

صلى الله عليه وسلم



دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک حالت جامد

محاسبه عددی پذیرفتاری الکتریکی

استاد راهنما:

دکتر ابراهیم عطاران کاخکی

نگارش:

عذرا فرامرزی

بهار ۱۳۸۹

تقدیم به همراهان همیشگی زندگی ام

پدر و مادر مهربانم ، به پاس حمایت های بی دریغشان

و همسرم ، بخاطر شکیبایی های بی حدش

و فرزند عزیزم امیر حسام

تقدیر و تشکر

خدایا تو را سپاس که بر من منت نهادی و افتخار تحصیل در جوار بارگاه ملکوتی علی ابن الموسی الرضا را به من عطا فرمودی.

اکنون که با لطف و عنایت خداوند این مرحله از تحصیل را پشت سر گذاشته‌ام، حاصل زحمات خویش را به کسانی تقدیم می‌کنم که به نوعی در زندگی مرا مدیون خود ساخته‌اند و شیرینی زندگی را در پرتو لبخند زیبایشان معنا می‌کنم.

وظیفه خود می‌دانم که از استاد بزرگوار و گرانقدر جناب آقای دکتر ابراهیم عطاران کاخکی که راهنمایی‌های ارزنده‌شان همواره در تمام مراحل راهگشای اینجانب است کمال تشکر را داشته باشم و همچنین از اساتید مدعو، آقایان دکتر حسینی و دکتر کمپانی تشکر و قدر دانی می‌نمایم.

همچنین از همه عزیزانی که در تمام مراحل این تحقیق، مرا یاری نموده‌اند سپاسگذاری می‌نمایم و توفیق

روزافزون را برای ایشان از خداوند متعال مسألت دارم.

در پایان خالصانه‌ترین مراتب تشکر و قدردانی خود را به همسر صبور و فرزند عزیزم که در طول این دوره

تحصیلی همواره پشتیبان و همراه من بودند، تقدیم می‌نمایم.

چکیده

پدیده اپتیک غیرخطی در بلورها موضوع بسیار پرکاربرد و با اهمیتی است. برای استفاده بلورها به عنوان افزاینده بسامد ورودی، مثل تولید هارمونیک دوم و تفاضل فرکانس ها، لازم است بعضی از کمیت های اپتیکی مربوطه، به عنوان نمونه پذیرفتاری الکتریکی، را داشته باشیم. برای محاسبه پذیرفتاری الکتریکی غیرخطی لازم است معادلات دیفرانسیل نوسانگر غیرهارمونیک به روش های تقریبی و یا عددی حل شوند. از آنجا که محاسبات عددی از دقت بالاتری نسبت به روش های تقریبی برخوردارند لذا در این پروژه معادله نوسانگر غیرخطی با استفاده از روش عددی FDTD به کمک نرم افزار MATLAB حل شده است. به عنوان نمونه در فرایند تولید بسامد مجموع در بلورهای بدون تقارن مرکزی پذیرفتاری الکتریکی مرتبه دوم محاسبه گردیده و مقدار متوسط 62×10^{-9} esu برای آن بدست آمده است. این مقدار با آنچه از طریق روش اختلال بدست آمده است مطابقت دارد.

تقدیر و تشکر

چکیده

۱	فصل اول : اپتیک غیرخطی
۲	۱-۱ مقدمه ای بر اپتیک غیرخطی
۳	۲-۱ قطبش غیرخطی مرتبه دوم
۹	۳-۱ قطبش غیرخطی مرتبه سوم
۱۰	۱-۳-۱ تولید هارمونیک سوم
۱۰	۲-۳-۱ بستگی ضریب شکست به شدت
۱۱	۳-۳-۱ خود کانونی شدگی نور
۱۲	۴-۳-۱ قطبش غیرخطی مرتبه سوم – حالت کلی
۱۴	۵-۳-۱ فرایندهای پارامتریک و غیرپارامتریک
۱۴	۱-۳-۵-۱ جذب اشباعی
۱۵	۲-۳-۵-۱ قطعات دو پایه ای اپتیکی
۱۶	۳-۳-۵-۱ پدیده جذب دو فوتونی
۱۷	۴-۳-۵-۱ پراکندگی رامان القائی
۱۸	۴-۱ تعریف پذیرفتاری غیرخطی
۲۱	۵-۱ پذیرفتاری غیرخطی نوسانگر کلاسیکی غیرهارمونیک
۲۲	۶-۱ خواص پذیرفتاری غیرخطی
۲۲	۱-۶-۱ خواص تقارنی پذیرفتاری غیرخطی مرتبه دوم
۳۱	۲-۶-۱ خواص تقارنی پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم

۳۴ فصل دوم : محاسبه پذیرفتاری الکتریکی به روش تقریبی اختلال

۳۵ ۱-۲ مقدمه

۳۷ ۲-۲ حل معادله نوسانگر غیرخطی در محیط بدون تقارن مرکزی

۴۳ ۳-۲ حل معادله نوسانگر غیرخطی در محیط دارای تقارن مرکزی

۴۹ فصل سوم : روش محاسبات عددی تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD)

۵۰ ۱-۳ مقدمه

۵۱ ۲-۳ تبدیل معادله حرکت به صورت تفاضل های محدود مرکزی

۵۱ ۱-۲-۳ روش تفاضل های محدود

۵۲ ۲-۲-۳ بسط روش تفاضل متناهی در حوزه زمان

۵۵ ۳-۳ چشمه موج در روش FDTD

۵۵ ۱-۳-۳ پالس گوسی

۵۷ فصل چهارم : محاسبات و نتایج

۵۸ ۱-۴ مقدمه

۵۸ ۲-۴ بررسی حرکت الکترون به روش اختلال

۶۴ ۳-۴ محاسبه پذیرفتاری غیرخطی در بلور بدون تقارن مرکزی

۷۲ ۴-۴ محاسبه پذیرفتاری غیرخطی در بلور دارای تقارن مرکزی

۸۱ ۵-۴ تولید هارمونیک دوم در بلورهای غیرفلزی

۸۱ ۱-۵-۴ لیتیوم نئوبایت

۸۳ ۲-۵-۴ تولید هارمونیک دوم در لیتیوم نئوبایت

۸۹ ۳-۵-۴ KDP بلور

۸۹ ۴-۵-۴ تولید هارمونیک دوم در KDP

۹۱	۶-۴ تاثیر نیروی اصطکاک بر قطبش تولید شده و فاز قطبش
۹۶	۷-۴ نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۷	مراجع
۱۰۰	مقالات برگرفته شده از پایان نامه

فصل اول

اپتیک غیر خطی

۱-۱ مقدمه

اپتیک غیرخطی مطالعه پدیده‌هایی است که در اثر تغییر ویژگی‌های نوری اجسام در حضور نور لیزر با شدت کافی رخ می‌دهد. شاخه اپتیک غیرخطی بلافاصله بعد از به نمایش در آمدن نحوه کار اولین لیزر بوسیله مایمن^۱ در سال ۱۹۶۰ [۱] با کشف تولید هماهنگ دوم توسط فرانکن و همکارانش^۲ در سال ۱۹۶۱ آغاز شد. پدیده‌های اپتیکی را از این جهت غیرخطی می‌گویند که وقتی اتفاق می‌افتند که پاسخ محیط مادی به میدان اعمال شده یک پاسخ غیرخطی باشد، یعنی با اعمال میدان الکتریکی قوی تغییر شکل الکترون‌های سست اتم یا مجموعه‌ای از اتم‌ها غیرخطی باشد. برای مثال تولید هارمونیک دوم نتیجه بخشی از پاسخ اتمی است که به توان دوم دامنه میدان نوری اعمال شده بستگی دارد. در نتیجه شدت نور تولیدشده در بسامد هماهنگ دوم با مجذور شدت نور لیزر اعمال شده افزایش می‌یابد [۲].

اپتیک غیرخطی کاربردهای بسیاری در موارد مختلف از قبیل مخابرات نوری و محاسبات نوری دارد. با بکاربردن این علم و مواد نوری غیرخطی می‌توان امواج الکترومغناطیسی را کنترل و هدایت نمود و در نتیجه آن چشمه‌های جدید نوری، سوئیچ‌های تمام نوری و مدولاتورهای نوری و دیگر کاربردهای جدید در صنعت مخابرات حاصل می‌گردد [۳].

در اپتیک خطی و از دیدگاه کلاسیکی فرض می‌شود که قطبش دی الکتریکی القا شده یک محیط به طور خطی به میدان الکتریکی اعمال شده بستگی دارد، این رابطه در دستگاه CGS به صورت زیر است :

$$P^{(1)}(t) = \chi^{(1)} E(t) \quad 1-1$$

که در آن ضریب تناسب $\chi^{(1)}$ پذیرفتاری^۳ خطی است. در حضور میدان‌های الکتریکی قوی موجود در باریکه‌های لیزری تقریب خطی بالا دیگر تقریب خوبی نخواهد بود. در اپتیک غیرخطی، می‌توان پاسخ غیرخطی را با تعمیم رابطه ۱-۱ به صورت زیر توصیف کرد :

$$\begin{aligned} \tilde{P}(t) &= \chi^{(1)} E(t) + \chi^{(2)} E^2(t) + \chi^{(3)} E^3(t) + \dots \\ &\equiv P^{(1)}(t) + P^{(2)}(t) + P^{(3)}(t) + \dots \end{aligned} \quad 2-1$$

