

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کاشان
دانشکده فیزیک

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک

عنوان:

بررسی و تحلیل پدیده های غیر خطی و مشخصه های

پاشندگی لیزر در نانو موجبر ها

استاد راهنما :

دکتر حمیدرضا زنگنه

به وسیله :

منیره ملکیان ثابت

بهمن ۱۳۹۰

تقدیم به

مادر عزیز

و

پدر مهربانم

زیبا ترین آفرینش های خلقت ، استوارترین تکیه گاه برای زندگی

من

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود. در اینجا بر خود لازم می دانم از تمامی اساتید بزرگوار بویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده اند تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد گرامی و بزرگوار جناب آقای دکتر حمیدرضا زنگنه که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق ، پژوهش و نگارش این پایان نامه تقبل نموده اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم. همچنین از تشریف فرمایی آقای دکتر بهرام جزی و آقای دکتر احسان روزمه بعنوان اساتید داور داخل دانشگاه که پایان نامه اینجانب را مورد مطالعه قرار دادند و در جلسه دفاعیه شرکت نموده اند تشکر می نمایم.

در پایان هم از نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه آقای دکتر بامنیری که قبول زحمت نموده اند، سپاسگزاری می نمایم.

چکیده

امروزه گسترش تکنولوژی، باعث کوچک سازی ادوات الکترونیکی و اپتیکی در اندازه های میکرو و نانو شده است. پیشرفت های اخیر در فناوری تولید ساختارهایی در ابعاد نانو، امکان دستیابی به سیستم های تمام اپتیکی و همچنین انجام پژوهش های بنیادی و بررسی فرآیند های اپتیکی در ابعاد نانو را فراهم کرده است. از این رو شبیه سازی این ساختارها از مسائل مهم روز به شمار می رود. در این پایان نامه تعیین و شبیه سازی پارامترهای انتشار از جمله ضریب شکست گروه لیزر دمش، ثابت انتشار و ضریب شکست موثر لیزر تراهرتز با استفاده از روش های محاسباتی تفاضل محدود حوزه ی زمان (FDTD) و تفاضل محدود حوزه ی فرکانس (FDFD) در موجبرهایی با ابعاد نانو انجام گرفته است. در این موجبرها از بلورهای غیر خطی گالیوم آرسناید (GaAs) و تلورید روی (ZnTe) و همچنین فلز نقره استفاده شده است. تولید امواج تراهرتز در این موجبرها می تواند با استفاده از روش تولید تفاضل فرکانسی (DFG) صورت گیرد.

کلمات کلیدی: نانو موجبر، روش تفاضل محدود حوزه ی فرکانس، روش تفاضل محدود حوزه ی زمان، تولید فرکانس تفاضلی، جورشدهگی فاز

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول : مقدمه.....	۱
فصل دوم : اپتیک غیر خطی	
۱-۲ مقدمه ای بر اپتیک غیر خطی.....	۵
۲-۲ توصیف بر هم کنش های نوری غیر خطی.....	۷
۱-۲-۲ تولید هماهنگ دوم.....	۷
۲-۲-۲ تولید بسامد مجموع و بسامد تفاضل.....	۹
۳-۲-۲ نوسان پارامتری نوری.....	۱۲
۴-۲-۲ قطبش مرتبه سوم.....	۱۳
۳-۲ تعریف پذیرفتاری غیر خطی.....	۱۳
۴-۲ ویژگی های پذیرفتاری غیر خطی.....	۱۴
۱-۴-۲ حقیقی بودن میدان ها.....	۱۵
۲-۴-۲ تقارن جایگشت ذاتی.....	۱۵
۳-۴-۲ تقارن های محیط بدون اتلاف.....	۱۶
۴-۴-۲ تقارن کلایمن.....	۱۶
۵-۲ نماد گذار قرار دادی.....	۱۷
۶-۲ توصیف برهم کنش های نوری غیر خطی با معادله موج.....	۱۸
۱-۶-۲ معادله موج در محیط های نوری غیر خطی.....	۱۸
۲-۶-۲ معادلات کوپل شده موج برای تولید بسامد تفاضل.....	۲۰
۷-۲ اثر جفت شدگی فاز.....	۲۳

فصل سوم : امواج تراهرتز

۲۶.....	۱-۳ مقدمه.....
۲۸.....	۲-۳ کاربردهای امواج تراهرتز.....
۳۲.....	۳-۳ روش های تولید امواج تراهرتز.....
۳۲.....	۱-۳-۳ روش آنتن گسیل کننده رسانش نوری.....
۳۲.....	۲-۳-۳ یکسو سازی اپتیکی در محیط غیر خطی.....
۳۴.....	۴-۳ روش های آشکار سازی تراهرتز.....
۳۴.....	۱-۴-۳ آنتن های گیرنده رسانش نوری.....
۳۵.....	۲-۴-۳ نمونه برداری الکترواپتیکی.....

