دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - الکترونیک

مدل سازی و شبیه سازی موجبرهای کریستال فوتونی غیرخطی

امیر خدابخش

استاد راهنما:

دکتر محمدکاظم مروج فرشی

بهمن ۱۳۸۷

چکیده

در این پایان نامه به بررسی نمودار نوار ساختارهای کامل کریستال فوتونی غیرخطی و نیز روابط پاشندگی موجبرهای عادی و موجبرهای مبتنی بر کاواک های جفت شده کریستال فوتونی غیرخطی می پردازیم. اثر غیرخطی در نظر گرفته شده برای این ساختارها اثر کِر یا ضریب شکست غیرخطی وابسته به شدت است و برای شبیه سازی از الگوریتم تفاضل متناهی در حوزه زمان بهره برده ایم. این الگوریتم برای در نظر گرفتن ساختارهای غیرخطی اصلاح شده است. علاوه بر رسم روابط پاشندگی برای انواع موجبرها، منحنی های سرعت گروه و پاشندگی سرعت گروه آنها نیز به ازای شدت میدان های اعمالی مختلف در حالت غیرخطی بدست آمده اند.

ابتدا با در آمدی بر اپتیک غیرخطی و توضیحاتی درباره اثر کر و ضریب شکست غیرخطی، روابط مورد نیاز برای شبیه سازی ساختارهای غیرخطی استخراج شده اند و سپس در آمدی بر ساختارهای کریستال فوتونی و ادوات مبتنی بر آنها خواهیم داشت. در مرحله بعد الگوریتم تفاضل متناهی در حوزه زمان برای ساختارهای خطی، دسته بندی مسائل مربوطه و چگونگی بدست آوردن نمودار نوار و روابط پاشندگی با استفاده از این روش ارائه شده است. در ادامه درباره نحوه اصلاح و گسترش الگوریتم تفاضل متناهی در حوزه زمان برای در نظر گرفتن ساختارهای غیرخطی بحث و در نهایت نتایج شبیه سازی ها و توضیحات مربوطه ارائه شده است.

واژه های کلیدی: کریستال فوتونی، اثر غیر خطی کِر، ضریب شکست وابسته به شدت، تفاضل متناهی در حوزه زمان، نمودار نوار، رابطه پاشندگی، موجبر کریستال فوتونی، موجبر کاواک های جفت شده، موجبر نوری تشدید کننده های جفت شده

فهرست مطالب

صفحه عنوان الف

چکیده ب

فهرست مطالب ج

فهرست شکل‌ها و جدول‌ها ه

مقدمه ل

فصل ۱ : اپتیک غیرخطی

۱-۱- در آمدی بر اپتیک غیرخطی ۱

۱-۲- ضریب شکست غیرخطی (اثر کر) ۴

فصل ۲ : کریستال های فوتونی و روش های عددی

۲-۱- در آمدی بر کریستال‌های فوتونی ۸

۲-۱-۱- معرفی ۸

۲-۱-۲- معادلات ماکسول در محیط متناوب ۱۱

۲-۱-۳- امواج بلاخ و نواحی بریلیون ۱۳

۲-۱-۴- علت ایجاد شکاف نوار فوتونی ۱۴

۲-۱-۵- روش‌های محاسباتی در کریستال فوتونی ۱۸

۲-۱-۶- کریستال‌های فوتونی دو بعدی ۱۹

۲-۱-۷- تیغه‌های کریستال فوتونی ۲۱

۲-۱-۸- کریستال‌های فوتونی سه بعدی ۲۳

۲-۱-۹- کاواک‌های کریستال فوتونی ۲۷

۲-۱-۱۰- موجبرهای کریستال فوتونی ۲۹
۲-۲- روش‌های عددی در تحلیل کریستال‌های فوتونی ۳۰
۲-۲-۱- روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD) ۳۰
۲-۳- بدست آوردن ساختار نوار از روش FDTD ۴۰
۲-۳-۱- شرایط مرزی و منابع در مسائل کریستال فوتونی ۴۰
۲-۳-۲- بدست آوردن ساختار نوار ۴۸

فصل ۳ : شبیه سازی کریستال های فوتونی غیر خطی

۳-۱- الگوریتم FDTD برای ساختارهای غیرخطی ۵۴
۳-۲- شبیه سازی کریستال‌های فوتونی غیرخطی ۶۲
۳-۳- شبیه سازی موجبرهای کریستال فوتونی غیرخطی ۶۶
۳-۴- شبیه سازی موجبرهای CCW کریستال فوتونی غیرخطی ۷۳

فصل ۴ : نتیجه گیری و پیشنهادها

۴-۱- نتیجه گیری ۸۶
۴-۲- پیشنهادها ۸۸
مراجع ۸۹

پیوست ها

پیوست ۱ : واژگان از فارسی به انگلیسی ۹۲
پیوست ۲ : واژگان از انگلیسی به فارسی ۹۶
چکیده انگلیسی ۱۰۰
صفحه عنوان انگلیسی ۱۰۱

فهرست شکل ها و جدول ها

جدول ۱-۱: برخی از فرآیندهای فیزیکی قادر به تغییرات غیرخطی در ضریب شکست همراه با مقادیر نوعی n_2، $\chi^{(3)}$ و نیز مقیاس زمانی برای ایجاد پاسخ غیرخطی ۷

جدول ۱-۲: ضرایب غیرخطی مرتبه سوم برخی مواد رایج در ادوات اپتیکی ۷

شکل ۲-۱: دو نمونه از کریستال های عادی و فوتونی و نیز ساختار نوار انرژی آنها ۹

شکل ۲-۲: دو نمونه از کریستال های فوتونی طبیعی (الف) در بال نوعی پروانه (ب) پر طاووس ۱۰