¹ Maiman

² Franken et all

³ susceptibility

کمیت های $\chi^{(2)}$ ، $\chi^{(3)}$ به ترتیب پذیرفتاری غیرخطی مرتبه دوم و مرتبه سوم نامیده می شوند و $P^{(2)}(t), P^{(1)}(t)$ و $P^{(3)}(t)$ به ترتیب قطبش خطی و قطبش غیرخطی مرتبه دوم و سوم می باشند. برای ساده سازی فرض کرده ایم که $P(t), E(t)$ در روابط بالا کمیت های عددی هستند. اما در حالت کلی، شکل برداری میدان ها، $\chi^{(1)}$ یک تانسور رنک دو و $\chi^{(2)}$ تانسور رنک سه و... است [۴].

همچنین در نوشتار معادلات فوق فرض کردیم که قطبش در زمان t تنها به مقدار آنی قدرت میدان الکتریکی وابسته است. فرض وابستگی پاسخ محیط به طور آنی همچنین اشاره دارد بر اینکه (طی روابط -Kramers Kronig) محیط باید بدون اتلاف و غیرپاشنده باشد. درکل پذیرفتاری غیرخطی به فرکانس های میدان اعمالی بستگی دارد، اما در فرض حاضر ما در پاسخ آنی آنها را ثابت در نظر می گیریم. در ادامه خواهیم دید که اثرات غیرخطی مرتبه دوم تنها می تواند برای بلورهای بدون تقارن مرکزی (noncentrosymmetric) رخ دهد ولی در بلورهای با تقارن وارون ظاهر نمی شود. از آنجاکه مایعات، گازها، جامدات بی شکل (مثل شیشه) و حتی بسیاری بلورها تقارن وارون دارند $\chi^{(2)}$ در آنها ناپدید می شود و در نتیجه آنها نمی توانند فرکانس هماهنگ دوم تولید کنند. به عبارت دیگر پایینترین مرتبه قطبش غیرخطی در آنها از مرتبه سوم است [۵].

۲-۱ قطبش غیرخطی مرتبه دوم

دلیل اصلی بحث روی قطبش غیرخطی در بررسی پدیده های اپتیک غیرخطی در این است که تغییرات زمانی قطبش طبق معادله حرکت موج در محیط غیرخطی در رابطه ۱-۳ به عنوان چشمه ای برای مولفه های جدیدی از میدان الکترومغناطیسی عمل می کند.

$$\nabla^2 \tilde{E} = \frac{\mathbf{n}^2}{c^2} \frac{\partial^2 \tilde{E}}{\partial t^2} + \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 \tilde{P}^{NL}}{\partial t^2} \quad ۳-۱$$

در این قسمت اثراتی را که به وسیله قطبش غیرخطی ایجاد می شوند بررسی می کنیم. این اثرات عبارتند از :

۱. تولید هارمونیک دوم^۴:

در این فرایند یک باریکه لیزر با فرکانس ω در یک ماده غیرخطی بدون تقارن مرکزی به طور جزئی به باریکه ای همدوس با فرکانس 2ω تبدیل می شود^۵. از آنجا که دستیابی به منابع نوری همدوس با بسامدهای بالا کار ساده ای نمی باشد به خوبی می توان از آن بهره برد و چشمه همدوس جدیدی با بسامد دوبرابر بسامد چشمه قبلی تولید نمود که کاربردهای بسیاری در مدارهای مجتمع اپتیکی دارد.

برای مورد کلی که میدان E شامل فرکانس های مختلفی است، بیان قطبش بسیار پیچیده است. اینجا با میدانی تک فرکانس و به صورت زیر کار می کنیم.

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

که در آن که در آن $c.c$ مخفف مزدوج مختلط می باشد.

در حضور این میدان الکتریکی تکفام طبق تعریف قطبش غیرخطی مرتبه دوم که در رابطه ۱-۵ نشان داده شده است،

$$\tilde{P}^{(2)}(t) = \chi^{(2)} \tilde{E}^2(t) \quad ۵-۱$$

قطبش غیرخطی بدین صورت است :

$$\tilde{P}^{(2)}(t) = 2\chi^{(2)} E E^* + (\chi^{(2)} E^2 e^{-2i\omega t} + c.c.) \quad ۶-۱$$

می بینیم که قطبش مرتبه دوم شامل جملات ثابت با فرکانس صفر و نوسانی با فرکانس 2ω است. جمله اول منجر به تولید تابش الکترومغناطیسی نمی شود، چرا که مشتق دوم آن نسبت به زمان به صفر می رسد. البته این جمله منجر به فرایندی به نام یکسوسازی اپتیکی^۶ می شود که در آن یک میدان الکتریکی استاتیکی در بلور غیرخطی خلق می شود. طبق معادله حرکت موج در رابطه ۱-۳ جمله دوم سمت راست باعث ایجاد فرکانس هارمونیک دوم می شود. زیرا در صورتی که تغییرات زمانی مرتبه دوم قطبش غیرخطی ناصفر باشد منجر به شتاب گرفتن بار الکتریکی شده و این بارهای متحرک طبق نظریه لارمور امواج الکترومغناطیسی تولید می کنند.

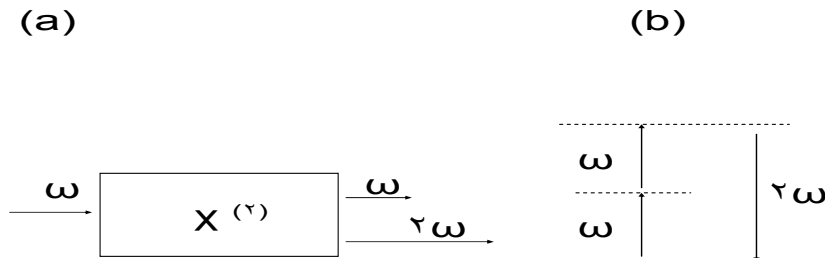
فرایند تولید هارمونیک دوم در شکل ۱-۱ نشان داده می شود. در قسمت (b) از دیدگاه فوتونی نشان داده شده

⁴Second - Harmonic Generation

⁵ابتدا توسط فرانکن و همکارانش نشان داده شد

⁶Optical Rectification (OR)

است که دو فوتون با فرکانس ω در یک فرایند مکانیک کوانتمی یک طرفه به یک فوتون با فرکانس 2ω تبدیل می شوند.



شکل ۱-۱ (a) فرایند تولید هماهنگ دوم، یک باریکه لیزر با فرکانس ω در یک ماده غیرخطی به باریکه ای همدوس با فرکانس 2ω تبدیل می شود. (b) فرایند تولید هارمونیک دوم از دیدگاه فوتونی. خط پر در شکل حالت پایه اتمی را نشان می دهد و خطوط خط چین ترازهای مجازی.

دو عامل مهم در ایجاد آثار غیرخطی منبع نور با شدت بالا مانند لیزر و همچنین ماده نوری غیرخطی مناسب است. برای ماده اپتیکی مناسب می توان گفت که هر ماده اپتیکی در شدت بالای نور می تواند رفتار غیرخطی از خود نشان دهد. برای نمونه می توان به KDP ، $GaAs$ ، $LiNbO_3$ و بلور کوآرتز و یک سری از ترکیبات آلی جدید اشاره نمود. هر یک از این بلورها پذیرفتاری غیرخطی مرتبه دوم متفاوتی دارند و به واسطه این تفاوت توانایی آنها در تولید هارمونیک دوم نیز متفاوت است.

اکنون به بررسی اثرات غیرخطی در حضور دو فوتون با فرکانس های مختلف می پردازیم. میدان الکتریکی در رابطه ۷-۱ بیان شده است.

$$\tilde{E}(t) = E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t} + c.c. \quad 7-1$$

که در آن $c.c$ مخفف مزدوج مختلط دو جمله اول می باشد.

در این صورت طبق رابطه ۵-۱ قطبش غیرخطی به این صورت درمی آید :

$$\tilde{P}^{(2)}(t) = \chi^{(2)} [E_1^2 e^{-2i\omega_1 t} + E_2^2 e^{-2i\omega_2 t} + 2E_1 E_2^* e^{-i(\omega_1 - \omega_2)t} + c.c.] + 2\chi^{(2)} [E_1 E_1^* + E_2 E_2^*]$$

به طور قراردادی قطبش را به صورت جمع روی فرکانس های مثبت و منفی می نویسیم. یعنی :

$$\tilde{P}^{(2)}(t) = \sum_n P(\omega_n) e^{-i\omega_n t} \quad 9-1$$

با قرار دادن $\tilde{P}^{(2)}(t)$ از رابطه ۹-۱ در رابطه ۸-۱ و مساوی قرار دادن ضرایب $e^{-i\omega_n t}$ طرفین، روابط زیر را

برای دامنه موهومی مولفه های بسامدی مختلف قطبش غیرخطی داریم :

$$P(2\omega_1) = \chi^{(2)} E_1^2 \quad (\text{SHG}),$$

$$P(2\omega_2) = \chi^{(2)} E_2^2 \quad (\text{SHG}),$$

$$P(\omega_1 + \omega_2) = 2\chi^{(2)} E_1 E_2 \quad (\text{SFG}), \quad 10-1$$

$$P(\omega_1 - \omega_2) = 2\chi^{(2)} E_1 E_2^* \quad (\text{DFG}),$$

$$P(0) = 2\chi^{(2)} (E_1^* E_1 + E_2^* E_2) \quad (\text{OR}).$$

همچنین جملات شامل فرکانس های منفی. هر عبارت را با نام فرایند فیزیکی که توصیف می کند، برچسب زده ایم؛

یعنی تولید هارمونیک دوم (SFG)، تولید بسامد مجموع (SFG)، تولید بسامد تفاضل (DFG) و یکسوسازی

نوری (OR). در ادامه هریک از این فرایندها را توضیح خواهیم داد.

از معادلات ۱۰-۱ نتیجه می شود که چهار مولفه بسامدی غیرصفر در قطبش غیرخطی وجود دارند. ولی نوعا بیشتر از یکی از مولفه های بسامدی که شدت قابل ملاحظه ای داشته باشد در برهم کنش نوری غیرخطی وجود ندارد. دلیل این امر آن است که قطبش غیرخطی تنها در صورتی می تواند سیگنال خروجی با بازده بالا تولید کند که شرط تطبیق فاز برآورده شود و معمولا این شرط برای بیش از یک مولفه بسامدی قطبش غیرخطی بوجود نمی آید. در عمل، بسامدی که تابش خواهد کرد با انتخاب مناسب قطبش تابش ورودی و سمت گیری بلور غیرخطی، گزینش می شود.

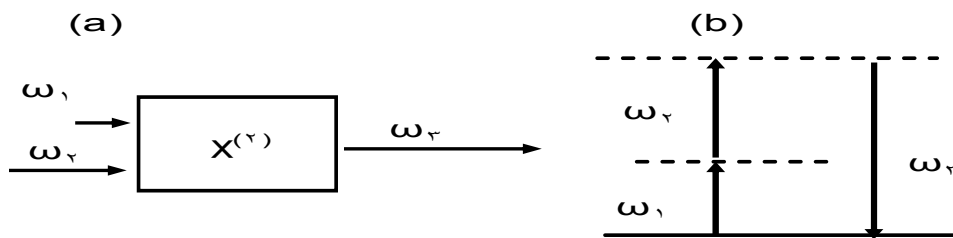
۲. تولید بسامد مجموع^۷

در این فرایند دو باریکه لیزر با فرکانس های مجزای ω_1 و ω_2 در یک ماده غیرخطی به طور جزیی به

⁷ Sum - Frequency Generation

باریکه ای همدوس با فرکانس $\omega_1 + \omega_2$ تبدیل می شوند. این فرایند ترکیب غیرخطی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است و در قسمت (b) نشان داده شده است که از دیدگاه فوتونی دو فوتون با فرکانس های ω_1 و ω_2 در یک فرایند مکانیک کوانتومی یک طرفه به یک فوتون با فرکانس ω_3 تبدیل می شوند .
در این مورد دامنه قطبش غیرخطی از رابطه ۱-۱۰ به صورت زیر است :

$$P(\omega_1 + \omega_2) = 2 \chi^{(2)} E_1 E_2 \quad 11-1$$



شکل ۱-۲ (a) فرایند تولید بسامد مجموع، دو باریکه لیزر با فرکانس های مجزای ω_1 و ω_2 در یک ماده غیرخطی به باریکه ای همدوس با فرکانس $\omega_1 + \omega_2$ تبدیل می شوند. (b) فرایند تولید فرکانس مجموع از دیدگاه فوتونی. خط پر در شکل حالت پایه اتمی را نشان می دهد و خطوط خط چین ترازهای مجازی.

۳. تولید بسامد تفاضل^۸

در بلور غیرخطی قطبش غیرخطی $P(\omega_1 - \omega_2)$ در رابطه ۱-۱۰ منجر به تولید بسامد تفاضل می شود. این فرایند ترکیب غیرخطی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. در این فرایند دو باریکه لیزر با فرکانس های مجزای ω_1 و ω_2 در یک ماده غیرخطی به طور جزیی به باریکه ای همدوس با فرکانس $\omega_1 - \omega_2$ تبدیل می شوند. از دیدگاه فوتونی و در قسمت (b) نشان داده شده است که اتم در ابتدا فوتونی با فرکانس ω_1 را جذب نموده و به تراز مجازی بالاتر می رود و این تراز با فرایند نشر دو فوتونی که با حضور میدان ω_2 برانگیخته می شود و امی باشد. قانون پایستگی انرژی ایجاب می کند که برای تولید ω_3 یک فوتون با فرکانس بالاتر یعنی فرکانس ورودی ω_1 از بین رفته و یک فوتون در فرکانس ضعیف تر یعنی با فرکانس ورودی ω_2 بایستی تولید شود. بنابراین در این

⁸ Difference - Frequency Generation

فرایند فرکانس ورودی ضعیف تر یعنی ω_2 تقویت خواهد شد. به این دلیل فرایند تولید بسامد تفاضل به تقویت پارامتری اپتیکی معروف است.

نشر دوفوتونی حتی بدون حضور ω_2 هم می تواند اتفاق افتد. میدان های الکتریکی تولیدشده در این مورد خیلی ضعیف هستند. این فرایند به فلورسانسی پارامتریک معروف است و به طور تجربی قابل مشاهده است.



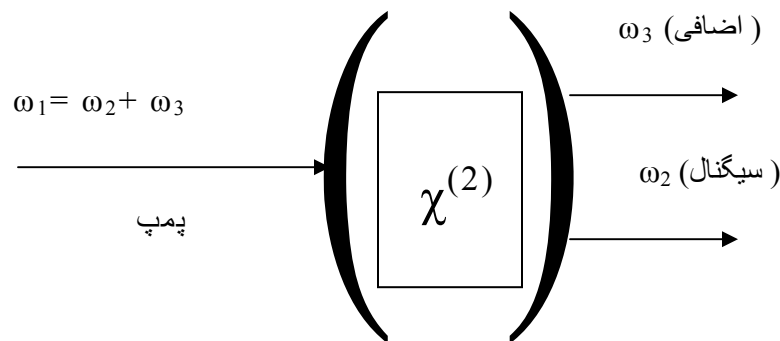
شکل ۱-۳ (a) فرایند ایجاد بسامد تفاضلی، دو باریکه لیزر با فرکانس های مجزای ω_1 و ω_2 در یک ماده غیرخطی به باریکه ای همدوس با فرکانس $\omega_1 - \omega_2$ تبدیل می شوند. (b) فرایند ایجاد فرکانس تفاضلی از دیدگاه فوتونی. خط پر در شکل حالت پایه اتمی را نشان می دهد و خطوط خط چین ترازهای مجازی.

۴. نوسان ساز پارامتری اپتیکی^۹

در فرایند تولید بسامد تفاضل دیدیم که وجود فرکانس های ω_2 یا ω_3 باعث نشر فوتون های اضافی در این فرکانس ها می شود. اگر بلور غیرخطی استفاده شده در این فرایند داخل یک مشدد اپتیکی قرار گیرد شدت فرکانس های تولید شده ω_2 و یا ω_3 بیشتر خواهد شد. این قطعه به نوسان ساز پارامتری اپتیکی معروف است و در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. مطابق شکل یک باریکه لیزر با فرکانس $\omega_1 = \omega_2 + \omega_3$ به فرکانس ω_2 و یا ω_3 تبدیل می شود. این فرایند عکس فرایند تولید بسامد مجموع است. در اینجا فرکانس دمش دو موج هرز و سیگنال را تولید می کند، بطوریکه انرژی و تکانه کل ثابت می ماند.

⁹ Optical Parametric Oscillation

به عنوان نمونه یک نوسان ساز اپتیکی شامل بلور لیتیم نیوبایت که به وسیله لیزر Nd:YAG دمش می یابد، طول موج های فرسرخ را ایجاد می کند. در مواردی که اینچنین منابع تابش کوک پذیری در دسترس نیست. در این شکل فرکانس ω_1 فرکانس پمپ نامیده می شود و ω_2 فرکانس سیگنال نامیده می شود و فرکانس ω_3 هم اضافی هست [۶].



شکل ۱-۴ نوسان ساز اپتیکی. در این قطعه یک باریکه لیزر با فرکانس $\omega_1 = \omega_2 + \omega_3$ به فرکانس ω_2 و یا ω_3 تبدیل می شود. فرکانس ω_1 فرکانس پمپ و ω_2 فرکانس سیگنال و ω_3 فرکانس اضافی نامیده می شوند. برای نور با فرکانس ω_2 و یا ω_3 در آینه های دو طرف ضریب انعکاس $R=1$ می باشد. آینه ها برای ω_3 شفافند.

۳-۱ قطبش غیرخطی مرتبه سوم

رابطه بین قطبش غیرخطی مرتبه سوم و میدان الکتریکی به این صورت تعریف می شود :

$$\tilde{P}^{(3)}(t) = \chi^{(3)} \tilde{E}^3(t) \quad ۱۲-۱$$

میدان الکتریکی \tilde{E} می تواند شامل فرکانس های مختلفی باشد، اما اگر میدان را به طور ساده به صورت زیر در نظر بگیریم :

$$\tilde{E}(t) = E \cos(\omega t) \quad ۱۳-۱$$

آنگاه با استفاده از رابطه مثلثاتی زیر :

$$\cos^3(\omega t) = \frac{1}{4} \cos(3\omega t) + \frac{3}{4} \cos(\omega t) \quad ۱۴-۱$$

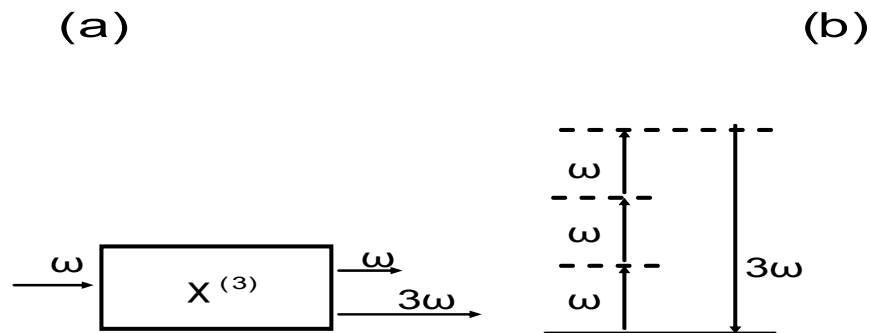
قطبش غیرخطی می تواند به شکل زیر بیان شود :

$$P^{(3)}(t) = \frac{1}{4} \chi^{(3)} E^3 \cos(3\omega t) + \frac{3}{4} \chi^{(3)} E^3 \cos(\omega t) \quad ۱۵-۱$$

در اینجا به چند مورد از فرایندهایی که در اثر پاسخ غیرخطی مرتبه سوم محیط بوجود می آیند اشاره می کنیم .

۱-۳-۱ تولید هارمونیک سوم

جمله اول پاسخ غیرخطی محیط در رابطه ۱۵-۱ به صورت $\frac{1}{4} \chi^{(3)} E^3 \cos(3\omega t)$ است. با استفاده از معادله موج در رابطه ۳-۱ به وضوح مشخص می شود که این جمله در قطبش غیرخطی منجر به تولید هارمونیک سوم می شود. فرایند تولید هارمونیک سوم در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. در قسمت (a) نشان داده شده است که یک باریکه لیزر با فرکانس ω در یک ماده غیرخطی به طور جزیی به باریکه ای همدوس با فرکانس 3ω تبدیل می شود و در قسمت (b) نشان داده شده است که از دیدگاه فوتونی سه فوتون با فرکانس ω در یک فرایند مکانیک کوانتومی یک طرفه به یک فوتون با فرکانس 3ω تبدیل می شوند.



شکل ۵-۱ (a) فرایند تولید هماهنگ سوم. در این فرایند یک باریکه لیزر با فرکانس ω در یک ماده غیرخطی به باریکه ای همدوس با فرکانس 3ω تبدیل می شود. (b) فرایند تولید هماهنگ سوم از دیدگاه فوتونی. خط پر در شکل حالت پایه اتمی را نشان می دهد و خطوط خط چین ترازهای مجازی .

۲-۳-۱ بستگی ضریب شکست به شدت

جمله دوم قطبش غیرخطی در رابطه ۱۵-۱ که از مرتبه فرکانس میدان برخوردی است منجر به جمله

غیرخطی در ضریب شکست موج ω می شود. ضریب شکست غیرخطی برای فرکانس های مختلف متفاوت است و رابطه آن با شدت I به صورت زیر بیان می شود :

$$n = n_0 + n_2 I \quad ۱۶-۱$$

که در آن n . ضریب شکست معمولی است و n_2 به صورت زیر :

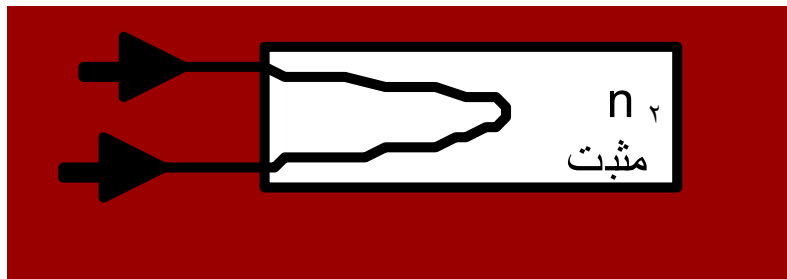
$$n_2 = 12\pi^2 / n_0^2 c \chi^{(3)} \quad ۱۷-۱$$

