بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت معلم

دانشکده علوم پایه- گروه فیزیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد(M.Sc.)

رشته فیزیک ، گرایش اتمی مولکولی

موضوع

بررسی پایداری انتشار دو طرفه امواج الکترومغناطیسی در محیط دی الکتریک غیر پاشنده

استاد راهنما

دکتر جعفر جهان پناه

نگارش: رضا گلدوزیان

شهریور ۱۳۸۸

فهرست مطالب

عنوان .....**صفحه**

چکیده.....۴

فصل اول : مقدمه ای بر پایان نامه ۵

فصل دوم : بررسی مقدماتی اپتیک غیر خطی.....۹

۲-۱ مقدمه.....۱۰

۲-۲ معادله موج در محیط های غیر خطی.....۱۳

۲-۳ تئوری پراکندگی در اپتیک غیر خطی (نظریه بورن).....۱۵

۲-۴ اپتیک غیر خطی مرتبه دوم.....۱۶

۲-۵ اپتیک غیر خطی مرتبه سوم.....۱۷

۲-۶ تولید هارمونیک سوم.....۱۷

۲-۷ تغییرات فاز.....۱۹

۲-۸ خود همگرایی.....۲۰

۲-۹ خود واگرایی.....۲۲

فصل سوم: حل عددی معادلات غیر خطی شرودینگر.....۲۳

۳-۱ مقدمه.....۲۴

۳-۲ روش مرحله ای فوریه.....۲۴

فصل چهارم: معادلات امواج دو طرفه در محیط کر.....۲۹

فصل پنجم:بررسی تحلیلی ناپایداری امواج دو طرفه در محیط کر.....۳۸

فصل ششم: حل عددی معادلات امواج دو طرفه در محیط کر.....۵۳

۶-۱ مقدمه.....۵۴

۶-۲ شبیه سازی.....۵۴

۶-۳ حل عددی با استفاده از روش فوریه.....۵۸

۶-۴ برنامه نویسی ۶۳

۶-۵ بررسی نمودارها.....۶۶

۶-۶پایداری امواج تخت دو طرفه.....۷۱

۶-۷ بررسی تغییرات شدت آستانه بر حسب بردار موج.....۷۴

۶-۸ بررسی تغییرات شدت آستانه بر حسب طول محیط کر.....۷۵

۶-۹ بررسی ناپایداری امواج دو طرفه گاوسی غیر هم مرکز.....۷۶

۶-۱۰ ناپایداری موج تخت در برهمکنش با موج گاوسی.....۷۸

نتیجه گیری.....۸۲

فهرست منابع و مراجع.....۸۴

Abstract.....۸۸

چکیده

به واسطه اثر کر ، پروفایل امواج الکترومغناطیس در حال انتشار در محیط های غیر خطی ، ناپایدار شده و از خود دو رفتار خود همگرایی یا خود واگرایی نشان می دهند. با استفاده از روش های تحلیلی ، به تعیین شرایط و محدوده پایداری پروفایل امواج الکترومغناطیس در محیط های کر می پردازیم و آستانه ناپایداری را مشخص می کنیم . سپس معادلات موج شرودینگر را به صورت عددی، حل می کنیم و صحت ناپایداری موج را مورد بررسی قرار می دهیم.

مراجع علمی :

1. W.J.Firth , C.Pare ,Opt .Lett . 13(1988) 1096.
2. G.P.Agrawal,J.Opt. Soc .Am. B7 (1990) 1072.
3. Q.Guo,X.Jiang/Optics.Commucations254(2005)19-29.