شکل ۲-۳: شکل های نمادین از کریستال های فوتونی در یک، دو و سه بعد که ساختار تناوبی در آنها مشخص است. ۱۱

شکل ۲-۴: (الف) رابطه پاشندگی (یا ساختار نوار) فرکانس بر حسب عدد موج، برای یک ساختار یکنواخت یک بعدی که در آن خطوط بریده نشانگر "تا خوردگی" در اثر اعمال نظریه بلاخ با تناوب مصنوعی a هستند و (ب) نمایشی از چگونگی ساختار نوار یک ساختار دی الکتریک متناوب واقعی (شکل کوچک راست و بالا) که در آن شکاف های نوار در اثر شکستن تبهگنی در مرزهای ناحیه بریلیون ایجاد شده است. ۱۵

شکل ۲-۵: شمایی از چگونگی شکل گیری شکاف نوار در یک بعد. امواج تخت تبهگن یک محیط یکنواخت در اثر اختلال متناوب در ثابت دی الکتریک به دو موج ایستای سینوسی و کسینوسی تبدیل می شوند که به ترتیب لبه بالا و پایین شکاف نوار را پدید می آورند. ۱۶

شکل ۲-۶: نمودار نوار و گاف نوار فوتونی برای آرایش شش ضلعی از میله های دی الکتریک در هوا (شکل بالا) و حفره های هوایی در دی الکتریک (شکل پایین). فرکانس ها حول مرزهای ناحیه بریلیون ناکاستنی (مثلث تیره در شش ضلعی منتظم میانی) رسم شده اند. خطوط ممتد قرمز نمایش دهنده قطبش TE و خطوط بریده آبی نمایش دهنده قطبش TM هستند. ۲۰

شکل ۲-۷: نمودار نوار تصویر شده برای تیغه ای با ضخامت محدود (0.5a) متشکل از حفره های هوایی در دی الکتریک. ناحیه تیره شده مخروط نور است یعنی تصویر تمامی حالاتی که در هوا قابلیت انتشار دارند. خطوط ممتد قرمز و بریده آبی مود های انتشار – که در تیغه محصور شده اند – را نمایش می دهند. خطوط ممتد قرمز مود های زوج و خطوط بریده آبی مود های فرد را نسبت به صفحه تقارن افقی تیغه نمایش می دهند، که قطبش آنها به ترتیب شبه TE و شبه TM است. در مود انتشاری شبه TE یک گاف نوار

ملاحظه می شود. ۲۲

شکل ۲-۸: نمودار نوار (سمت راست بالا) برای ساختار کریستال فوتونی (سمت چپ بالا) مشتمل بر پشته ای یکی در میان از تیغه های کریستال فوتونی استوانه ای و حفره ای. شمای پیاده سازی شده ساختار در عمل (پایین) و ناحیه بریلیون ناکاستنی در تصویر داخلی راست بالا مشخص است. ساختار دارای گاف نوار ۲۱٪ در جهات مختلف است. ۲۴

شکل ۲-۹: سه نوع آرایش مختلف کریستال فوتونی سه بعدی و نمودار نوار آنها. (الف) ساختار چوب بست مربعی (ب) ساختار اپال معکوس و (ج) ساختار ترکیبی GLAD ۲۶

شکل ۲-۱۰: شکل شماتیک از فیلتر جدا کننده کانال کاواک – تشدیدی ۲۸

شکل ۲-۱۱: ساختار کریستال فوتونی فیلتر جدا کننده کانال با استفاده از دو کاواک ۲۸

شکل ۲-۱۲: الگوی میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی هنگام عبور از یک خم تیز درون کریستال فوتونی ۲۹

شکل ۲-۱۳: نحوه گسسته سازی فضای دو بعدی در روش تفاضل متناهی، (الف) برای قطبش الکتریکی و (ب) برای قطبش مغناطیسی ۳۳

شکل ۲-۱۴: گسسته سازی میدان های الکتریکی و مغناطیسی در شبکه یی در سه بعد ۳۴

شکل ۲-۱۵: سلول واحد و اَبَر سلول مورد تحلیل در خانواده ۱ از مسایل کریستال های فوتونی؛ (الف) کریستال فوتونی کامل، (ب) آرایه تشدید کننده های جفت شده یا CRA کریستال فوتونی. در دو حالت در هر چهار سمت شرط مرزی متناوب یا بلاخ اعمال می شود. ۴۱

شکل ۲-۱۶: نمایش مرزها و محل اعمال شرایط مرزی متناوب برای کریستال فوتونی کامل ۴۲

شکل ۲-۱۷: نمایش چگونگی اعمال شرایط مرزی متناوب ۴۲

شکل ۲-۱۸: نمونه هایی از مسائل خانواده ۲؛(الف) موجبر کریستال فوتونی، (ب) موجبر کاواک های جفت شده ۴۳

شکل ۲-۱۹: نمونه ای از مسائل خانواده ۳؛ در این شکل دو محور تقارن وجود دارد که می توان از آنها برای کم کردن حجم محاسبات استفاده کرد. ۴۳

شکل ۲-۲۰: نمونه ای از مسائل خانواده ۴؛ از محور تقارن شکل می توان برای کم کردن محاسبات بهره برد. ۴۴