فصل چهارم : روش FDTD

۳۸.....	۱-۴ مقدمه.....
۳۹.....	۲-۴ روش تفاضل محدود.....
۴۰.....	۳-۴ روش تفاضل محدود حوزه ی فرکانس.....
۴۴.....	۴-۴ روش تفاضل محدود حوزه ی زمان.....
۴۵.....	۱-۴-۴ ویژگی های FDTD.....
۴۶.....	۱-۱-۴-۴ تعیین ابعاد شبکه در FDTD.....
۴۶.....	۲-۱-۴-۴ تعیین پله زمانی در FDTD.....
۴۷.....	۵-۴ مقدمه ای بر الگوریتم Yee.....
۵۱.....	۱-۵-۴ عبارت تفاضل متناهی برای معادلات ماکسول در سه بعد.....
۵۴.....	۶-۴ شبیه سازی یک بعدی FDTD.....
۵۴.....	۱-۶-۴ روابط به روز رسانی.....
۵۸.....	۲-۶-۴ اجرای شبیه سازی FDTD یک بعدی.....
۵۹.....	۳-۶-۴ برنامه FDTD شبیه ساز یک بعدی.....
۶۱.....	۷-۴ شبیه سازی دو بعدی FDTD.....
۶۱.....	۱-۷-۴ معادلات به روز رسانی دو بعدی قطبش TM.....
۶۵.....	۲-۷-۴ اجرای شبیه سازی FDTD دو بعدی مود TM.....
۶۶.....	۸-۴ چشمه موج در FDTD.....
۶۶.....	۱-۸-۴ روش های اعمال منبع موج در FDTD.....

۶۸.....	۲-۸-۴ شکل منبع موج.....
۶۹.....	۹-۴ شرایط مرزی محیط شبیه سازی در FDTD.....
فصل پنجم : مدل سازی و شبیه سازی	
۸۰.....	۱-۵ مقدمه.....
۸۰.....	۲-۵ نیمه هادی ها و خواص آنها.....
۸۲.....	۳-۵ تئوری فرآیند تولید تفاضل فرکانس در موجبر.....
۸۳.....	۱-۳-۵ بدست آوردن معادلات مربوط به تولید موج تراهرتز در موجبر.....
۸۶.....	۲-۳-۵ بدست آوردن معادلات مربوط به دامنه های لیزر دمش وسیگنال.....
۸۸.....	۳-۳-۵ شرط جورشدگی فاز برای تولید امواج تراهرتز.....
۸۹.....	۴-۳-۵ محاسبه بازده تولید موج تراهرتز در موجبرها.....
۹۱.....	۴-۵ مدل سازی و شبیه سازی چند موجبر با روش FDTD.....
۱۱۱.....	نتیجه گیری.....
۱۱۲.....	فهرست مراجع.....
پیوست ها	
۱۱۶.....	پیوست ۱.....
۱۱۶.....	پیوست ۲.....
۱۱۷.....	پیوست ۳.....