یک ثابت اپتیکی است که قدرت اپتیک غیرخطی را مشخص می کند و I شدت میدان برخوردی نیز بدین صورت می باشد :

$$I = (n_0 c / 8\pi) E^2 \quad ۱۸-۱$$

۳-۳-۱ خود کانونی شدگی نور^{۱۰}

یکی از مواردی که در نتیجه بستگی ضریب شکست به شدت اتفاق می افتد، فرایند خود تمرکزی نور است که در شکل ۶-۱ نشان داده ایم. این فرایند وقتی اتفاق می افتد که پرتوی نور با شدت غیریکنواخت در ماده ای با n_2 مثبت منتشر شود. در این شرایط ماده به عنوان یک عدسی مثبت عمل می کند که باعث می شود پرتوها همگرا شوند. این فرایند از این جهت مهم است که معمولاً شدت در نقطه کانونی پرتو خود متمرکز برای تخریب اپتیکی ماده کافی است.



شکل ۶-۱ خودکانونی شدگی نور

¹⁰ self – focusing of light

۴-۳-۱ قطبش غیرخطی مرتبه سوم - حالت کلی

اگر میدان الکتریکی را به صورت زیر در نظر بگیریم :

$$\tilde{E}(t) = E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t} + E_3 e^{-i\omega_3 t} + c.c. \quad ۱۹-۱$$

با محاسبه \tilde{E}^2 جملاتی با فرکانس های مختلف زیر داریم :

$$\begin{aligned} &\omega_1, \omega_2, \omega_3, 3\omega_1, 3\omega_2, 3\omega_3, (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3), (\omega_1 + \omega_2 - \omega_3), \\ &(\omega_1 + \omega_3 - \omega_2), (\omega_3 + \omega_2 - \omega_1), (2\omega_1 \pm \omega_2), (2\omega_2 \pm \omega_1), \\ &(2\omega_1 \pm \omega_3), (2\omega_2 \pm \omega_3), (2\omega_3 \pm \omega_2), (2\omega_3 \pm \omega_1) \end{aligned}$$

و منفی هر یک از آنها؛ آنگاه قطبش غیرخطی سبب ایجاد $\chi^{(3)}$ فرایند غیرخطی خواهد شد.

اکنون قطبش غیرخطی را به صورت فشرده زیر می نویسیم :

$$\tilde{P}(r,t) = \sum_n P(\omega_n) e^{-i\omega_n t} \quad ۲۰-۱$$

دامنه های مختلط قطبش غیرخطی را برای فرکانس های مثبت بدین صورت می نویسیم (اینها در واقع شامل توان

سوم E هستند) :

$$\begin{aligned} P(\omega_1) &= \chi^{(3)} (3E_1 E_1^* + 6E_2 E_2^* + 6E_3 E_3^*) E_1, \\ P(\omega_2) &= \chi^{(3)} (6E_1 E_1^* + 3E_2 E_2^* + 6E_3 E_3^*) E_2, \\ P(\omega_3) &= \chi^{(3)} (6E_1 E_1^* + 6E_2 E_2^* + 3E_3 E_3^*) E_3, \\ P(3\omega_1) &= \chi^{(3)} E_1^3, \quad P(3\omega_2) = \chi^{(3)} E_2^3, \quad P(3\omega_3) = \chi^{(3)} E_3^3, \\ P(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) &= 6\chi^{(3)} E_1 E_2 E_3, \quad P(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3) = 6\chi^{(3)} E_1 E_2 E_3^*, \\ P(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3) &= 6\chi^{(3)} E_1 E_2^* E_3, \quad P(-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) = 6\chi^{(3)} E_1^* E_2 E_3, \\ P(2\omega_1 + \omega_2) &= 3\chi^{(3)} E_1^2 E_2, \quad P(2\omega_2 + \omega_1) = 3\chi^{(3)} E_2^2 E_1, \\ P(2\omega_1 + \omega_3) &= 3\chi^{(3)} E_1^2 E_3, \quad P(2\omega_3 + \omega_1) = 3\chi^{(3)} E_3^2 E_1, \\ P(2\omega_2 + \omega_3) &= 3\chi^{(3)} E_2^2 E_3, \quad P(2\omega_3 - \omega_2) = 3\chi^{(3)} E_3^2 E_2, \\ P(2\omega_1 - \omega_2) &= 3\chi^{(3)} E_1^2 E_2^*, \quad P(2\omega_2 - \omega_1) = 3\chi^{(3)} E_2^2 E_1^*, \end{aligned}$$

۲۱-۱