شکل ۲-۲۱: نمونه ای از شرط مرزی متناوب برای چهار جهت یک سلول واحد کریستال فوتونی مربعی. دایره روشن مرکزی نمایانگر مرز استوانه دی الکتریک با محیط هواست و پارامتر نمایش داده شده مولفه z میدان الکتریکی است، که نقش میدان اولیه را برای قطبش TM بازی می‌کند. شکل ها به ترتیب پیشرفت زمانی مرتب شده اند. ۴۶

شکل ۲-۲۲: نمونه ای از شرط مرزی شفاف برای چهار جهت یک سلول واحد کریستال فوتونی مربعی. دایره روشن مرکزی نمایانگر مرز استوانه دی الکتریک با محیط هواست و پارامتر نمایش داده شده مولفه z میدان الکتریکی است، که نقش میدان اولیه را برای قطبش TM بازی می‌کند. شکل ها به ترتیب پیشرفت زمانی مرتب شده اند. ۴۷

شکل ۲-۲۳: نمونه ای از شکل موج میدان ذخیره شده در روش تفاضل متناهی در حوزه زمان ۴۹

شکل ۲-۲۴: نمونه ای از تبدیل فوریه سریع میدان ذخیره شده، کل زمان شبیه سازی 2^{14} گام زمانی است. ۵۰

شکل ۲-۲۵: نمونه ای از تبدیل فوریه سریع میدان ذخیره شده شکل ۲-۲۵ با این تفاوت که کل زمان شبیه سازی در اینجا 2^{12} گام زمانی است. ۵۰

شکل ۲-۲۶: (الف) نمونه ای از ساختار نوار رسم شده برای مد TM یک کریستال فوتونی مربعی که گاف نوار فوتونی TM این ساختار با هاشور مشخص شده (ب) شکل کریستال فوتونی که قسمت سایه دار سلول واحد ساختار بوده، (ج) ناحیه بریلیون ساختار که قسمت سایه دار ناحیه بریلیون ناکاستنی آن است. ۵۱

شکل ۲-۲۷: نمودارهای نوار به ازای چهار نقطه ذخیره میدان متفاوت برای ساختار کریستال فوتونی مربعی شکل ۲-۲۶ ۵۳

شکل ۲-۲۸: نمودار نوار ساختار بعد از پردازش و مقایسه نمودارهای شکل ۲-۲۷ ۵۳

شکل ۳-۱: ساختار کریستال فوتونی دو بعدی مربعی. ثابت تناوب ساختار a و شعاع استوانه های دی الکتریک r است. مربع قرمز رنگ سمت چپ پایین سلول واحد ساختار است. ۶۱

شکل ۳-۲: (الف) نمودار ساختار نوار، سلول واحد و ناحیه بریلیون یک کریستال فوتونی مربعی متشکل از استوانه های دی الکتریک خطی با $\varepsilon_r = 8.9$ و شعاع $r = 0.2a$ در محیط هوا $(\varepsilon_r = 1)$ ، (ب) نمودار ساختار نوار همین کریستال فوتونی با استفاده از الگوریتم غیرخطی FDTD پیاده سازی شده با فرض $\chi^{(3)} = 0$. ۶۲

شکل ۳-۳: (الف) نمودار ساختار نوار یک کریستال فوتونی مربعی متشکل از حفره های هوا با شعاع $r = 0.48a$ در محیط دی الکتریک خطی با $\varepsilon_r = 11.56$ توسط نرم افزار RSoft با استفاده از روش بسط امواج تخت، (ب) نمودار ساختارنوار همین کریستال فوتونی با استفاده از الگوریتم غیرخطی FDTD پیاده سازی شده با فرض $\chi^{(3)} = 0$. ۶۳

شکل ۳-۴: (الف) نمودار ساختار نوار یک کریستال فوتونی مربعی خطی ($\chi^{(3)} = 0$) مشتمل بر استوانه های دی الکتریک ($\varepsilon_r = 11.56$) با شعاع $r = 0.2a$ در هوا ($\varepsilon_r = 1$) برای سه نوار اول با استفاده از روش FDTD غیر خطی که گاف نوار فوتونی آن با هاشور مشخص شده است. (ب) شکل سطح مقطع کریستال فوتونی دو بعدی شبیه سازی شده که قسمت سایه دار سلول واحد ساختار بوده، (ج) ناحیه بریلیون اول ساختار که قسمت سایه دار ناحیه بریلیون ناکاستنی آن است. ۶۴

شکل ۳-۵: نمودار نوار قطبش TM یک کریستال فوتونی مربعی غیر خطی ($\chi^{(3)} = 2\times10^{-18}\ \mathrm{m^2/V^2}$) مشتمل بر استوانه های دی الکتریک ($\varepsilon_r = 11.56$) با شعاع $r = 0.2a$ در هوا ($\varepsilon_r = 1$) برای سه نوار نخست با استفاده از روش FDTD غیر خطی. شدت میدان الکتریکی اولیه به ترتیب برابر با (الف) 0.5 $\mathrm{GW/cm^2}$، (ب) 10 $\mathrm{GW/cm^2}$ و (ج) 25 $\mathrm{GW/cm^2}$ است، (د) نقشه گاف نوار را بر حسب شدت میدان الکتریکی اولیه نمایش می دهد. ۶۵

شکل ۳-۶: نمودار های نوار قطبش TM یک کریستال فوتونی مربعی غیر خطی ($\chi^{(3)} = 2\times10^{-18}\ \mathrm{m^2/V^2}$) مشتمل بر استوانه های دی الکتریک ($\varepsilon_r = 11.56$) با شعاع $r = 0.2a$ در هوا ($\varepsilon_r = 1$) برای سه نوار نخست با استفاده از روش FDTD غیر خطی به ازای سه شدت میدان اولیه متفاوت. ۶۶