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲ (الف) هندسه تولید هماهنگ دوم. (ب) نمودار تراز انرژی.....	۸
شکل ۲-۲ تولید بسامد مجموع. (الف) هندسه برهم کنش . (ب) توصیف تراز- انرژی.....	۱۱
شکل ۲-۳ تولید بسامد تفاضل. (الف) هندسه برهم کنش. (ب) توصیف تراز - انرژی.....	۱۲
شکل ۲-۴ تولید فرکانس تفاضل.....	۲۰
شکل ۱-۳ طیف امواج الکترومغناطیس [۵].....	۲۷
شکل ۲-۳ اولین تصاویری که توسط امواج ترا هرتز در سال ۱۹۹۵ تهیه شد.....	۲۸
شکل ۳-۳ تصویر برداری تراهرتز از یک دندان [۷].....	۲۹
شکل ۳-۴ تصویر برداری تراهرتز از وسایل پنهان شده.....	۳۱
شکل ۳-۶ شمایی از طرز کار یک آنتن رسانش نوری گیرنده.....	۳۵
شکل ۳-۷ اساس تکنیک نمونه برداری اپتیکی: چیدمانی با یک گیرنده رسانش نوری.....	۳۶
شکل ۱-۴ سلول واحد Yee به همراه میدان های الکتریکی و مغناطیسی.....	۴۸
شکل ۲-۴ نمایش آرایش میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در الگوریتم.....	۴۹
شکل ۳-۴ آرایش دو بعدی گره های میدان های الکتریکی و مغناطیسی در فضا و زمان.....	۵۵
شکل ۴-۴ آرایش گره های میدانهای التریکی و مغناطیسی در دو بعد فضا و زمان.....	۵۶
شکل ۴-۵ شبکه یک بعدی FDTD میدانهای الکتریکی و مغناطیسی مجاور با اندیس یکسان.....	۵۸
شکل ۴-۶ نمودار آبخاری پیشروی موج در شبکه FDTD با زمان.....	۶۱
شکل ۴-۷ آرایش گره های میدان ها در شبکه FDTD دو بعدی قطبش TM.....	۶۳
شکل ۴-۸ توزیع میدان الکتریکی در شبکه دو بعدی TM در پله زمانی ۷۰.....	۶۶
شکل ۴-۹ : شبکه بندی در مرز (رسانای الکتریکی).....	۷۰
شکل ۴-۱۰. مرز واقع بر امتداد yها و فرود موج در جهت X.....	۷۸
شکل ۴-۱۱. ناحیه PML به عنوان ناحیه مرزی جاذب اطراف محیط خلا.....	۸۰
شکل ۲-۵ نمایی از موجبر فلزی شکافدار $w_1=4 \mu m$ و $w_2=0.24 \mu m$ و $h=0.3 \mu m$	۹۳

شکل ۴-۵ الف) نحوه انتشار مولفه حقیقی E_y لیزر دمش هنگامی که فرکانس آن از ۹۰ THz تا ۱۶۰ THz باشد ب) مولفه حقیقی E_x موج

۹۴.....THz

شکل ۷-۵ نمایشی از موجبر فلزی شکافدار $a = 4/5 \mu m$ و $b = 0/5 \mu m$

۹۶..... $c = 0/5 \mu m$

شکل ۹-۵ الف) نحوه انتشار مولفه حقیقی E_y لیزر دمش هنگامی که فرکانس آن بین ۱۸۷ THz تا ۲۴۶ THz باشد ب) مولفه حقیقی E_x موج

۹۸.....THz

شکل ۱۲-۵ نمایشی از موجبر طراحی شده $a = 0/24 \mu m$ و $b = 0/3 \mu m$ ۱۰۰

شکل ۱۵-۵ الف) نحوه انتشار مؤلفه E_x موج تراهرتز در موجبر. ب) نحوه انتشار مؤلفه E_y لیزر دمش در موجبر هنگامی که فرکانس آن بین ۱۵۰ THz تا ۱۸۷ THz تغییر

کند..... ۱۰۲

شکل ۲۰-۵ الف) نحوه انتشار مولفه حقیقی E_y لیزر دمش هنگامی که فرکانس آن بین ۱۹۱ THz تا ۲۲۰ THz تغییر کند. ب) مولفه حقیقی E_x موج

۱۰۶.....THz

شکل ۲۲-۵ الف) موجبر مستطیلی ناهمگن با دی الکتریک SiO_2 . ب) موجبر مستطیلی ناهمگن با لایه ای باریک از دی

الکتریک Si..... ۱۰۸

شکل ۲۴-۵ الف) نحوه انتشار مؤلفه E_y در موجبر SiO_2 . ب) نحوه انتشار مؤلفه E_y در موجبر