فصل اول

مقدمه ای بر پایان نامه

با اختراع لیزر، نزدیک به نیم قرن پیش حوزه جدیدی از علم به روی محققین گشوده شد که آن را اپتیک غیرخطی[1] می نامند. از لحاظ تاریخی، اپتیک غیر خطی با تحقیقات تجربی فرنکن[2] آغاز شد. وی در سال ۱۹۶۱ متوجه شد، هنگامیکه کریستال کوارتز را با یک لیزر توان بالا با طول موج ۶۹۴۲ آنگستروم مورد تابش قرار دهیم ، یک سیگنال نوری ضعیف با طول موج ۳۴۷۱ آنگستروم تولید می شود. مدت کوتاهی بعد از این کشف، بلومبرگن[3] و گروهش در دانشگاه هاروارد بسیاری از مبانی اپتیک غیر خطی را فرمولبندی کردند و باعث ظهور پیشرفتهای چشمگیری در حوزه این علم نو شدند. [۱و۳]

با افزایش روز افزون کاربرد اپتیک غیرخطی در صنعت (صنعت ارتباطات وساخت حافظه های نوری[4] و ساخت ابزارهای اپتیکی و ...) و پیدایش علوم جدید ، مطالعه خواص محیطهای غیر خطی نیزازاهمیت ویژه ای برخوردار است و نظر محققین را به خود جلب کرده است .[۳]

در این پایان نامه به تحقیق وبررسی یکی از مهمترین خواص محیطهای غیر خطی یعنی اثر غیر خطی کر[5] می پردازیم . به واسطه اثر کر، مقطع عرضی[6] امواج الکترومغناطیس در حال انتشار در محیط دچار ناپایداری می شوند و از خود دو رفتار خود همگرایی[7] و یا خود واگر ایی[8] نشان می دهند. هر دو رفتار به دلیل تغییر در ضریب شکست اتفاق می افتند که می توان آن را به صورت زیر نوشت .

$$n = n_0 + \Delta n$$

[1] Nonlinear optics
[2] p.a.franken
[3] N.bloembergen
[4] Optical storage
[5] Kerr effect
[6] profile
[7] Self-focusing
[8] Self-defocusing

که در محیط خود همگرا $\Delta n>0$ و در محیط خود واگرا $\Delta n<0$ می باشد.

اکنون اگر در محیط کر دو موج الکترومغناطیس در خلاف جهت هم انتشار یابند[1]، در این صورت انتشار همزمان دو موج مخالف باعث تغییر ضریب شکست محیط برای موج مقابل می شود. بدین ترتیب انتشار هر موج باعث می شود، محیط برای موج مقابل مانند یک توری پراش[2] عمل کند. بنابراین یک ناپایداری دیگر در مقطع عرضی[3] هر موج ، به دلیل پراش ناشی از انتشار همزمان موج مقابل اتفاق می افتد.

همانگونه که در پایان نامه به تفصیل بررسی خواهد شد ، به دو روش در مورد ناپایداری یا محدوده پایداری مقطع عرضی فضایی موج عبوری بحث خواهیم کرد. روش اول مبتنی بر نگاهی اختلالی به انتشار موج در داخل سیستم غیر خطی است و با استفاده از روشهای تحلیلی آستانه ای را برای ناپایداری موج تخت بدست می آوریم. اما برای بررسی بیشتر، با حل عددی معادلات انتشار امواج دو طرفه را در محیطهای غیر خطی کر، تجزیه و تحلیل خواهیم کرد و رفتار موج و مقطع عرضی آن را در عبور از محیط بررسی می کنیم و محدوده پایداری و آستانه ناپایداری را برای حالتهای مختلف موج ورودی بدست می آوریم.

مطالب ارائه شده در فصلهای مختلف این پایان نامه بدین شرح می باشد:

در فصل دوم ، مفاهیم پایه اپتیک غیر خطی را بیان کرده و برخی از معادلات حاکم بر آن را بدست خواهیم آورد. در این فصل بیشتر اپتیک غیر خطی مرتبه سوم را مورد بحث قرار می دهیم و پدیده های این حوزه را بررسی خواهیم کرد.

[1] Counter propagating waves
[2] Diffraction net
[3] profile

در فصل سوم به معرفی روشی برای حل عددی معادله غیر خطی شرودینگر خواهیم پرداخت.