شکل ۳-۷: (الف) رابطه پاشندگی یک موجبر کریستال فوتونی W1 خطی ($\chi^{(3)} = 0$) مشتمل بر نقص خطی در استوانه های دی الکتریک ($\varepsilon_r = 11.56$) با شعاع $r = 0.2a$ در هوا ($\varepsilon_r = 1$) با استفاده از الگوریتم FDTD غیرخطی. (ب) سطح مقطع موجبر کریستال فوتونی شبیه سازی شده که در آن ناحیه شبیه سازی با هاشور مشخص شده است. ۶۷

شکل ۳-۸: (الف) رابطه پاشندگی یک موجبر کریستال فوتونی W1 غیر خطی ($\chi^{(3)} = 2\times10^{-18}\ \mathrm{m^2/V^2}$) مشتمل بر نقص خطی در استوانه های دی الکتریک ($\varepsilon_r = 11.56$) با شعاع $r = 0.2a$ در هوا ($\varepsilon_r = 1$) با استفاده از الگوریتم FDTD غیرخطی برای سه شدت میدان اولیه مختلف (ب) رابطه پاشندگی بزرگ شده بدون در نظر گرفتن نوارهای تا خورده. ۶۸

شکل ۳-۹: سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر غیر خطی شکل ۳-۷ بر حسب بردار موج به ازای

شدت های مختلف ۶۹

شکل ۳-۱۰: سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر غیر خطی شکل ۳-۷ بر حسب فرکانس به ازای شدت های مختلف ۶۹

شکل ۳-۱۱: سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر غیر خطی شکل ۳-۷ بر حسب طول موج به ازای شدت های مختلف ۷۰

شکل ۳-۱۲: پاشندگی سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر غیر خطی شکل ۳-۷ بر حسب بردار موج به ازای شدت های مختلف ۷۱

شکل ۳-۱۳: پاشندگی سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر غیر خطی شکل ۳-۷ بر حسب فرکانس به ازای شدت های مختلف ۷۱

شکل ۳-۱۴: پاشندگی سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر غیر خطی شکل ۳-۷ بر حسب طول موج به ازای شدت های مختلف ۷۲

شکل ۳-۱۵: رابطه پاشندگی موجبر شکل ۳-۷ با پارامترهای یکسان و تغییر کل زمان شبیه سازی از 2^{16} گام به 2^{14} گام زمانی ۷۲

شکل ۳-۱۶: (الف) سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر غیر خطی شکل ۳-۱۵ بر حسب فرکانس (ب) پاشندگی سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر غیر خطی شکل ۳-۱۵ بر حسب فرکانس ۷۳

شکل ۳-۱۷: نمونه هایی از موجبر کاواک های جفت شده در کریستال فوتونی دو بعدی مربعی. ۷۴

شکل ۳-۱۸: ناحیه شبیه سازی و شرایط مرزی برای موجبرهای کاواک های جفت شده (الف) L=2a، (ب) L=3a و (ج) L=4a . ۷۵

شکل ۳-۱۹: (الف) رابطه پاشندگی یک موجبر کاواک های جفت شده کریستال فوتونی L=2 غیر خطی ($\chi^{(3)} = 2\times10^{-18}\,\mathrm{m^2/V^2}$) مشتمل بر نقص خطیِ نقطه ای در استوانه های دی الکتریک ($\varepsilon_r = 11.56$) با شعاع $r = 0.2a$ در هوا ($\varepsilon_r = 1$) با استفاده از الگوریتم FDTD غیرخطی به ازای سه شدت میدان مختلف (ب) سطح مقطع موجبر کاواک های مزدوج کریستال فوتونی شبیه سازی شده که در آن ناحیه شبیه سازی با هاشور مشخص شده است. ۷۶

شکل ۳-۲۰: سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=2 شکل

۳-۹ بر حسب فرکانس به ازای شدت های مختلف ۷۶

شکل ۳-۲۱: سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=2 شکل ۳-۱۹ بر حسب طول موج به ازای شدت های مختلف ۷۷

شکل ۳-۲۲: پاشندگی سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=2 شکل ۳-۱۹ بر حسب فرکانس به ازای شدت های مختلف ۷۷

شکل ۳-۲۳: پاشندگی سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=2 شکل ۳-۱۹ بر حسب طول موج به ازای شدت های مختلف ۷۸

شکل ۳-۲۴: (الف) رابطه پاشندگی یک موجبر کاواک های جفت شده کریستال فوتونی L=3 غیر خطی ($\chi^{(3)} = 2\times10^{-18}\,\mathrm{m^2/V^2}$) مشتمل بر نقص خطیِ نقطه ای در استوانه های دی الکتریک ($\varepsilon_r = 11.56$) با شعاع $r = 0.2a$ در هوا ($\varepsilon_r = 1$) با استفاده از الگوریتم FDTD غیرخطی به ازای سه شدت میدان مختلف (ب) سطح مقطع موجبر کاواک های مزدوج کریستال فوتونی شبیه سازی شده که در آن ناحیه شبیه سازی با هاشور مشخص شده است. ۷۹

شکل ۳-۲۵: سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=3 شکل ۳-۲۴ بر حسب فرکانس به ازای شدت های مختلف ۸۰

شکل ۳-۲۶: سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=3 شکل ۳-۲۴ بر حسب طول موج به ازای شدت های مختلف ۸۰

شکل ۳-۲۷: پاشندگی سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=3 شکل ۳-۲۴ بر حسب فرکانس به ازای شدت های مختلف ۸۱

