیک متناسب با جابجایی باشد (طبق قانون هوک)، جابجایی x متناسب با E است. در این صورت P متناسب با E و

محیط خطی است. اما اگر نیروی الکتریکی اعمال شده **تابعی** غیرخطی از جابجایی باشد، جابجایی x و قطبش P توابع غیرخطی از E هستند، در این صورت محیط غیرخطی است.

از آنجا که میدان‌های الکتریکی پرتو خارجی اعمال شده در مقایسه با میدان‌های درون اتمی کوچک هستند، حتی وقتی نور لیزر متمرکز به کار گرفته می‌شود، معمولاً اثر غیرخطی ضعیف **بوده و** رابطه بین E و P برای E کوچک تقریباً خطی است و با افزایش E تنها کمی از رابطه خطی منحرف می‌شود. تحت چنین شرایطی، **P که تابعی از E است** می‌تواند در یک سری تیلور حول $E = 0$ بسط داده شود:

$$P = a_1 E + \frac{1}{2} a_2 E^2 + \frac{1}{6} a_3 E^3 + \dots \quad (1-1)$$

که ضریب‌های a_1 ، a_2 و a_3 به ترتیب مشتق اول، دوم و سوم P نسبت به E حول $E = 0$ هستند. این ضریب‌ها، مشخصه‌های ثابت محیط هستند. اولین جمله خطی است و برای شدت کم E بیشترین سهم را دارد. واضح است که $a_1 = \epsilon \cdot \chi$ ، **که در آن χ ضریب پذیرفتاری خطی است و** به ثابت دی‌الکتریک و ضریب شکست ماده، طبق رابطه $n^2 = \epsilon/\epsilon_0 = 1 + \chi$ مربوط می‌شود. جمله دوم و سوم به ترتیب جملات غیرخطی مرتبه دوم و سوم را نشان **می‌دهد.**

متداول است که رابطه (1-1) را به صورت زیر بنویسند:

$$P = \epsilon \cdot \chi E + 2dE^2 + 4\chi^{(2)}E^3 + \dots \quad (2-1)$$

که در این رابطه $d = \frac{1}{2} a_2$ و $\chi^{(2)} = \frac{1}{6} a_3$ هستند و به ترتیب قدرت **اثر** غیرخطی مرتبه دوم و سوم را توصیف می‌کنند.

در محیط‌های تقارن مرکزی، که تقارن معکوس وجود دارد، خصوصیات محیط با تبدیل $r \rightarrow -r$ تغییر نمی‌کند و تابع $P-E$ باید تقارن فرد داشته باشد، طوری که تبدیل $E \rightarrow -E$ ، P را به $-P$ تبدیل کند. در این صورت، ضریب غیرخطی مرتبه دوم، یعنی d باید حذف شود و کمترین مرتبه غیرخطی، مرتبه سوم است.

۱-۲ معادله غیر خطی موج

طبق معادلات ماکسول برای یک محیط دی‌الکتریک غیرخطی همگن و همسانگرد، معادله انتشار

موج به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} \quad (1-3)$$

μ_0 ضریب تراوایی مغناطیسی خلأ و c سرعت نور در خلأ می‌باشد. با توجه به همسانگرد بودن محیط

می‌توان معادله (۱-۳) را به صورت مؤلفه‌ای بررسی کرد:

$$\nabla \cdot E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1-4)$$

چون می‌توان قطبش را به صورت حاصل جمع جملات خطی و غیرخطی نوشت:

$$P = \epsilon_0 \chi E + P_{NL} \quad (1-5)$$

که:

$$P_{NL} = \chi^{(2)} dE^2 + \chi^{(3)} E^3 \quad (1-6)$$

و با توجه به این که $\chi = \epsilon/\epsilon_0 - 1$ و $c = c_0/n$ و $n^2 = \epsilon/\epsilon_0 = 1 + \chi$ ، رابطه (۱-۳) به شکل زیر نتیجه می‌شود:

$$\nabla \cdot E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P_{NL}}{\partial t^2} \quad (1-7)$$

چون P_{NL} تابعی غیرخطی از E است، معادله (۱-۷) یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی بر حسب E بوده و یک معادله اساسی در اپتیک غیرخطی است.