با مقدمات ارائه شده در این دو فصل می توانیم وارد بحث اصلی شویم. بنابراین در فصل چهارم معادلات حاکم بر انتشار امواج دو طرفه را در محیط غیر خطی کر بدست خواهیم آورد ودر فصل پنجم و ششم به ارائه نتایج بدست آمده در مورد ناپایداری امواج دو طرفه در محیط غیر خطی کر خواهیم پرداخت و با استفاده از داده های مربوط به محیط و امواج ورودی آستانه ای را برای ناپایداری امواج دو طرفه بدست می آوریم و در ادامه عوامل موثر بر ناپایداری را مشخص کرده و را بطه آنها را با آستانه ناپایداری مشخص می کنیم.

فصل دوم

بررسی مقدماتی اپتیک غیر

خطی

۲-۱ مقدمه

دانشمندان اپتیک از ابتدا تا اواسط قرن بیستم و حتی تا سالهای نزدیک معتقد بودند که کلیه محیطهای اپتیکی، محیطهای خطی هستند . نتایج این فرضیه را می توان به صورت زیر خلاصه کرد.

۱-خواص اپتیکی مواد همچون ضریب شکست و ضریب جذب مستقل از شدت موج هستند.

۲-اصل برهمنهی قابل اعمال است.

۳-فرکانس نور در عبور از محیط تغییر نمی کند.

۴-دو پرتو نور در داخل محیط نمی توانند روی هم تأثیر بگذارند . بنابراین کنترل یک نور توسط نور دیگر در این محیطها بی معنی است.[۱]

اما ظهور لیزر در سال ۱۹۶۰ ما را قادر به بررسی رفتار نور با شدتهای بالا در محیطهای اپتیکی ساخت . نتایج آزمایشها با نور در شدتهای بالا نشان دهنده رفتاری متفاوت از نور بود که آنرا خاصیت غیر خطی نامیدند . بنابراین کشف خاصیت غیر خطی مواد نتیجه تجربه روزمره و معمول ما از پدیده های اطرافمان نبود، بلکه حاصل پیشرفت علوم بخصوص پیدایش لیزر بود.

در واقع پدیده های غیر خطی ناشی از پاسخ یک محیط دی الکتریک به دامنه میدان نور در شدتهای بسیار بالا می باشد .

برای نور در این محیطها می توان خواص زیر را برشمرد:

۱-ضریب شکست و به دنبال آن سرعت نور در محیط های غیر خطی وابسته به شدت نور ورودی است.

۲-اصل بر همنهی قابل اعمال نخواهد بود.

۳-فرکانس نور در حین عبور از سیستم تغییر خواهد کرد . بطور مثال نور قرمز به آبی تبدیل خواهد شد.

۴-پرتوها داخل سیستم غیر خطی می توانند روی یکدیگر تأثیر گذارند و در واقع می توان از یک نور برای کنترل نور دیگر استفاده کرد.[۱]

رفتار غیر خطی نور ، در عبور نور از محیط آزاد مشاهده نمی شود، زیرا واژه **غیر خطی** به محیطی که نور از آن عبور می کند برمی گردد تا به خود نور. حضور میدان الکتریکی نور سبب تغییراتی در محیط می شود که این تغییرات باعث تغییر میدان خود نور و یا نور دیگر می شود و امکان برهمکنش یک نور با نور دیگر را در این محیطها فراهم می کند.

پاسخ محیط دی الکتریک به موج الکترومغناطیسی منتشره شده در آن ، توسط رابطه بین بردار چگالی قطبش $P(r,t)$ ومیدان الکتریکی $E(r,t)$ تعیین می شود که در آن $P(r,t)$ خروجی و $E(r,t)$ ورودی به سیستم است.رابطه ریاضی که بین P و E وجود دارد وابسته به خواص محیط است . در صورتی که این رابطه غیر خطی باشد ، محیط را نیز غیر خطی نامند . رابطه خطی بین P و E به صورت $P=\varepsilon_0 \chi E$ است که در آن ε_0 ضریب گذردهی خلاء[1] و χ نفوذپذیری[2] الکتریکی محیط است . [۲]

[1] Permittivity coefficient
[2] susceptibility

رفتار غیر خطی را می توان با استفاده از ارتباط خواص میکروسکوپی و ماکروسکوپی محیط به یکدیگر توصیف کرد. به عنوان مثال، چگالی قطبش (P=Np) حاصلضرب گشتاورهای دو قطبی القا شده در هر اتم (p) توسط میدان الکتریکی در چگالی تعداد دو قطبی اتمها (N) می باشد. رابطه بین میدان الکتریکی و چگالی قطبش در صورت کوچک بودن میدان الکتریکی خطی است، اما با افزایش میدان الکتریکی در محدوده میدان الکتریکی داخل اتمی که معمولا از مرتبه $10^5 - 10^8 v/m$ هستند این رابطه غیر خطی است. [۱]

معمولا میدانهای الکتریکی نور اعمالی به محیط در مقایسه با میدان های داخل اتمی کوچک می باشند. بنابراین رابطه بین P و E بطور تقریبی برای میدان های کوچک خطی است و با افزایش E ، تنها مقدار کمی از خطی بودن منحرف می شود. بنابراین تحت این شرایط می توان رابطه بین P و E را به صورت بسط سری تیلور حول E=0 بنویسیم:

$$\mathrm{P} = \mathrm{a}_1 E^1 + \frac{1}{2}\mathrm{a}_2 E^2 + \frac{1}{6}\mathrm{a}_3 E^3 + \cdots \qquad (1-2)$$

که در آن a_1 و a_2 و a_3 به ترتیب مشتقات مرتبه اول ، دوم و سوم نسبت به E هستند که در شرایط E=0 محاسبه می شوند و در عمل این ضرایب را ثابتهای مشخصه سیستم می نامند . در عبارت اول $\mathrm{a}_1 = \varepsilon_0 \chi$ می باشد که در آن χ نفوذپذیری خطی است که بوسیله رابطه $n^2 = 1 + \chi$ به ثابت دی الکتریک و ضریب شکست مربوط می شود . عبارت دوم نمایشگر جمله غیر خطی مرتبه دوم وعبارت سوم نمایشگر جمله غیر خطی مرتبه سوم است.[۳]

معمول است که رابطه (۱) را بصورت زیر می نویسند.

$$\mathrm{P} = \mathrm{a}_1 E^1 + 2\mathrm{d}E^2 + 4\chi^{(3)}E^3 + \cdots \qquad (2-2)$$

که در آن $d = \frac{1}{4}\mathrm{a}_2$ و $\chi^{(3)} = \frac{1}{24}\mathrm{a}_3$ می باشد .

در محیطهایی که دارای تقارن مرکزی[1] هستند یعنی با تغییر $r \to -r$ و $E \to -E$ باید $P \to -P$ تبدیل شود و باید P تابع فردی از E باشد . بنابراین ضریب غیر خطی مرتبه دوم در چنین محیطهایی برابر با صفر است و پایین ترین مرتبه غیر خطی ، جمله غیر خطی مرتبه سوم است.

مقادیر مربوط به ضریب غیر خطی مرتبه دوم (d) برای کریستالهای دی الکتریک و نیمه هادیها ومحیطهایی که در فوتونیک استفاده می شوند در محدوده $10^{-24} - 10^{-27} MKS\ units$ و مقادیر معمول ضریب غیر خطی مرتبه سوم ($\chi^{(3)}$) برای شیشه ها وکریستالها و نیمه هادی ها در محدوده $10^{-34} - 10^{-29} MKS\ units$ می باشد. [۱]

۲-۲معادله موج در محیطهای غیرخطی

انتشار نور در محیط غیر خطی توسط معادله موجی توصیف می شود که از معادلات ماکسول برای یک محیط دی الکتریک ویکنواخت بدست می آید . (نحوه بدست آوردن آن در بخشهای بعدی توضیح داده خواهد شد) یکنواختی وهمسانی محیط باعث می شود بتوان برای هر مؤلفه میدان الکتریکی معادله موج را به صورت زیر نوشت:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \qquad (3-2)$$

[1] Centro symmetric

مناسب تـر اسـت کـه قطـبش کـل را بصـورت مجمـوع قطـبش خطـی وغیـر خطـی بنویسیم.

$$P = \varepsilon_0 \chi E + P_{nl} \qquad (4-2)$$

$$P_{nl} = 2dE^2 + 4\chi^{(3)}E^3 + \cdots \qquad (5-2)$$

بنابراین می توانیم معادله موج را به صورت زیر بنویسیم.

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \chi\mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 P_{nl}}{\partial t^2} \qquad (6-2)$$

$$\nabla^2 E - \frac{n^2}{c_0^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P_{nl}}{\partial t^2} \qquad (7-2)$$

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -s \qquad (8-2)$$

که s را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$\mathrm{S} = -\mu_0 \frac{\partial^2 P_{nl}}{\partial t^2} \qquad (9-2)$$

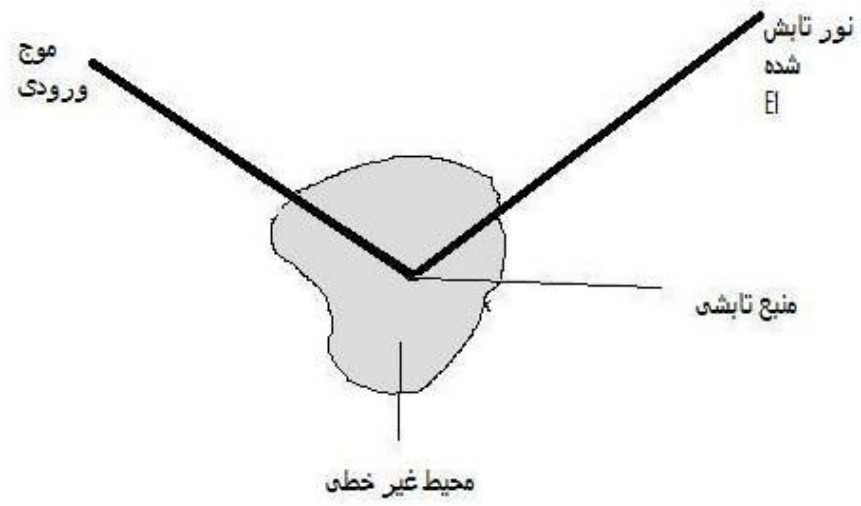
مـی تـوان معادلـه (۲-۸) را بـه عنـوان معادلـه مـوجی در نظـر گرفـت کـه در آن ، s به عنوان یک منبع تـابش در یـک محـیط خطـی بـا ضـریب شکسـت n اسـت. چـون $\mathrm{p_{nl}}$ (و در نتیجـه s) یـک تـابع غیـر خطـی از E اسـت ، بنـابراین معادلـه مـوج در یـک محـیط غیـر خطی، یک معادله دیفرانسیل جزئـی غیـر خطـی از E اسـت. ایـن معادلـه رابطـه اصـلی بـرای بررسی تئوری اصول غیر خطی است.[۴]

بـرای حـل ایـن معادلـه مـوج از دو تقریـب مـی تـوان اسـتفاده کـرد. اولـین تقریـب، روش تکراری است کـه آن را تقریـب بـورن مـی نامنـد. در ایـن روش، اپتیـک غیـر خطـی بـا الگویی ساده ارائـه مـی شـود. روش دوم نظریـه مـوج جفـت شـده اسـت کـه در آن از معادلـه

موج غیرخطی به عنوان وسیله ای برای بدست آوردن دو معادله موج جفت شده خطی حاکم بر برهمکنش موج استفاده می شود. در این پایان نامه برای بدست آوردن معادلات حاکم بر سیستم مورد نظر از روش تقریب بورن استفاده شده است. [۱]

۲-۳ تئوری پراکندگی در اپتیک غیر خطی (نظریه بورن)

میدان تابشی در معادله (۲-۸) تابعی از میدان الکتریکی است. برای تأکید بر این نکته s را بصورت s(E) و فرایند موجود را با یک مدل ساده نمایش می دهیم. که در شکل زیر مشخص است.



شکل (۲-۱) مدل برهمکنش نور با محیط غیر خطی در تقریب بورن

در شکل (۲-۱) میدان الکتریکی نور ورودی E_0 به یک محیط غیر خطی وارد می شود و این میدان یک منبع تابشی به صورت $s(E_0)$ تولید می کند، که میدان E_1 را تابش می کند، اما میدان تابشی E_1 خود یک منبع تابشی $s(E_1)$ را تولید می کند ، که میدان E_2 را تابش می کند و این روند به همین صورت ادامه

خواهد یافت. این روش، یک راه حل مبتنی بر تکرار را پیشنهاد می کند. مرحله اول آن را تقریب مرتبه اول بورن ومرحله دوم آن را تقریب مرحله دوم بورن و ... می نامند.

تقریب مرتبه اول بورن در شدتهای کم تقریب خوبی است . در این تقریب انتشار نور در محیط غیر خطی را به عنوان یک فرایند پراکندگی در نظر می گیرند، در آن موج فرودی توسط محیط پراکنده می شود و نور پراکنده در دو مرحله از نور فرودی بدست می آید.

۱-از موج فرودی E_0 برای تعیین چگالی قطبش غیر خطی (P_{nl}) استفاده می شود. سپس از آن طریق منبع تابشی $(s(E_0))$ را مشخص می کنند.

۲-میدان تابشی E_1 (پراکنده) از میدان تابشی بوسیله اضافه کردن امواج کروی از نقاط مختلف منبع بدست می اید .

مراحل مختلف ارائه شده در این پایان نامه مبتنی بر تقریب اول بورن است. فرض بر این است که میدان اولیه E_0 شامل یک یا چند موج تک مد در فرکانسهای مختلف است. قطبش غیر خطی مرتبط از طریق رابطه (۲-۵) مشخص می شود و چون $s(E_0)$ یک تابع غیر خطی است ، فرکانسهای جدیدی خلق می شود. [۵] بنابراین منبع تابشی E_1 فرکانسهایی غیراز فرکانس های موجود در E_0 را تابش می کند. این عامل منجر به خلق پدیده های جالبی می شود که می توان از آن در طراحی و ساخت وسایل نوری استفاده کرد.

۲-۴ اپتیک غیر خطی مرتبه دوم

این قسمت مربوط به خواص اپتیکی غیر خطی است که از جملات غیر خطی مرتبه دوم به بالا صرفنظر می شود، بنابراین

$$P_{nl} = 2dE^2$$

چون محیط در نظر گرفته شده در این پایان نامه مربوط به این قسمت نیست، تنها با ذکر برخی از این پدیده ها این قسمت را به پایان می بریم.

در مورد پدیده های مربوط به اثرات غیر خطی مرتبه دوم می توان به تولید هارمونیک دوم[1] ، ترکیب سه موج[2] ، اثر الکترواپتیک[3] ، ترکیب فرکانس و فاز[4] اشاره کرد. توضیحات مربوط به هر کدام از خواص در کتابهای پایه اپتیک غیر خطی موجود است.[۱و۲و۳و۴]

۲-۵ اپتیک غیر خطی مرتبه سوم

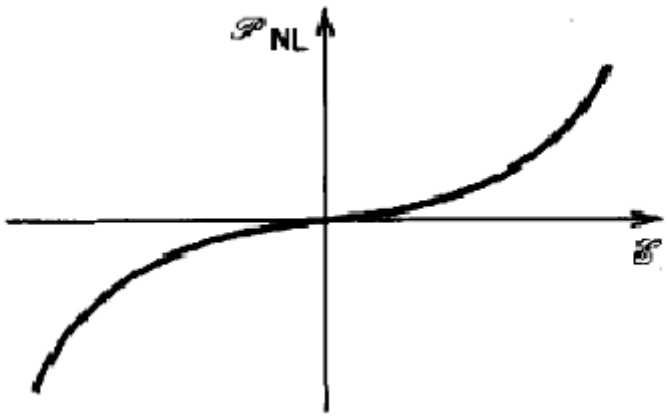
در محیط های دارای تقارن مرکزی جمله غیر خطی مرتبه دوم حضور ندارد، زیرا در این نوع مواد باید با معکوس شدن میدان، قطبش نیز معکوس شود. چون قطبش باید تابع فردی از میدان باشد لذا عدم حضور جمله غیر خطی مرتبه دوم ضروری است. بنابراین جمله غیر خطی غالب ، جمله مرتبه سوم است که به صورت $P_{\mathrm{nl}} = 4\chi^{(3)}\mathrm{E}^3$ می باشد. موادی که دارای خاصیت ذکر شده هستند را محیط کر می نامند. پاسخ محیطهای کر به میدان اعمالی ، به وسیله تولید هارمونیک سوم ومجموع یا تفاوت سه گانه فرکانسها است.

۲-۶ تولید هارمونیک سوم

[1] Second harmonic generation
[2] Three wave mixing
[3] Electro optic effect
[4] Frequency and phase matching

با توجه به رابطه (۱-۲)، پاسخ محیط های غیر خطی مرتبه سوم به یک میدان الکتریکی تک مد ($E(t) = Re\{E(\omega)e^{i\omega t}\}$) ایجاد یک قطبش غیر خطی است که شامل یک مؤلفه در فرکانس ω و یک مؤلفه در فرکانس 3ω است.

$$P_{\mathrm{nl}}(\omega) = 3\chi^3|\mathrm{E}(\omega)|^2\mathrm{E}(\omega) \qquad (10-2)$$



شکل (۲-۲) نمودار قطبش مرتبه سوم برحسب میدان نور اعمالی

$$P_{nl}(3\omega) = \chi^{(3)}E(\omega)^3 \qquad (11-2)$$

در رابطه (۲-۱۱) ، حضور مؤلفه ای از قطبش در فرکانس 3ω ، نشان دهنده تولید هارمونیک سوم است.

حضور مؤلفه ای از قطبش در فرکانس ω ، مطابق با تغییرات در نفوذپذیر ($\Delta\chi$) در فرکانس مربوط است که طبق رابطه زیر بیان می شود.

$$\varepsilon_0\Delta\chi = \frac{P_{nl}(\omega)}{E(\omega)} = 3\chi^{(3)}|E(\omega)|^2 = 6\chi^{(3)}\eta I \qquad (12-2)$$

در این رابطه $I = \frac{|E(\omega)|^2}{2\eta}$ ، شدت موج ورودی است .

بـــا توجـــه بـــه اینکـــه $n^2 = 1 + \chi$ بنـــابراین $\Delta\chi = 2n\Delta n$ مـــی باشـــد . در نتیجه $\Delta\chi$ متناسب با تغییرات ضریب شکست است. لذا داریم.

$$\Delta n = \frac{\Delta\chi}{2n} \rightarrow \Delta n = \frac{3\eta}{\varepsilon_0 n}\chi^{(3)} I \equiv n_2 I \qquad (13-2)$$

که در آن n_2 ضریب اپتیکی کر می باشد.

$$n_2 = \frac{3\eta}{\varepsilon_0 n}\chi^{(3)} \qquad (14-2)$$

بـا توجـه بـه رابطـه (۲-۱۳) تغییـرات در ضـریب شکسـت متناسـب بـا شـدت اسـت و ضریب کل ، تابعی خطی از شدت است، طوری که داریم.

$$n(I) = n + n_2(I) \qquad (15-2)$$

این اثر را، اثر اپتیکی کـر مـی نامنـد، ایـن نامگـذاری بـه علـت شـباهت ایـن اثـر بـه اثـر الکترواپتیکـی کـر اسـت کـه در آن اثـر Δn ، متناسـب بـا تـوان دوم میـدان الکتریکـی خارجی اعمالی است.

اثر اپتیکی کر، یـک اثـر خودالقـا اسـت . در آن سـرعت فـاز مـوج، وابسـته بـه شـدت آن است که نمونه ای از اثرات ضریب شکست غیر خطی[1] است.

مرتبـــــه انـــــدازه n_2 در محـــــدوده $10^{-14} - 10^{-16}\,\frac{cm^2}{\mathrm{w}}$ در شیشـــــه و $10^{-2} - 10^{-14}\,\frac{cm^2}{\mathrm{w}}$ در نیمه هادیهاست. [۱]

۲-۷ تغییرات فاز[2]

[1] Nonlinear refraction
[2] Self phase modulation