شکل ۳-۲۸: پاشندگی سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=3 شکل ۳-۲۴ بر حسب طول موج به ازای شدت های مختلف ۸۱

شکل ۳-۲۹: (الف) رابطه پاشندگی یک موجبر کاواک های جفت شده کریستال فوتونی L=4 غیر خطی ($\chi^{(3)} = 2\times10^{-18}\,\mathrm{m^2/V^2}$) مشتمل بر نقص خطیِ نقطه ای در استوانه های دی الکتریک ($\varepsilon_r = 11.56$) با شعاع $r = 0.2a$ در هوا ($\varepsilon_r = 1$) با استفاده از الگوریتم FDTD غیرخطی به ازای سه شدت میدان مختلف (ب) سطح مقطع موجبر کاواک های مزدوج کریستال فوتونی شبیه سازی شده که در آن ناحیه شبیه سازی با هاشور مشخص شده است. ۸۲

شکل ۳-۳۰: سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=4 شکل ۲۹-۳ بر حسب فرکانس به ازای شدت های مختلف ۸۳

شکل ۳-۳۱: سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=4 شکل ۲۹-۳ بر حسب طول موج به ازای شدت های مختلف ۸۳

شکل ۳-۳۲: پاشندگی سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=4 شکل ۲۹-۳ بر حسب فرکانس به ازای شدت های مختلف ۸۴

شکل ۳-۳۳: پاشندگی سرعت گروه روابط پاشندگی موجبر کاواک های جفت شده غیر خطی L=4 شکل ۲۹-۳ بر حسب طول موج به ازای شدت های مختلف ۸۴

مقدمه

اپتیک غیر خطی کاربرد گسترده ای در بسیاری از زمینه ها همانند مخابرات و پـردازش نـوری پیدا کرده است[۱]. با استفاده از مواد اپتیکی غیر خطی می تـوانیم امـواج الکترومغناطیـسی را بـه صورت تمام نوری کنترل کنیم که این امر به نوبه خود می تواند به پردازش سیگنال تمـام اپتیکـی منجر گردد. علاوه براین اپتیک غیر خطی مزایای دیگری نیز دارد که قابلیت جبران سازی پاشندگی خطـی و اثـرات پـراش ماننـد آنچـه در سـالیتون هـای زمـانی و مکـانی بـه کـار مـی رونـد، از آن جمله اند[۲]. با استفاده از خواص غیرخطی مواد گوناگون، کلیدهای اپتیکی و مدولاتورها نیز ساخته شده و کاربردهای گسترده ای در صنایع مخابراتی یافته اند[۳و۴]. پیاده سازی منطق تمام نوری بر اساس برهمکنش های غیر خطی هدفی مهم در پژوهش های اخیر است. یکی از روش های ممکـن برای دستیابی به منطق تمام نوری استفاده از ویژگی های غیرخطی درجه سوم $\chi^{(3)}$ مواد است کـه در آنها دو مود قطبش مغناطیسی (یا TE) و الکتریکی (یا TM) در صورت حضور همزمان قادر بـه تبادل انرژی بین یکدیگر هستند. این جفت شدن بین دو مود قطـبش در موجبرهـای نیمـه هـادی تخت یک جهته است یعنی انرژی الکترومغناطیسی تنهـا تمایـل بـه تبـدیل از مـود الکتریکـی بـه مغناطیسی دارد. برای مثال گیت های تمام نوری مبتنی بر ترکیـب چهـارموج توسـط گـروه هـای مختلف بررسی شده است[۷-۵]، اما هنوز نتایج قابل قبولی ارائه نشده و بررسی هـا نیـز بجـای طراحی المان های واقعی به مدل سـازی نظـری و پیـاده سـازی سیـستمی محـدود گـشته اسـت. مهم‌ترین نقص این سیستم ها آن اسـت کـه ایجـاد منطـق تمـام نـوری نیـاز بـه منـابع نـوری در فرکانس های مختلف دارد.

اخیراً ساختارهای کریستال فوتونی نیز به صورت گسترده در مقالات بررسی شـده انـد[۱۳-۸]. یکی از مهمترین ویژگی های ساختارهای کریستال فوتونی آن است که وقتی تفاوت ضریب شکست

دو ماده تشکیل دهنده کریستال فوتونی به اندازه کافی بزرگ باشد، ساختار دارای یک گاف فوتونی خواهد بود، یعنی به ازای بازه فرکانسی خاصی امواج الکترومغناطیسی قادر به انتشار در این ساختار نخواهند بود[۱۸-۱۴]. دیگر ویژگی جالب ساختارهای کریستال فوتونی قابلیت شگفت انگیز کنترل انتشار امواج الکترومغناطیسی درون این ساختارهاست، همانند آنچه که در خم های تیز[۱۹] ، کاواک های اپتیکی در ابعاد نانو[۲۰] و فیلترهای اپتیکی[۲۱] بررسی شده است. بنابراین پردازش اپتیکی اطلاعات در کریستال فوتونی تبدیل به موضوعی مورد علاقه و رایج گشته است. انتظار می رود که ساختارهای کریستال فوتونی با استفاده از فرآیندهای اپتیک غیرخطی قادر به انجام اعمال اساسی منطقی باشند. از آنجایی که ساختارهای کریستال فوتونی می توانند مودهای الکترومغناطیسی با پروفایل مودی یکتا و ویژگی های بسیار متفاوت پاشندگی داشته باشند، استفاده از مواد غیرخطی در ساختارهای کریستال فوتونی منجر به پدیده های غیرخطی اپتیکی بسیار جالبی شده است[۳۲-۲۲]. در مقالات انتقال توان میان قطبش های الکتریکی و مغناطیسی در شبیه سازی موجبرهای عادی و نیز موجبرهای W1 کریستال فوتونی – که موجبر از حذف یک ردیف از استوانه های دی الکتریک ایجاد می گردد – نمایش داده شده است. همچنین از آنجا که در کریستال های فوتونی می توانیم سرعت های گروه پایین تری از موجبرهای عادی داشته باشیم – همانند المان های مبتنی بر تشدید کننده ها – این انتقال توان سریعتر و موثرتر رخ می دهد[۳۳]. بنابراین استفاده از یک الگوریتم عددی که به راحتی و به دقت قادر به شبیه سازی فرآیندهای نوری در ساختارهای غیرخطی مرکب همانند کریستال های فوتونی باشد، مهم و ضروری به نظر می رسد.