۱-۳ اپتیک غیرخطی مرتبه دوم

در این بخش خصوصیات اپتیکی یک محیط غیرخطی که مراتب بالاتر از دو در آن قابل صرف نظر

کردن هستند، را بررسی می‌کنیم. در این صورت:

$$P_{NL} = \chi^{(2)} dE^2 \quad (1-8)$$

واکنش یک محیط غیرخطی به میدان الکتریکی نوسانی با فرکانس زاویه‌ای ω و دامنه مختلط $E(\omega)$ را

در نظر بگیرید:

$$E(t) = \text{Re}\{E(\omega) \exp(i\omega t)\} = \frac{1}{2} [E(\omega) \exp(i\omega t) + E^*(\omega) \exp(-i\omega t)] \quad (1-9)$$

قطبش غیرخطی متناظر با جایگذاری (۹-۱) در (۸-۱) به شکل زیر به دست می‌آید:

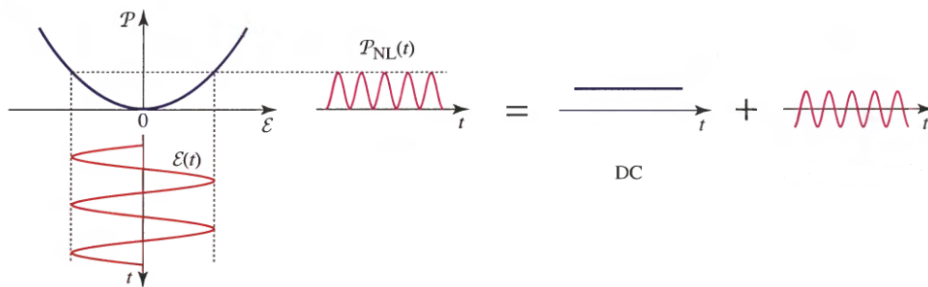
$$P_{NL}(t) = P_{NL}(\cdot) + \text{Re}\{P_{NL}(\omega) \exp(i\omega t)\} \quad (10-1)$$

که:

$$P_{NL}(\cdot) = dE(\omega)E^*(\omega) \quad (11-1)$$

$$P_{NL}(\omega) = dE^2(\omega) \quad (12-1)$$

این فرایند در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل ۲-۱: یک میدان الکتریکی سینوسی با فرکانس زاویه‌ای ω در یک محیط اپتیکی غیرخطی

مرتبه دوم، یک مؤلفه ی قطبش در 2ω (هماهنگ مرتبه دوم) و یک مؤلفه ی پایا، تولید می‌کند.

۴-۱ اپتیک غیرخطی مرتبه سوم

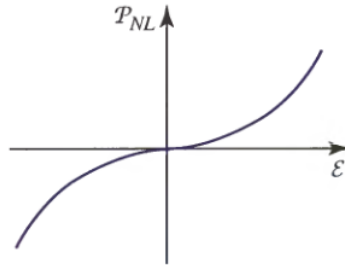
در یک محیط متقارن مرکزی، جمله غیرخطی مرتبه دوم حذف شده و جمله غیرخطی غالب،

جمله مرتبه سوم است:

$$P_{NL} = \chi^{(3)} E^3 \quad (13-1)$$

چنین ماده‌ای یک محیط کر نامیده می‌شود. واکنش محیط کر به میدان اپتیکی، تولید هارمونیک

سوم و جمع و تفریق فرکانس‌های سه تایی است [۲].



شکل ۱-۳: اثر غیرخطی مرتبه سوم.

واکنش یک محیط غیرخطی مرتبه سوم به یک میدان اپتیکی تکفام به شکل زیر:

$$E(t) = \text{Re}\{E(\omega) \exp(i\omega t)\} \quad (14-1)$$

ایجاد یک قطبش غیرخطی P_{NL} ، شامل یک مؤلفه فرکانسی ω و مؤلفه فرکانسی دیگر با 3ω است:

$$P_{NL}(\omega) = 3\chi^{(3)} |E(\omega)|^2 E(\omega) \quad (15-1)$$

$$P_{NL}(3\omega) = \chi^{(3)} E^3(\omega) \quad (16-1)$$

حضور مؤلفه قطبش با فرکانس 3ω ، نشان می‌دهد که هارمونیک سوم نوری، تولید شده است.

۱-۵ اثر اپتیکی کر

مؤلفه قطبش با فرکانس ω در رابطه (۱۵-۱) متناظر با تغییر افزایشی پذیرفتاری $\Delta\chi$ در فرکانس

ω می‌باشد:

$$\varepsilon \cdot \Delta\chi = \frac{P_{NL}(\omega)}{E(\omega)} = 3\chi^{(3)} |E(\omega)|^2 = 6\chi^{(3)} \eta I \quad (17-1)$$

که $I = |E(\omega)|^2 / 2\eta$ شدت اپتیکی موج فرودی و η کارایی کوانتومی است.