Si..... ۱۱۰

فهرست نمودارها

- نمودار ۳-۵ نمودار جذبی بخار آب [۱۸]..... ۳۲
- نمودار ۱-۵ نمودار ضریب شکست بر حسب طول موج برای GaAs..... ۸۳
- نمودار ۳-۵ پاشندگی لیزر دمش در موجبر شکافدار. هنگامی که طول موج لیزر دمش از $1/8 \mu\text{m}$ تا $3/36 \mu\text{m}$ تغییر کند..... ۹۳
- نمودار ۵-۵ پاشندگی موج THz در موجبر شکافدار..... ۹۵
- نمودار ۶-۵ ضریب شکست موثر موج THz و ضریب شکست گروه لیزر دمش..... ۹۵
- نمودار ۸-۵ پاشندگی لیزر دمش در موجبر شکافدار. هنگامی که طول موج لیزر دمش از $1/2 \mu\text{m}$ تا $1/6 \mu\text{m}$ تغییر کند..... ۹۷
- نمودار ۵-۱۰ پاشندگی موج THz در موجبر شکافدار..... ۹۹
- نمودار ۵-۱۱ ضریب شکست موثر موج THz و ضریب شکست گروه لیزر دمش. هنگامی که طول موج لیزر دمش از $1/2 \mu\text{m}$ تا $1/6 \mu\text{m}$ تغییر کند (بسامد از 187 THz تا 246 THz) و کوک‌پذیری موج از $2/5 \text{ THz}$ تا $3/5 \text{ THz}$ باشد..... ۹۹
- نمودار ۵-۱۳ پاشندگی لیزر دمش در موجبر هنگامی که طول موج آن بین $1/6 \mu\text{m}$ تا $1/9 \mu\text{m}$ تغییر کند..... ۱۰۱
- نمودار ۵-۱۴ پاشندگی موج تراهرتز در موجبر..... ۱۰۱
- نمودار ۵-۱۶ ضریب شکست موثر موج THz و ضریب شکست گروه لیزر دمش. هنگامی که طول موج لیزر دمش از $1/6 \mu\text{m}$ تا $2 \mu\text{m}$ تغییر کند (بسامد از 150 THz تا 187 THz)..... ۱۰۳
- نمودار ۵-۱۷ نمودار ضریب شکست بر حسب طول موج برای ZnTe..... ۱۰۴
- نمودار ۵-۱۸ پاشندگی لیزر دمش در موجبر هنگامی که فرکانس آن بین 190 THz تا 220 THz تغییر کند..... ۱۰۵
- نمودار ۵-۱۹ پاشندگی موج THz در موجبر شکافدار..... ۱۰۵

نمودار ۵-۲۱. ضریب شکست موثر موج THz و ضریب شکست گروه لیزر دمش، هنگامی که طول موج لیزر دمش از $1/3 \mu\text{m}$ تا $1/5 \mu\text{m}$ تغییر کند (بسامد از ۱۹۱ THz تا ۲۲۰ THz)..... ۱۰۷

نمودار ۵-۲۳. پاشندگی در موجبر مستطیلی، شکل (۵-۲۲ الف) با ماده دی الکتریک SiO_2 ۱۰۹

نمودار ۵-۲۵. پاشندگی در موجبر مستطیلی، شکل (ب-۳) با ماده دی الکتریک Si..... ۱۱۰

فصل اول

مقدمه

پیشرفت های اخیر در فناوری تولید ساختارهایی در ابعاد نانو، امکان دستیابی به سیستم های تمام اپتیکی و همچنین انجام پژوهش های بنیادی و بررسی فرآیند های اپتیکی در ابعاد نانو را فراهم کرده است [۲].

در این راستا شاخه های جدیدی از علم همچون نانو اپتیک و نانو فوتونیک پدید آمده که به بررسی پدیده های اپتیکی برهم کنش نور - ماده و امکان کنترل نور در ابعاد نانو می پردازند که طی دهه ی گذشته رشد قابل ملاحظه ای داشته است. بنابراین به منظور کنترل و هدایت نور در ابعاد نانو، ابزارهایی فوتونیکی معادل با ابزارهای با ابزارهای الکترونیکی موجود از قبیل کاواک، موجبر و غیره با کمک بلورهای فوتونیک ساخته شده اند. در این حوزه ، به دلیل پیچیدگی در ساختارهای مورد بررسی و میدان های برهم کنش کننده ، اغلب از تکنیک های محاسباتی استفاده می شود. در حوزه تکنولوژی می توان هزینه بسیار بالای طراحی و ساخت