روش عادی و متداول بررسی انتشار غیرخطی موج اپتیکی، معادله شرودینگر غیرخطی است، زیرا این معادله قادر به ایجاد نتایج تحلیلی از ساختارهاست. متاسفانه چون ساختارهای کریستال فوتونی تغییرات ضریب شکست زیاد و سریعی – نسبت به مکان – داشته و پاشندگی مودی زیادی را به خصوص در لبه نوارها از خود به نمایش می گذارند، فرض تغییر آرام پوش را در استفاده از معادله شرودینگر غیرخطی نامعتبر می سازند[۳۴]. همچنین روش های متداول در تحلیل

کریستال های فوتونی مانند روش بسط امواج تخت نیز توانایی پیاده سازی اثرات غیر خطی را ندارند.

روش تفاضل متناهی در حوزه زمان [۳۵] روشی موثر برای تحلیل اثرات غیرخطی در ساختارهای کریستال فوتونی است، زیرا از طرفی هم در پیاده سازی ساختارهایی با ضریب شکست مرکب و متفاوت موفق است و هم توانایی دربرگیری ویژگی های غیرخطی مواد را دارد. تنها محدودیت این روش منابع محاسباتی و ذخیره اطلاعات و نیز زمان شبیه سازی است. چندین الگوریتم تفاضل متناهی در حوزه زمان برای مواجهه با اثرات غیر خطی ارائه شده اند که از آن جمله می توان به فرمول بندی های سولیوان[1] [۳۶] برای مواد غیرخطی و حتی دارای پاشندگی اشاره کرد که با استفاده از تبدیل Z بنا شده اند و نیز الگوریتم ترن[2] [۳۷ و ۳۸] برای اثر کر ساده.

در این پایان نامه یک الگوریتم دوبعدی تفاضل متناهی در حوزه زمان بر اساس اصلاح و گسترش الگوریتم اصلی یی[3] ارائه شده است که برای شبیه سازی اثرات غیرخطی مرتبه سوم در ساختارهای دلخواه کریستال فوتونی دو بعدی قابل استفاده است. این الگوریتم بر روی مواد غیر خطی $\chi^{(3)}$ متمرکز شده و فرض براین بوده است که اثرات غیرخطی لحظه ای و بدون حافظه اند. همچنین چگونگی پایداری الگوریتم نمایش داده شده است و سپس با استفاده از آن و روش های بدست آوردن ساختار نوار و روابط پاشندگی برای ساختارهای کریستال فوتونی و موجبرهای مبتنی بر آنها، سعی شده است که ساختار نوار و روابط پاشندگی برای ساختارهای کریستال فوتونی دارای اثرات غیرخطی بدست آید. این پایان نامه با درآمدی بر اپتیک غیر خطی و توضیحاتی درباره اثر کر و ضریب شکست غیرخطی در فصل اول آغاز شده و در فصل دوم به کریستال های فوتونی، روش های عددی در شبیه سازی این ساختارها و چگونگی بدست آوردن ساختار نوار با استفاده از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان خواهد پرداخت.

---

[1] Sullivan
[2] Tran
[3] Yee

فصل سوم ابتدا به چگونگی اصلاح الگـوریتم تفاضـل متنـاهی در حـوزه زمـان بـرای شـبیه سـازی ساختارهای غیرخطی نظری داشته و در سه بخش واپسین این فصل نتایج شبیه سازی ساختارهای مختلف و متفاوت کریستال های فوتونی غیرخطـی ارائـه خواهـد شـد. در نهایـت در فـصل چهـارم نتیجه گیری و پیشنهادها ارائه می شوند.

فصل ۱

اپتیک غیرخطی

۱-۱- در آمدی بر اپتیک غیرخطی

اپتیک غیرخطی مطالعه پدیده هایی است که در اثر تغییرات ویژگی های اپتیکی مواد هنگام حضور نور در آنها ایجاد می گردد [۱]. معمولاً تنها نور لیزر است که شدت کافی برای تغییرات ویژگی های اپتیکی ماده را داراست. شروع گستره اپتیک غیرخطی غالباً با کشف تولید هماهنگ دوم توسط فرانکن[1] و دیگران در سال ۱۹۶۱ – کمی بعدتر از کارکرد موفقیت آمیزنخستین لیزر توسط مایمن[2] در سال ۱۹۶۰ – گره خورده است؛ گرچه قبل از آن نیز گزارش هایی از مشاهده اثرات اشباع در شدت های نوری بالا در برخی مواد داده شده بود (برای مثال توسط لوئیس[3] و دیگران در سال ۱۹۴۱).