از آنجا که $n^2 = 1 + \chi$ است، $2n\Delta n = \Delta\chi$ می‌باشد. پس تغییرات ضریب شکست به اندازه زیر است:

$$\Delta n = \frac{3\eta}{\varepsilon \cdot n} \chi^{(3)} I \equiv n_3 I \quad (18-1)$$

که در این رابطه $n_3 = \frac{3\eta \cdot \chi^{(3)}}{n^2 \varepsilon}$ می‌باشد و ضریب اپتیکی کر نام دارد. پس تغییر ضریب شکست متناظر با شدت نور است. بنابراین ضریب شکست **کل**، یک تابع خطی از شدت اپتیکی I است:

$$n(I) = n + n_3 I \quad (19-1)$$

این اثر به عنوان اثر اپتیکی کر شناخته می‌شود. ضریب n_2 بر حسب cm/w در شیشه‌ها 10^{-16} تا 10^{-14} ، در شیشه‌های آلاینده 10^{-7} تا 10^{-14} ، در مواد آلی 10^{-8} تا 10^{-10} و در نیم‌رساناها 10^{-10} تا 10^{-2} می‌باشد. این ضریب به طول موج حساس است [۲].

۶-۱ مدولاسیون خودفازی^۱

به عنوان نتیجه‌ای از اثر اپتیکی کر، یک موج اپتیکی که در یک محیط غیرخطی مرتبه سوم حرکت می‌کند، متحمل مدولاسیون خودفازی می‌شود. این پدیده منجر به پهن شدن طیفی پالس‌های اپتیکی می‌شود. تغییر فاز ایجاد شده توسط یک پرتو اپتیکی با توان P و سطح مقطع A که مسافت L را در محیط طی می‌کند برابر است با [۱]:

$$\varphi = -n(I)k.L = -2\pi \left(n + n_2 \frac{P}{A} \right) \frac{L}{\lambda} \quad (20 - 1)$$

پس غیرخطی بودن عامل ایجاد تغییر فازی به اندازه

$$\Delta\varphi = -2\pi n_2 \frac{L}{\lambda.A} P \quad (21 - 1)$$

است که متناسب با توان اپتیکی P است. برای افزایش این اثر، L باید بزرگ و A کوچک باشد. این شرط در کاربرد موجبرهای اپتیکی به خوبی به کار گرفته می‌شود.

۷-۱ بهره رامان

ضریب پذیرفتاری مرتبه سوم به طور کلی ضریبی مختلط به شکل $\chi^{(3)} = \chi_R^{(3)} + i\chi_I^{(3)}$ است، در نتیجه اثر خودفازی که با معادله (۲۱-۱) بیان می‌شود، مختلط خواهد بود. بنابراین عامل فاز انتشار یعنی $\exp(-i\varphi)$ ترکیبی از تغییر فاز $(\chi_R^{(3)}/n)(L/\lambda.A)P$ و بهره به شکل $\exp(1/2)\gamma_R L$ است. ضریب بهره γ_R که ضریب بهره رامان نامیده شده به صورت زیر بیان می‌شود:

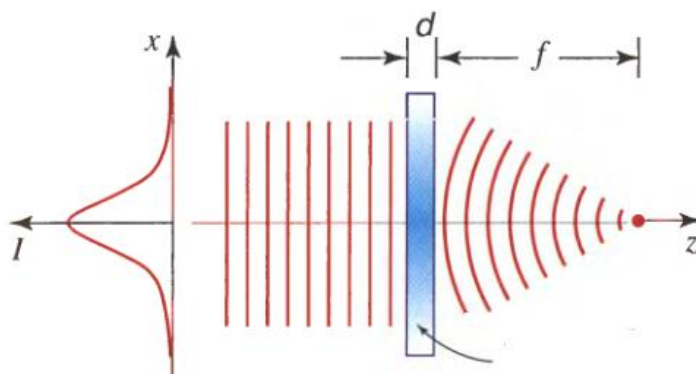
$$\gamma_R = \frac{12\pi\eta}{\epsilon.} \frac{\chi_I^{(3)}}{n} \frac{1}{\lambda.} \frac{P}{A} \quad (22 - 1)$$

^۱ Self Phase Modulation

منشأ اثر بهره رامان در جفت‌سازی نور به مدهای ارتعاشی ماده است که می‌تواند مانند یک چشمه انرژی عمل کند. زمانی که این بهره بر اتلاف محیط غلبه کند، محیط قادر است مانند یک تقویت‌کننده نوری عمل کند و با یک بازخورد مناسب تقویت‌کننده رامان به لیزر رامان تبدیل شود [۱].