قطعات را بطور قابل ملاحظه ای کاهش داد. بدین منظور ابتدا مدل مورد نظر توسط نرم افزارهای بهینه سازی و شبیه سازی طراحی می گردد. پس از اطمینان از کارایی مدل با پارامترهای بدست آمده از شبیه سازی، قطعه مورد نظر ساخته می شود. یکی از روش های پرکاربرد در حل مسائل، روش عددی تفاضل محدود است که برای حل معادلات دیفرانسیلی استفاده می شود و مبنای این روش، حلقه بندی فضای مورد بررسی به عناصر کوچک است. معادله دیفرانسیلی در روش عددی تفاضل محدود با استفاده از تعریف مشتق - یعنی تفاضل مقدار تابع در دو نقطه تقسیم بر فاصله آنها حل می شود. برای حل مسائل الکترومغناطیسی معمولاً از الگوریتم Yee استفاده می گردد [۳۵] در این روش از شکل دیفرانسیلی معادلات ماکسول، به روش تفاضلات محدود مرکزی در هر دو حوزه‌ی زمان (FDTD)^۱ و فرکانس (FDTD)^۲ استفاده می شود. روش تفاضل محدود اولین بار توسط تام در سال ۱۹۲۰ ارائه شد [۳۴،۳۶]. که ما در این پایان نامه از روش تفاضل محدود دامنه‌ی زمان (FDTD) به دلیل توانایی حل معادلات ماکسول برای ساختارهای پیچیده با ابعاد و شکل دلخواه استفاده می کنیم. روش FDTD به خاطر سادگی و انعطافش روش بسیار خوبی برای شبیه سازی میکرو نوارها است که این روش توسط Yee در سال ۱۹۶۶ ارائه شد که با کمک آن معادلات ماکسول در مسائل پراکندگی را به صورت عددی حل می شد [۳۵].

در اوایل دهه‌ی ۸۰ میلادی تافلوه^۳ و دیگران روش های عددی مربوط به این الگوریتم را گسترش [۴۲-۴۴] و مدلسازی انتشار و پراکندگی امواج الکترومغناطیس در محیط های غیرخطی و پاشنده با استفاده از این روش انجام شد.

در این روش، فضای شبیه سازی با سلول های شبکه بندی شده و با اختصاص خواص اپتیکی به سلول های این شبکه، ساختار مورد مطالعه مدل سازی می شود. بر روی هر سلول مولفه

^۱ Finite Difference Time Domain

^۲ Finite Difference Frequency Domain

^۳ Taflove

های میدان الکتریکی و مغناطیسی با ترتیب خاصی قرار داده می شوند. با به کارگیری تفاضل محدود بر روی معادلات وابسته به زمان ماکسول، مجموعه ای از روابط برای محاسبه ی مولفه های میدان الکترومغناطیس بر حسب مقادیر مربوط در زمان های قبل به دست می آیند. بدین ترتیب که ابتدا میدان های مورد بحث با شرایط اولیه ی مناسب مقدار دهی می شوند و سپس در یک حلقه ی زمانی مقادیر جدید برای هر مولفه با در اختیار داشتن میدان های الکتریکی و مغناطیسی مجاور در یک گام زمانی عقب تر بدست می آیند. پس از پایان یافتن زمان شبیه سازی، با در اختیار داشتن مقادیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی در تمامی سلول ها، می توان کمیت های فیزیکی مورد نظر را محاسبه کرد.

امروزه با توجه به کاربردهای دو دهه ی گذشته منطقه فرکانسی تراهرتز در علوم و تکنولوژی، محققان بسیاری را در این زمینه جذب کرده است. در طیف الکترومغناطیس، طول موج های متفاوتی وجود دارند از جمله امواج رادیویی، میکروویو، مادون قرمز، مرئی، اشعه ایکس و... در فاصله طول موج های بین پرتوهای میکروویو و مرئی امواج تراهرتز قرار دارند [۵]. بسامد این امواج از چند تراهرتز تا صدگیگا هرتز می باشد.

از جمله کاربردهای امواج تراهرتز می توان به تصویر برداری و طیف سنجی در صنایع غذایی، پزشکی مانند شناسایی DNA، مطالعه امراضی چون سرطان می پردازد که در آن سلول ها دارای لرزش های تراهرتزی می باشند و نیز ساخت سیستم های حفاظتی، تشخیص ترکیبات شیمیایی و کاربردهای دیگری در صنعت، نظامی و غیره را می توان اشاره کرد [۶].

از آنجا که فرکانس های چرخشی و ارتعاشی اکثر مولکول ها در این بازه طیفی قرار دارند در صورتیکه از این امواج برای تصویربرداری و اسکپتروسکوپی^۱ استفاده شود اطلاعات جالب و

^۱Spectroscopy

منحصر به فردی از ساختار مولکولی نمونه بدست می آید [۷]. با توجه به کاربردهای روز افزون امواج تراهرتز تولید این امواج از مهمترین مسائل روز به شمار می رود.

در این پایان نامه موجبرهایی با ابعاد نانو برای تولید امواج تراهرتز پیشنهاد شده است که در این نانو موجبرها از بلورهای غیر خطی گالیم آرسناید (GaAs^1) و تلورید روی (ZnTe^2) و همچنین فلز نقره استفاده شده است.

امواج تراهرتز در این موجبرها با روش تفاضل فرکانسی (DFG³) تولید می شوند. در این روش دو پرتوی لیزری با فرکانس ω_1 و ω_2 در یک ماده غیرخطی ترکیب می شوند و پرتوی دیگری در فرکانس $\omega_1 - \omega_2$ پدید می آید. به عبارتی تولید امواج تراهرتز در صورتی اتفاق می افتد که شرط جورشدگی فاز برقرار باشد به این صورت که ضریب شکست گروه لیزر دمش برابر با ضریب شکست موثر موج در فرکانس تفاضلی ($n_{gr} = n_{THz}$) می باشد و همچنین تغییرات ثابت انتشار ($\Delta\beta$) صفر باشد. در انتهای این پایان نامه نحوه ی انتشار لیزر و شرط جورشدگی فاز با استفاده از روش FDTD با بهره گیری از الگوریتم Yee برای موجبرها مدلسازی و بررسی شده است.

Gallium arsenide¹

Zinc telluride²

³ Difference Frequency Generation

فصل دوم

اپتیک غیر خطی

۲-۱ مقدمه ای بر اپتیک غیر خطی

اپتیک غیر خطی مطالعه پدیده هایی است که در اثر تغییر و اصلاح ویژگی های نوری مواد در حضور نور رخ می دهد. نوعاً تنها نور لیزر، شدت کافی را برای تصحیح ویژگی های نوری اجسام دارد. در واقع، آغاز شاخه اپتیک غیر خطی به کشف تولید همهانگ دوم توسط فرانکن و همکارانش در سال ۱۹۶۱، بلافاصله بعد از به نمایش در آمدن نحوه کار اولین لیزر به وسیله ی مایمن در سال ۱۹۶۰، بر می گردد [۳، ۱].

پدیده های نوری غیر خطی از این جهت "غیر خطی" اند که وقتی اتفاق می افتند که پاسخ سیستم مادی به میدان نوری اعمال شده یک پاسخ غیر خطی باشد. برای مثال، تولید همهانگ دوم نتیجه بخشی از پاسخ اتمی است که بستگی به توان دوم قدرت میدان نوری اعمال شده دارد. در نتیجه شدت نور تولید شده در بسامد همهانگ دوم با مربع شدت نور لیزر اعمال شده افزایش می یابد. برای توضیح دقیق تر از اپتیک غیر خطی بررسی می کنیم که گشتاور دو قطبی در واحد حجم، یا قطبش $\vec{P}(t)$ یک جسم چگونه به قدرت $\vec{E}(t)$ میدان نوری اعمال شده بستگی دارد. در اپتیک خطی، قطبش القا شده بستگی خطی به میدان الکتریکی دارد و معمولاً با رابطه

$$\tilde{\mathbf{P}}(\mathbf{t}) = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{t}) \quad (1-2)$$

توصیف می شود، که ثابت تناسب $\chi^{(1)}$ پذیرفتاری^۱ خطی نامیده شده است. اغلب در نورشناسی غیرخطی، می توان پاسخ نوری غیرخطی را با تعمیم رابطه (۱-۲) از طریق بسط قطبش $\tilde{\mathbf{P}}(\mathbf{t})$ برحسب توان های قدرت میدان $\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{t})$ به صورت زیر توصیف کرد :

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{P}}(\mathbf{t}) &= \varepsilon_0 [\chi^{(1)} \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{t}) + \chi^{(2)} \tilde{\mathbf{E}}^2(\mathbf{t}) + \chi^{(3)} \tilde{\mathbf{E}}^3(\mathbf{t}) + \dots] \\ &\equiv \tilde{\mathbf{P}}^{(1)}(\mathbf{t}) + \tilde{\mathbf{P}}^{(2)}(\mathbf{t}) + \tilde{\mathbf{P}}^{(3)}(\mathbf{t}) + \dots \end{aligned} \quad (2-2)$$

کمیت های $\chi^{(2)}$ و $\chi^{(3)}$ به ترتیب پذیرفتاری نوری غیرخطی مرتبه دوم و سوم نامیده می شوند.

را $\tilde{\mathbf{P}}^{(2)}(\mathbf{t}) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{t})^2$ قطبش غیرخطی مرتبه دوم و $\tilde{\mathbf{P}}^{(3)}(\mathbf{t}) = \varepsilon_0 \chi^{(3)} \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{t})^3$ را قطبش غیرخطی مرتبه سوم می نامیم. برهم کنش های نوری غیرخطی مرتبه دوم فقط در بلورهایی که مرکز تقارن و یا به عبارتی در بلورهایی که تقارن وارونی ندارند، اتفاق می افتد. به دلیل آنکه مایعات، گازها و جامدات بی شکل (مانند شیشه) و حتی بسیاری از بلورها دارای تقارن وارونی هستند، $\chi^{(2)}$ برای آنها تقریباً قابل صرف نظر کردن است و لذا این مواد نمی توانند برهم کنش های غیرخطی مرتبه دوم به وجود آورند. از طرف دیگر، برهم کنش های نوری غیرخطی مرتبه سوم هم در محیط هایی که دارای مرکز تقارن هستند و هم در محیط هایی بدون مرکز تقارن ایجاد می شوند.

حال برآورد ساده ای از اندازه این کمیت ها برای حالت عمومی رفتارهای غیرخطی ماهیت الکترونی دارند را ارائه می دهیم. هنگامی که دانه میدان اعمال شده $\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{t})$ از مرتبه قدرت میدان الکتریکی اتمی ویژه $\mathbf{E}_{at} = \frac{e}{a_0}$ ، که e بار الکترون است، این انتظار هست که پایین ترین مرتبه

تصحیح یعنی $\tilde{\mathbf{P}}^{(2)}$ باید قابل مقایسه با پاسخ خطی $\tilde{\mathbf{P}}^{(1)}$ باشد. به طور عددی مقدار $\mathbf{E}_{at} = 2 \times 10^7 \text{ statvolt / cm}^2$ است. لذا انتظار داریم که تحت شرایط برانگیزش غیر تشدید،

^۱ Susceptibility

پذیرفتاری مرتبه دوم $\chi^{(2)}$ از مرتبه $\chi^{(1)}$ باشد. برای مواد چگال، $\chi^{(1)}$ از مرتبه یک است و

لذا انتظار داریم که $\chi^{(2)}$ از مرتبه $\frac{1}{E_{at}}$ باشد و به طریق مشابه، انتظار داریم که $\chi^{(3)}$ از مرتبه $\frac{1}{E_{at}^2}$ باشد.

استفاده از پذیرفتاری های مرتبه دوم و سوم بر حسب ثابت های فیزیکی اصلی مفید

می باشد. با توجه به اینکه چگالی تعداد N ماده چگال از مرتبه $(a_0)^{-3}$ است، بدست می آوریم

$$\chi^{(3)} \propto \frac{\hbar^8}{m^4 e^{10}} \text{ و } \chi^{(2)} \propto \frac{\hbar^4}{m^2 e^5}$$

عمومی ترین روش توصیف پدیده های نوری غیرخطی بر اساس بسط قطبش $\tilde{\mathbf{P}}(\mathbf{t})$ بر حسب قدرت میدان الکتریکی اعمال شده $\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{t})$ است که در رابطه (۲-۱) انجام داده ایم. دلیل کلیدی بودن نقش قطبش در توصیف پدیده های غیرخطی آن است که در قطبش وابسته به زمان می تواند به عنوان چشمه جدید میدان الکترومغناطیسی عمل کند. برای مثال در بخش بعدی خواهید دید که معادله موج در یک محیط نوری غیرخطی شکل زیر را دارد.

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}} - \frac{\mathbf{n}^2}{c^2} \frac{\partial^2 \tilde{\mathbf{E}}}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 \tilde{\mathbf{P}}^{NL}}{\partial t^2} \quad (3-2)$$

که \mathbf{n} ضریب شکست و c سرعت نور در خلاء است. می توانیم این رابطه را به عنوان یک معادله موج ناهمگن تعبیر کنیم که در آن قطبش $\tilde{\mathbf{P}}^{NL}$ مربوط به پاسخ غیرخطی، میدان الکتریکی $\tilde{\mathbf{E}}$ را به وجود می آورد.

این معادله بیانگر این واقعیت است که هرگاه $\frac{\partial^2 \tilde{\mathbf{P}}^{NL}}{\partial t^2}$ غیر صفر باشد، بارها شتاب می

گیرند

۲-۲ توصیف های برهم کنش های نوری غیرخطی

در این بخش، توصیف های کیفی مختصری را برای تعدادی از برهم کنش های نوری غیرخطی ارائه می دهیم که انگیزه ی ما از بیان آن این است که خواننده به تنوع پدیده های نوری غیرخطی پی ببرد.

۲-۲-۱ تولید هماهنگ دوم

به عنوان مثالی از برهم کنش نوری غیرخطی، تولید هماهنگ دوم که به طور طرح وار شکل (۱-۲) نشان داده شده است را بررسی می کنیم.

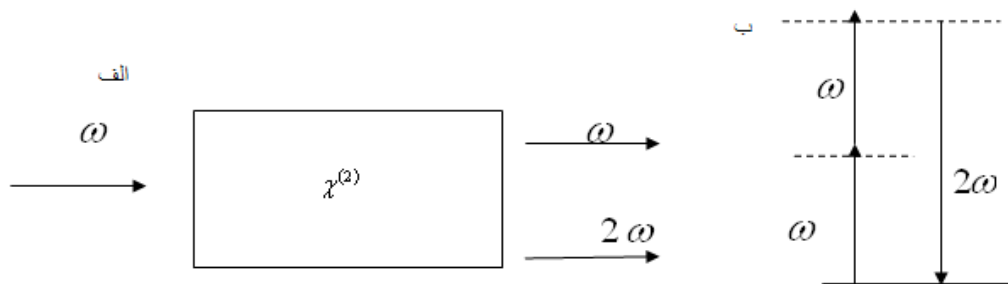
در این شکل، یک باریکه نور لیزر که قدرت میدان الکتریکی آن به صورت

$$\tilde{\mathbf{E}}(t) = \mathbf{E}e^{-i\omega t} + \text{c.c.} \quad (۴-۲)$$

نمایش داده می شود.

به بلوری که پذیرفتاری مرتبه دوم $\chi^{(2)}$ غیرصفر دارد می تابد، قطبش غیرخطی که در چنین بلوری ایجاد می شود و برطبق معادله (۲-۲) به صورت $\tilde{\mathbf{P}}^{(2)}(t) = \epsilon_0 \chi^{(2)} \tilde{\mathbf{E}}(t)^2$ یا به صورت

$$\tilde{\mathbf{P}}^{(2)}(t) = 2\epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E} \mathbf{E}^* + (\epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}^2 e^{-i2\omega t} + \text{c.c.}) \quad (۵-۲)$$



شکل ۱-۲ (الف) هندسه تولید هماهنگ دوم. (ب) نمودار تراز انرژی که تولید هماهنگ دوم را توصیف می کند

نوشته می شود. مشاهده می کنیم که قطبش مرتبه دوم شامل یک قسمت در بسامد صفر (جمله اول) و یک قسمت در بسامد 2ω (جمله دوم) است. بر طبق معادله موج دیفرانسیلی (۲-۳)، قسمت دوم منجر به تولید تابش با بسامد هماهنگ دوم می شود. در حالی که قسمت اول معادله (۵-۲) منجر به تولید تابش الکترومغناطیسی نمی شود (زیرا مشتق زمانی مرتبه دوم آن صفر است). این قسمت منجر به فرآیندی به نام یکسوسازی نوری می شود که در آن میدان الکتریکی ایستایی در داخل بلور غیرخطی تولید می شود. تحت شرایط تجربی مناسب بازده فرآیند تولید هماهنگ دوم می تواند به نحوی باشد که تقریباً تمام توان تابش فرودی در بسامد ω به تابش هماهنگ دوم با بسامد 2ω تبدیل شود. یکی از کاربردهای عام تولید هماهنگ