پدیده های اپتیک غیرخطی از آن نظر غیرخطی هستند که در آنها پاسخ یک ماده به میدان نوری به صورت غیر خطی به شدت آن وابسته است. برای مثال تولید هماهنگ دوم در اثر بخشی از پاسخ اتمی که با شدت میدان اپتیکی به صورت درجه دو تغییر می کند، ایجاد می گردد. پس شدت نوری که در فرکانس هماهنگ دوم ایجاد می شود، متناسب با مربع شدت نور لیزر اعمالی خواهد بود.

برای آنکه به صورت دقیق تر درباره اثرات غیرخطی بحث کنیم، چگونگی وابستگی جابجایی دوقطبی در واحد حجم یا قطبش الکتریکی **P**، در یک ماده به بزرگی میدان الکتریکی **E** نور اعمالی را بررسی می نماییم.

---

[1] Franken
[2] Maiman
[3] Lewis

در اپتیک خطی قطبش القا شده به صورت خطی به شدت میدان الکتریکی اعمالی به ماده بستگی خواهد داشت [۱]،

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} \qquad (۱-۱)$$

که در این رابطه ثابت تناسب $\chi^{(1)}$ پذیرفتاری خطی و ε_0 گذردهی خلا است.

در اپتیک غیرخطی، پاسخ اپتیکی غالباً با گسترش معادله (۱-۱) و بیان $\mathbf{P}$ به صورت یک سری توانی نسبت به شدت میدان الکتریکی $\mathbf{E}$ بررسی می شود [۱]:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \left(\chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(2)} : \mathbf{EE} + \chi^{(3)} : \mathbf{EEE} + \ldots \right) \equiv \mathbf{P}^{(1)} + \mathbf{P}^{(2)} + \mathbf{P}^{(3)} + \cdots \qquad (۲-۱)$$

که در آن $\chi^{(2)}$ و $\chi^{(3)}$ به ترتیب پذیرفتاری غیرخطی مرتبه دوم و سوم هستند. در عمل پذیرفتاری مرتبه jام تانسوری از مرتبه $j+1$ است، که در بخش بعد این فصل درباره آن بحث خواهد شد. همچنین توجه کنید که در روابط (۱-۱) و (۱-۲) فرض شده است که قطبش در حوزه زمان تنها به مقادیر آنی شدت میدان الکتریکی وابسته است. این فرض که ماده به صورت آنی پاسخ می دهد، از طریق روابط کرامرز- کرونینگ[1] به این نتیجه منجر خواهد شد که ماده مورد نظر باید بدون تلفات و بدون پاشندگی باشد. در حالت کلی پذیرفتاری های غیرخطی بستگی به فرکانس های میدان الکتریکی اعمالی دارد اما در این پایان نامه از این وابستگی صرفنظر کرده ایم. این فرض هنگامی که فرکانس اپتیکی از فرکانس تشدید جذب ماده غیرخطی دور باشد، درست خواهد بود [۳۹]. همچنین با توجه به اینکه پهنای باند سیگنال های اپتیکی معمولاً بسیار کوچکتر از پاشندگی ضرایب غیر خطی است، می توانیم پذیرفتاری های غیرخطی را ثابت های مستقل از فرکانس در نظر بگیریم. به $\mathbf{P}^{(2)} = \varepsilon_0 \chi^{(2)} : \mathbf{EE}$، قطبیدگی غیرخطی درجه دو و به $\mathbf{P}^{(3)} = \varepsilon_0 \chi^{(3)} : \mathbf{EEE}$، قطبیدگی غیرخطی درجه سه می گوییم. پدیده های فیزیکی که در اثر قطبیدگی غیرخطی درجه دو پدید می آیند با پدیده هایی که در اثر قطبیدگی غیرخطی درجه سه ایجاد می گردند، کاملاً قابل تفکیک و مجزا هستند.

[1] Kramers – Kroning

برهم کنش های غیرخطی درجه دوم تنها در کریستال هایی که همسانگرد نیستند – یعنی تقارن معکوس ندارند – ظاهر می شود. از آنجا که مایع ها، گازها، جامدات آمورف مانند شیشه و حتی بسیاری از کریستال ها – مانند سیلیکون و گالیوم-آرسناید – دارای تقارن معکوس هستند؛ بنابراین در عمل $\chi^{(2)}$ برای این مواد حذف می شود – $(\chi^{(2)} \equiv 0)$ – و در نتیجه این مواد نمی توانند برهمکنش غیرخطی مرتبه دوم داشته باشند. اما برهمکنش غیرخطی مرتبه سوم هم برای مواد دارای تقارن معکوس و هم برای مواد فاقد اینگونه تقارن حضور خواهد داشت [۱]. برهم کنش غیرخطی مرتبه دوم یا $\chi^{(2)}$ عامل پدیده های فیزیکی همانند تولید هماهنگ دوم، تولید فرکانس مجموع و تفاضل و نوسان نوری پارامتری بوده و برهم کنش غیرخطی مرتبه سوم یا $\chi^{(3)}$ موجب پدیده های فیزیکی همانند تولید هماهنگ سوم، ضریب شکست وابسته به شدت یا ضریب شکست غیر خطی و ترکیب چهار موج است.