۸-۱ خودکانونی^۲

اثر جالب دیگری که در ارتباط با مدولاسیون خودفازی است، خودکانونی می‌باشد. اگر یک پرتو نوری شدید از یک محیط غیرخطی با اثر اپتیکی کر عبور کند، تغییر ضریب شکست از الگوی شدت نور در صفحه عرضی (صفحه عمود بر راستای انتشار) طبق شکل (۴-۱) پیروی می‌کند [۱]. اگر پرتو در مرکز بیشترین شدت را داشته باشد، تغییر ضریب شکست نیز در مرکز بیشینه است. یعنی طبق رابطه (۱۹-۱) در صورت مثبت بودن n_2 افزایش شدت پرتو، ضریب شکست را زیاد می‌کند. تحت چنین شرایطی محیط مثل یک عدسی همگرا رفتار می‌کند که باعث می‌شود پرتوها به سمت یکدیگر خم شوند [۲].



شکل ۴-۱: یک محیط غیرخطی مرتبه سوم مثل یک عدسی رفتار می‌کند که هم‌گرایی آن به شدت پرتو فرودی بستگی دارد.

^۲ Self Focusing

فصل دوم

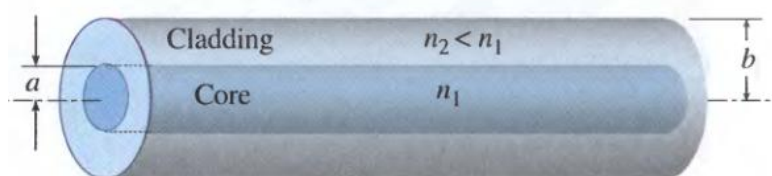
فیبِر نوری

مقدمه

گسترش ارتباطات راه دور و راحتی انتقال اطلاعات از طریق سیستم‌های انتقال و مخابرات فیبر نوری، یکی از **پراهمیت‌ترین** موارد مورد بحث در جهان امروز است. سرعت، دقت و تسهیل از مهم‌ترین ویژگی‌های مخابرات فیبر نوری می‌باشد. ایده استفاده از انکسار (شکست) برای هدایت نور (که اساس فیبرهای نوری امروزی است) برای اولین بار در سال ۱۸۴۰ توسط کلادن^۳ و بایننت^۴ در پاریس پیشنهاد شد. همچنین تیندال^۵ در سال ۱۸۷۰ در کتاب خود ویژگی بازتاب کلی را شرح داد. در سال ۱۹۶۶ میلادی، دانشمندان در این نظریه که نور در الیاف شیشه‌ای هدایت می‌شود، پیشرفت کردند که حاصل آن از **کابل‌های** معمولی بسیار سودمندتر بود. چرا که فیبرنوری بسیار سبک‌تر و ارزان‌تر از کابل مسی است و در عین حال ظرفیت انتقالی تا چندین هزار برابر کابل مسی دارد. توسعه فناوری فیبرنوری از سال ۱۹۸۰ میلادی به بعد باعث شد که همواره مخابرات نوری بعنوان یک انتخاب مناسب مطرح باشد.

۱-۲ فیبر نوری

فیبر نوری، یک موجبر دی‌الکتریک استوانه‌ای است که از یک ماده کم اتلاف مثل شیشه سیلیکا ساخته شده است. هسته مرکزی فیبر که نور در آن منتشر می‌شود در یک پوشش خارجی، با ضریب-شکست کمتر تعبیه شده است [۱].



شکل ۱-۲: فیبر نوری یک موجبر دی‌الکتریک استوانه‌ای با یک هسته ی داخلی و غلاف خارجی است.

^۳ Colladon

^۴ Babinet

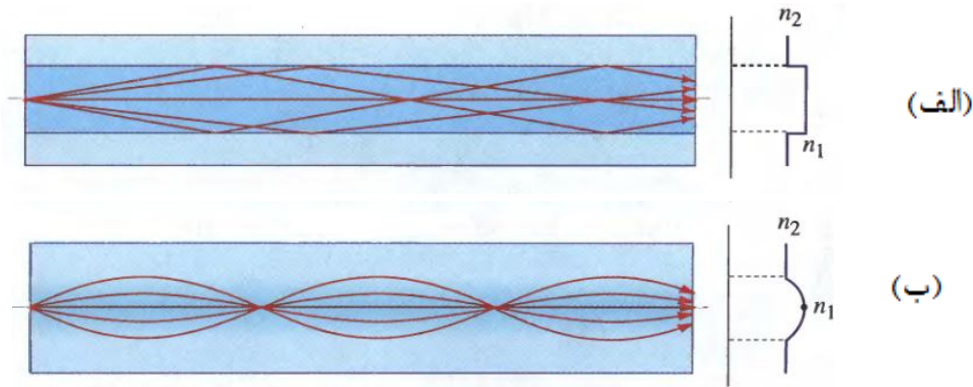
^۵ Tyndall

پرتوهای فرودی نور در مرز هسته- غلاف در زوایای بزرگ‌تر از زاویه بحرانی، متحمل بازتاب کلی می‌شوند و درون هسته منتشر می‌شوند. پرتوهایی که بیشتر از محور فیبر منحرف می‌شوند، قسمتی از توان خود را در هر شکست از دست می‌دهند و در نهایت منتشر نمی‌شوند.

در دو دهه گذشته پیشرفت‌های قابل توجهی در ساخت فیبرهای نوری منجر به هدایت نور تا فاصله ۱ km با اتلاف کمی حدود (۳/۴%) شده است. به دلیل این اتلاف کم، فیبرهای نوری جایگزین کابل‌های هم‌محور مسی شدند.

در موجبرهای استوانه‌ای، انتشار نور به شکل مد است. هر مد در امتداد محور موجبر با یک ثابت انتشار و سرعت گروه مشخص منتشر می‌شود، ضمن این‌که قطبش و توزیع فضایی عرضی خودش را حفظ می‌کند. وقتی که قطر هسته کوچک باشد، تنها یک مد منتشر می‌شود و چنین فیبری، فیبر تک‌مد نامیده می‌شود. فیبرهای با قطر هسته بزرگ، فیبرهای چندمدی هستند. یکی از مشکلات مربوط به انتشار نور در فیبرهای چندمدی، تفاوت بین سرعت‌های گروه مدهاست. این منجر به افزایش زمان حرکت و پهن شدن پالس نوری در حین انتشار در فیبر می‌شود. این اثر، پاشندگی **مدی** نامیده می‌شود. بنابراین، پاشندگی **مدی** سرعت عملکرد سیستم‌های مخابراتی فیبر اپتیکی **چندمدی** را محدود می‌کند. پاشندگی **مدی** می‌تواند با کاهش تدریجی ضریب شکست هسته فیبر از یک مقدار بیشینه در مرکز به یک مقدار کمینه در مرز هسته - غلاف، کاهش یابد. به چنین فیبری، فیبر ضریب تدریجی گفته می‌شود، درحالی‌که فیبرهای معمولی با ضریب شکست ثابت هسته و غلاف، فیبرهای ضریب پله‌ای نامیده می‌شوند. در یک فیبر ضریب تدریجی، سرعت حرکت با افزایش شعاع یا کاهش ضریب شکست، افزایش می‌یابد. پرتوهایی که انحراف بیشتری از محور فیبر دارند، باید جلوتر و در نتیجه تندتر حرکت کنند. این باعث می‌شود که زمان حرکت مدهای مختلف، تعدیل شود.

به‌طور خلاصه، فیبرهای اپتیکی به دو دسته فیبرهای ضریب تدریجی و فیبرهای ضریب پله‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند.



شکل ۲-۲: الف) فیبر اپتیکی ضریب پله‌ای (ب) فیبر اپتیکی ضریب تدریجی.

دو پارامتری که یک فیبر نوری را توصیف می‌کند، اختلاف نسبی ضریب‌های شکست هسته-

غلاف و پارامتر V می‌باشد که به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1 - 2)$$

$$V = k \cdot a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2 - 2)$$

در رابطه بالا $k = 2\pi/\lambda$ و a شعاع هسته است. پارامتر V تعداد مدهای هدایت شده توسط

فیبر را نشان می‌دهد. در یک فیبر ضریب پله‌ای در صورتیکه $V < 2.405$ باشد، تنها یک مد هدایت

می‌شود و فیبرهایی که این شرط را دارند، فیبرهای تک‌مد نامیده می‌شوند و در صورتی که $V >$

2.405 باشد، فیبر چندمد خواهد بود [۳].

۲-۲ اتلاف فیبر

یکی از پارامترهای مهم فیبر، اندازه‌گیری توان اتلافی حین انتقال سیگنال‌های اپتیکی درون فیبر

است. اگر P توان اولیه یک فیبر با طول L باشد، توان عبوری P_T به شکل زیر است.

$$P_T = P \cdot \exp(-\alpha L) \quad (3 - 2)$$

که ثابت تضعیف α ضریب اتلاف کل است. مرسوم است که α را در واحد dB/km طبق رابطه زیر

معرفی کنیم:

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log\left(\frac{P_T}{P}\right) = 4.343\alpha \quad (4 - 2)$$