علاوه بر پدیده های غیرخطی حاصل از برهمکنش های غیر خطی مرتبه دو وسه که کشسان هستند – به این معنی که هیچ انرژی میان میدان الکترومغناطیسی و ماده دی الکتریک تبادل نمی شود – دسته دیگری از اثرات غیرخطی وجود دارند که از پراکندگی غیر کشسان برانگیخته پدید آمده و در آنها میدان اپتیکی مقداری از انرژی خود را به ماده غیرخطی می دهد (و یا برعکس). دو پدیده غیرخطی مهم که در این دسته جای می گیرند پراکندگی برانگیخته رامان و پراکندگی برانگیخته بریلیون هستند که در این پدیده ها به ترتیب فنون های نوری و فنون های آکوستیکی حضور دارند. از آنجا که این دسته از اثرات غیرخطی در این پایان نامه مد نظر نبوده است، از توضیح بیشتر آنها صرفنظر می کنیم.

با توجه به اینکه مواد مورد نظر در این پایان نامه سیلیکون و گالیوم-آرسناید بوده و نیز ساختارهای کریستال فوتونی دارای گاف نوار فوتونی مشخص و بازه فرکانسی انتشار معین هستند، اثرات غیرخطی مرتبه دوم با توجه به همسانگرد بودن مواد مورد نظر حذف شده و از اثرات غیر خطی مرتبه سوم هم که قابلیت انتشار درون گاف فوتونی را دارند و در نتیجه برای ما مهم هستند،

تنها ضریب شکست وابسته به شدت یا ضریب شکست غیرخطی است که به آن اثـر کـر نیـز گفتـه می‌شود. بنابراین در بخش آینده به بررسی این اثر غیرخطی خواهیم پرداخت.

۱-۲- ضریب شکست غیر خطی (اثر کِر)

ضریب شکست بسیاری از مواد را می توان توسط رابطه

$$n = n_0 + \overline{n}_2 \left\langle \tilde{E}^2 \right\rangle \qquad (۳-۱)$$

بیان کرد که در آن n_0 نمایش دهنده ضریب شکست عادی – یا خطی – در شدت میدان ضعیف و $\overline{n}_2$ضریب شکست مرتبه دوم است که نرخ افزایش ضریب شکست با شدت نور را نمایش مـی دهـد. علامت بار بالای $\overline{n}_2$ برای مشخص کردن آن از ضریب شکست غیرخطی n_2 است که با اسـتفاده از رابطه ای دیگر کمی جلوتر تعریف حواهد شد. $\tilde{E}$ نمایش دهنده میدان الکتریکـی اسـت و علامـت بالای آن دال بر تغییرات سریع میدان الکتریکی دارد. همچنین براکت دور متغیر $\tilde{E}^2$ نمایش دهنده متوسط گیری زمانی است [۱].

حال اگر فرض کنیم که میدان الکتریکی نور به صورت:

$$\tilde{E}(t) = E(\omega)e^{-i\omega t} + c.c. \qquad (۴-۱)$$

باشد داریم:

$$\left\langle \tilde{E}(t)^2 \right\rangle = 2E(\omega)E(\omega)^* = 2\left|E(\omega)\right|^2 \qquad (۵-۱)$$

و در نتیجه:

$$n = n_0 + 2\overline{n}_2 \left|E(\omega)\right|^2 \qquad (۶-۱)$$

این تغییر در ضریب شکست را اثر کر اپتیکی می خوانیم، زیرا شبیه به اثر الکترواپتیکی کر است که در آن ضریب شکست یک ماده با مربع میدان الکتریکی ایستایی اعمال شده به آن تغییر می نمایـد [۱].

البته برهم کنش یک پرتو نور با ماده اپتیکی غیرخطی را می توان برحسب قطبیدگی غیرخطی نیز نمایش داد. بخشی از قطبیدگی غیرخطی که بر انتشار پرتویی با فرکانس ω اثر می گذارد، به صورت زیر است:

$$P_{NL}(\omega)=3\varepsilon_0\,\chi^{(3)}(\omega)\left|E(\omega)\right|^2E(\omega) \qquad (۷-۱)$$

در این صورت برای قطبیدگی کل ماده داریم:

$$P_{TOT}(\omega)=\varepsilon_0\chi^{(1)}E(\omega)+3\varepsilon_0\chi^{(3)}\left|E(\omega)\right|^2E(\omega)\equiv\varepsilon_0\chi_{eff}E(\omega) \qquad (۸-۱)$$

که در آن χ_{eff} پذیرفتاری موثر بوده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\chi_{eff}=\chi^{(1)}+3\chi^{(3)}\left|E(\omega)\right|^2 \qquad (۹-۱)$$

برای ارتباط دادن پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سه $\chi^{(3)}$ به ضریب شکست غیرخطی n_2 می دانیم که به طور کلی می توان نوشت:

$$n^2=1+\chi_{eff} \qquad (۱۰-۱)$$

و با اعمال معادله (۱-۶) به سمت چپ و معادله (۱-۹) به سمت راست رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\left(n_0+2\overline{n}_2\left|E(\omega)\right|^2\right)^2=1+\chi^{(1)}+3\chi^{(3)}\left|E(\omega)\right|^2 \qquad (۱۱-۱)$$

با توجه به اینکه مقدار $\overline{n}_2$ بسیار کوچک است، از توان دوم آن صرفنظر کرده و با مرتب کردن رابطه بالا می توانیم ضرایب شکست خطی و غیرخطی را به پذیرفتاری خطی و غیرخطی مربوط سازیم. یعنی:

$$n_0=\left(1+\chi^{(1)}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۲-۱)$$

$$\overline{n}_2=\frac{3\chi^{(3)}}{4n_0} \qquad (۱۳-۱)$$

روش دیگری برای بیان ضریب شکست وابسته به شدت استفاده از رابطه:

$$n=n_0+n_2I \qquad (۱۴-۱)$$

است که در آن I شدت میدان نوری است که از آن میانگین گیری زمانی شده است: