

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک

گروه فیزیک اتمی و مولکولی

پایان نامه:

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته ی فیزیک لیزر

عنوان:

بررسی اشباع جذب نانوذرات فریت ( $Fe_3O_4$ ) در محیط پلیمر  $PMMA$

استاد راهنما:

دکتر ابراهیم صفری

دکتر محمد صادق ذاکر حمیدی

پژوهشگر:

محمد حسین عسگری

بهمن ۱۳۹۳

تقدیم به

پدر دلسوز

و

مادر مهربانم

## تقدیر و تشکر

سپاس از پدر و مادر مهربانم که زحماتشان را نهایتی نیست ، برای پشتیبانی و حمایت لحظه به لحظه شان بوسه بر دستانشان میزنم.

سپاس از برادر و خواهران پرمهرم که کمک های خود را هیچ گاه از من دریغ نکردند.

سپاس از استاد بزرگوارم آقای دکتر صفری که بی یاری ایشان این پایان نامه راه به جایی نمی برد.

سپاس فراوان از استاد گرانقدرم آقای دکتر ذاکر حمیدی برای راهنمایی های بی دریغ شان.

|   |                           |
|---|---------------------------|
| نام خانوادگی: عسگری   | نام: محمد حسین            |
| عنوان پایان نامه: بررسی اشباع جذب نانوذرات فریت ( $Fe_3O_4$ ) در محیط پلیمر $PMMA$  |                           |
| استاد راهنما: دکتر ابراهیم صفری - دکتر محمد صادق ذاکر حمیدی   |                           |
| مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: فیزیک گرایش: لیزر دانشگاه: تبریز   |                           |
| دانشکده: فیزیک  | تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۳ |
| تعداد صفحات: ۹۱   |                           |
| <b>کلید واژه:</b> نانوذرات آهنربای طبیعی - روش جاروب-Z - اشباع جذب - ضریب شکست غیر خطی  |                           |
| <b>چکیده</b>  |                           |
| <p>نانوذرات آهنربای طبیعی به خاطر وجود خواص مغناطیسی منحصر به فرد و به دلیل وجود یک گاف باند باریک (آهنربای طبیعی یک نیمه رسانا است) اخیرا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از خواص مغناطیس نوری نانوذرات آهنربای طبیعی می‌توان به محدود کننده های نوری و سوئیچ های اپتیکی تحت تاثیر میدان های مغناطیسی اشاره کرد. پدیده اپتیکی اشباع جذب منجر به کاربردهای زیادی خواهد شد، چرا که مهمترین پارامتر برای اشباع جذب محدوده طول موجی است. هنگامی که باریکه ی لیزری درون محیط غیر خطی عمل میکند، به چند دلیل ضریب شکست تغییر می کند و مکانیزم های مسبب این تغییر در ضریب شکست یکسان نیستند. در پدیده شکست نور ، تغییر ضریب شکست ماده با شدت نور مرتبط نیست. در حالیکه در اثر کر اپتیکی، ضریب شکست متناسب با شدت نور است، که در سوئیچ های اپتیکی انفعالی و محدود کننده های نوری رایج هستند. برای بررسی اشباع جذب و ضریب شکست غیرخطی از روش متداول جاروب-Z استفاده می شود. در این پژوهش با بررسی</p> |                           |

تجربی مشخصه‌های اشباع جذب نانوذرات فریت در محیط پلیمر PMMA مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش ما خواص غیرخطی مربوط به نانوذره فریت در محیط پلیمر PMMA را به طور تجربی با استفاده از روش جاروب-Z آزمایش کرده، و برای درصد وزنی های مختلف نانو ذره فریت این خواص را محاسبه و مقایسه کردیم. نتایج حاکی از این بود که با افزایش درصد وزنی نانوذره فریت غیرخطیت نمونه مورد نظر افزایش پیدا می کند.

## فهرست مطالب:

|       |   |    |
|-------|---|----|
| ۱     | فصل اول: بررسی منابع.....                 | ۱۲ |
| ۱-۱   | مقدمه .....                               | ۲  |
| ۲-۱   | مواد اپتیکی غیر خطی .....                 | ۳  |
| ۳-۱   | پیش درآمدی بر محیط غیر خطی .....          | ۴  |
| ۴-۱   | اثر کر نوری .....                         | ۱۱ |
| ۵-۱   | ضریب جذب غیر خطی و ضریب شکست غیر خطی..... | ۱۱ |
| ۶-۱   | اثر خود کانونی.....                       | ۱۳ |
| ۷-۱   | محدود کننده نوری.....                     | ۱۶ |
| ۱-۷-۱ | محدود کنندگی بوسیله جذب غیر خطی.....      | ۱۸ |
| ۲-۷-۱ | محدود کنندگی بوسیله شکست غیر خطی .....    | ۲۰ |
| ۸-۱   | پیشینه تحقیق .....                        | ۲۲ |

۲ فصل دوم: مواد و روش ها ..... ۲۶

۱-۲ نانوذره آهنربای طبیعی ( $Fe_3O_4$ ) ..... ۲۷

۲-۲ مواد پلیمری ..... ۲۸

۳-۲ اشباع جذب ..... ۲۹

۱-۳-۲ اشباع جمعیت تراز به وسیله دمش نوری ..... ۳۳

۲-۳-۲ اشباع جذب مواد نیمه رسانا ..... ۳۵

۴-۲ روش جاروب-Z ..... ۳۶

۵-۲ تئوری روش جاروب-Z ..... ۳۷

۶-۲ روش جاروب-Z بسته ..... ۴۷

۷-۲ جاروب Z با روزنه ی باز ( $S=1$ ) ..... ۵۲

۸-۲ اندازه گیری قطر لیزر ..... ۵۵

۳ فصل سوم: نتیجه گیری ..... ۴۵

۱-۳ اندازه گیری شعاع پرتو لیزر آبی با استفاده از روش جاروب لبه ..... ۶۱

۲-۳ خطای اندازه گیری ..... ۶۳

۱-۲-۳ تحلیل داده های اندازه گیری شده ..... ۶۳

۲-۲-۳ انواع خطاهای تجربی ..... ۶۳

۳-۲-۳ کالیبره کردن داده ها ..... ۶۳

۴-۲-۳ انواع خطا ..... ۶۴

۵-۲-۳ تحلیل آماری داده های اندازه گیری شده ..... ۶۵

- ۳-۳ تهیه نمونه..... ۶۵
- ۴-۳ طیف جذبی نمونه..... ۶۷
- ۵-۳ اندازه گیری شدت اشباع با استفاده از روش جاروب-Z روزنه باز..... ۶۸
- ۱-۵-۳ چیدمان آزمایشگاهی..... ۶۹
- ۲-۵-۳ رسم منحنیهای تراکسیلیدگی بهنجار برای سه درصد وزنی متفاوت..... ۷۰
- ۳-۵-۳ تحلیل و مقایسه نمودارهای تراکسیلی نرمالیزه بدست آمده از داده ها برای روزنه باز..... ۷۳
- ۴-۵-۳ محاسبه شدت اشباع برای نانوذره فریت در محیط پلیمر PMMA..... ۷۴
- ۶-۳ تعیین علامت و مقدار ضریب شکست غیر خطی با استفاده از روش جاروب-Z با روزنه بسته..... ۷۴
- ۱-۶-۳ چیدمان آزمایشگاهی..... ۷۵
- ۲-۶-۳ رسم منحنیهای تراکسیلیدگی بهنجار برای سه درصد وزنی متفاوت..... ۷۷
- ۳-۶-۳ تحلیل و مقایسه نمودارهای تراکسیلی نرمالیزه بدست آمده از داده ها برای روزنه بسته..... ۷۹
- ۴-۶-۳ محاسبه ضریب شکست غیر خطی برای نانوذره فریت در محیط PMMA..... ۸۰
- ۷-۳ نتیجه گیری..... ۸۳
- نتیجه گیری نهایی..... ۸۴
- پیشنهادات..... ۸۵
- منابع..... ۸۶



## فهرست اشکال:

- شکل ۱-۱: فرآیند خودکانونی بوسیله پرتولیزر با توزیع شدت گاوسی [۵]..... ۱۴
- شکل ۲-۱: خود کانونی (خود همگرایی) پرتو گاوسی [۵]..... ۱۵
- شکل ۳-۱: خود واگرایی یک پرتو . پرتو بیش از حد پراش خطی گسترش می یابد [۵]..... ۱۵
- شکل ۴-۱: رفتار ایده‌آل یک ماده که دارای اثر محدود کنندگی نوری است..... ۱۷
- شکل ۵-۱: فرآیند های جذب غیر خطی ..... ۱۸
- شکل ۱-۲: رشته های پلیمر [۵۱]..... ۲۸
- شکل ۲-۲: ساختار مولکولی پلیمر PMMA [۵۲]..... ۲۹
- شکل ۳-۲: سیستم دو ترازوی که با یک موج الکترومغناطیسی با شدت بالای I برهمکنش می کند [۱۳] ۳۰
- شکل ۴-۲: رفتار اشباع ضریب جذب  $\alpha$  بر حسب  $v'$  برای مقادیر رو به افزایش شدت I باریکه اشباع کننده [۱۳]..... ۳۲
- شکل ۵-۲: سیستم دوترازی بدون هیچگونه واهلشی به دیگر ترازها [۱۴]..... ۳۳
- شکل ۶-۲: اشباع چگالی جمعیت  $N_1$  و  $\alpha = \sigma(N_1 - N_2)$  به صورت تابعی از پارامتر اشباع  $S$  [۱۴]..... ۳۵
- شکل ۷-۲: روش جاروب-Z [۵۵]..... ۳۸
- شکل ۸-۲: (a) روش جاروب-Z با روزنه بسته ، (b) روش جاروب-Z با روزنه باز [۵۵]..... ۴۰
- شکل ۹-۲: روش جاروب-Z بسته [۵۸]..... ۴۸
- شکل ۱۰-۲: ایجاد خودکانونی در جاروب-Z توسط نمونه‌های با ضریب شکست منفی [۶۰]..... ۵۰
- شکل ۱۱-۲: خود واگرایی توسط نمونه‌های با ضریب شکست منفی [۶۰]..... ۵۰
- شکل ۱۲-۲: تراگسیل نرمالیزه برای دو نمونه مختلف با ضریب شکست مثبت (منحنی خط ممتد)، و ضریب شکست منفی (منحنی خط چین ) [۶۱]..... ۵۱
- شکل ۱۳-۲: چیدمان جاروب-Z با روزنه باز [۶۰]..... ۵۲

- شکل ۲-۱۴: نمودار تراگسیلی برای جاروب Z با روزنه باز [۶۰]..... ۵۳
- شکل ۲-۱۵: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌ی پلیمری با لیزر  $He-Ne$   $632\text{ nm}$  با روش جاروب-Z بسته و باز [۶۰]..... ۵۴
- شکل ۲-۱۶: چیدمان آزمایشگاهی جاروب لبه..... ۵۶
- شکل ۲-۱۷: خط چین نشان دهنده توان آشکار شده با تغییرات لبه و منحنی پر، مشتق آن که نمایانگر شکل پرتو فرودی است [۱۱]..... ۵۸
- شکل ۳-۱: چیدمان آزمایشگاهی جاروب لبه..... ۶۱
- شکل ۳-۲: موقعیت لبه تیغ نسبت به سطح مقطع عرضی پرتوی گوسی..... ۶۲
- شکل ۳-۳: تغییر رنگ محلول پس از هم زدن..... ۶۶
- شکل ۳-۴: دستگاه لایه نشانی غوطه وری..... ۶۶
- شکل ۳-۵: نانوذره با پلیمر PMMA لایه نشانی شده بر روی شیشه کوارتز با درصد وزنی مختلف..... ۶۷
- شکل ۳-۶: طیف جذبی نمونه نانو ذره فریت در محیط PMMA..... ۶۸
- شکل ۳-۷: چیدمان آزمایشگاهی برای اندازه گیری ضریب جذب غیر خطی با استفاده از روش جاروب-Z روزنه باز..... ۶۹
- شکل ۳-۸: چیدمان آزمایشگاهی جاروب-Z روزنه باز..... ۶۹
- شکل ۳-۹: تراگسیلی نرمالیزه برای نمونه با درصد وزنی ۱ و ضخامت  $1/8$  میکرومتر لایه نشانی شده با نانو ذره فریت با پلیمر PMMA..... ۷۱
- شکل ۳-۱۰: تراگسیلی نرمالیزه برای نمونه با درصد وزنی ۵ و ضخامت ۲ میکرومتر لایه نشانی شده با نانو ذره فریت با پلیمر PMMA..... ۷۲
- شکل ۳-۱۱: تراگسیلی نرمالیزه برای نمونه با درصد وزنی ۱۰ و ضخامت  $2/4$  میکرومتر لایه نشانی شده با نانو ذره فریت با پلیمر PMMA..... ۷۲
- شکل ۳-۱۲: مقایسه نمودارهای تراگسیلی نرمالیزه با درصد وزنی های مختلف برای روزنه باز..... ۷۳

- شکل ۳-۱۳: چیدمان آزمایشگاهی برای اندازه گیری ضریب شکست با استفاده از روش جاروب-Z با روزنه بسته ..... ۷۵
- شکل ۳-۱۴: چیدمان آزمایشگاهی جاروب-Z روزنه بسته ..... ۷۵
- شکل ۳-۱۵: تراگسیلی نرمالیزه برای نمونه با درصد وزنی ۱ و ضخامت ۱/۸ میکرومتر لایه نشانی شده با نانو ذره فریت با پلیمر PMMA ..... ۷۷
- شکل ۳-۱۶: تراگسیلی نرمالیزه برای نمونه با درصد وزنی ۵ و ضخامت ۲ میکرومتر لایه نشانی شده با نانو ذره فریت با پلیمر PMMA ..... ۷۸
- شکل ۳-۱۷: تراگسیلی نرمالیزه برای نمونه با درصد وزنی ۱۰ و ضخامت ۲/۴ میکرومتر لایه نشانی شده با نانو ذره فریت با پلیمر PMMA ..... ۷۸
- شکل ۳-۱۸: مقایسه نمودارهای تراگسیلی نرمالیزه با درصد وزنی های مختلف برای روزنه بسته ..... ۷۹

# ۱ فصل اول: بررسی منابع

## ۱-۱ مقدمه

اپتیک غیرخطی مطالعه پدیده هایی می باشد که از تغییر ایجاد شده در خواص اپتیکی یک سیستم مادی در حضور نور شدید ناشی می شود [۱, ۲]. خاصیت خطی یا غیر خطی بودن، مربوط به محیطی است که نور در آن منتشر می شود. تمام محیطها دارای اثر غیر خطی هستند. حتی فوتون هایی که در فضای خلاء با هم برهمکنش دارند دارای این اثر هستند اما غیر خطی بودن آنقدر کوچک است که با شدت نور معمولی پدیده های غیر خطی قابل مشاهده نیستند. شدت نوری که بتواند خواص اپتیکی یک ماده را تغییر دهد فقط میتواند نور تولید شده از یک لیزر باشد، به همین خاطر پس از اختراع اولین لیزر توسط مایمن [۳] در سال ۱۹۶۰، فرانکن و همکارانش در سال ۱۹۶۱ توانستند اولین پدیده غیر خطی نوری یعنی تولید هارمونیک دوم را کشف کنند [۴]. بنابراین اپتیک غیر خطی با وجود توسعه سریع خود، هنوز شاخه جوانی از اپتیک بحساب می آید که جای تحقیقات زیادی برای پاسخ به سوالات بی جواب دارد. همچنین امروزه تقاضای روز افزون برای انتقال سریع و با حجم بالای اطلاعات باعث گردیده است که استفاده از اپتیک غیر خطی برای ایجاد شبکه تمام نوری جایگزین ناگزیری برای شبکه های الکترونی کند باشد. بنابراین از لحاظ کاربردی نیز کارهای تحقیقاتی زیادی در این شاخه از علم باید انجام گیرد.

پاسخ های غیر خطی اپتیکی در مواد، امروزه کاربردهای بسیاری پیدا کرده است. از جمله می توان به ساخت ابزارهای اپتو-الکترونیکی، ساخت کلیدهای نوری، پردازش کاوشگرهای نوری و محدود کننده های اپتیکی اشاره کرد. نوع رفتار غیر خطی در هر ماده با توجه به ساختار اتمی و ترکیب آن متفاوت است. فرآیندهای مختلفی ممکن است عامل ایجاد پاسخ های غیر خطی در مواد اپتیکی باشد. برخی از آنها عبارتند از:

- قطبش الکترونیکی

- برهمکنش با یک باریکه‌ی نوری و پاسخ غیر خطی ماده با دامنه‌ی میدان
- و ...

در بیشتر مواد ممکن است بیش از یک یا چند فرآیند در آنها باعث ایجاد اثرات غیر خطی گردد، از این رو علم اپتیک غیر خطی، بسیار گسترده است. در این فصل ما قصد داریم تنها با یک نگاه اجمالی به رفتارهای آنها بپردازیم.

برای مطالعه‌ی فرآیندهای اپتیکی در مواد می‌بایست از یک دیدگاه نیمه کلاسیکی استفاده کنیم چرا که فوتون‌ها با توجه به روابط ماکسول رفتاری کلاسیکی داشته در حالی که الکترون-حفره‌ها رفتاری کوانتومی دارند پس تکیه بر دیدگاه کاملاً کلاسیکی نمی‌تواند در بررسی آنها چندان مفید باشد [۵].

## ۲-۱ مواد اپتیکی غیر خطی

برای توضیح نظری این دسته مواد ابتدا انتشار یک موج تخت در یک محیط همگن همسانگرد را بررسی می‌کنیم. با فرض اینکه موج تخت در راستای محور  $z$  منتشر شود، گذردهی الکتریکی  $(\epsilon)$  و مغناطیسی  $(\mu)$  ثابت هستند داریم [۵]:

$$\vec{E} = \hat{E} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} = E_{0x} e^{i(kz - \omega t)} \quad (1-1)$$

$$\vec{B} = \hat{B} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} = B_{0x} e^{i(kz - \omega t)} \quad (2-1)$$

سرعت موج عبارت است از :

$$V = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (3-1)$$

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \frac{c}{v} \quad (۴-۱)$$

که  $n$  ضریب شکست و  $c$  سرعت نور در خلاء است.

با توجه به رابطه‌ی قطبش در یک محیط می‌توان نوشت:

$$\vec{p} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (۵-۱)$$

که  $\chi$  پذیرفتاری الکتریکی می‌باشد. حال مقدار جابجایی الکتریکی برابر است با:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{p} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \quad (۶-۱)$$

که در رابطه‌ی فوق  $\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi)$  و  $n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{1 + \chi}$  می‌باشد.

با فرض خطی بودن محیط‌های نوری (در شدت‌های پایین)، نتایج زیر به دست می‌آید:

۱. اصل برهم نهی که از اصول کلاسیک است، صادق می‌باشد.
۲. بسامد نور با عبور از محیط ثابت می‌ماند.
۳. ضریب جذب و ضریب شکست مستقل از شدت موج فرودی است.
۴. دو باریکه‌ی نور در چنین محیطی با هم برهمکنش ندارند.

در شدت‌های پایین قطبش به طور خطی به میدان الکتریکی وابسته است [۵، ۶].

### ۳-۱ پیش‌درآمدی بر محیط غیر خطی

محیط غیر خطی محیطی است که در آن قطبش، رابطه‌ی غیر خطی با میدان الکتریکی نور دارد.

وقتی نور در فضای آزاد سیر می‌کند رفتار اپتیکی غیر خطی مشاهده نمی‌شود. واژه‌ی غیر خطی به جای اینکه به خود نور اشاره داشته باشد به محیطی اشاره دارد که نور در آن محیط منتشر می‌شود. خواص محیط دی‌الکتریک که یک موج الکترومغناطیسی در آن انتشار پیدا میکند با رابطه‌ی بین بردار شدت قطبش و بردار میدان الکتریکی توصیف می‌شود. به محیطی غیر خطی می‌گویند که رابطه‌ی بین  $\vec{P}(r,t)$  و  $\vec{E}(r,t)$  غیر خطی باشد. آزمایش‌های انجام یافته با لیزرهای مدرن به وضوح اثبات کرد که در حقیقت محیط اپتیکی رفتار غیر خطی نشان می‌دهد.

برای مثال می‌توان به نمونه‌های زیر اشاره کرد:

۱. اصل برهم نهی صادق نیست.

۲. بسامد در محیط تغییر می‌کند (مدوله می‌شود) برای مثال نور میتواند از قرمز به آبی تغییر یابد.

۳. ضریب جذب و ضریب شکست با تغییرات شدت نور تغییر کنند.

۴. دوباریکه نور در محیط غیر خطی با برهمکنش دارند.

اهمیت غیرخطیت شاید بیشتر به لحاظ کاربردهایی است که در عرصه‌ی مهندسی می‌توان از این اثرات انتظار داشت. رشد تحقیقات در زمینه‌ی شناسایی عناصر و ترکیبات مناسب با اثرات غیر خطی بالا اعم از ترکیبات آلی و معدنی و نیمه هادی‌ها و مطالعات در زمینه‌ی غیر خطیت، همه مقدماتی برای ساخت ذخیره کننده‌های اطلاعاتی به منظور ساخت کامپیوترهای نوری کوانتومی، همچنین استفاده‌ی هرچه وسیع‌تر از نور برای مخابره و پردازش اطلاعات در مکان‌های مختلف بوده‌اند.

رابطه‌ی قطبش در محیط‌های خطی به صورت  $\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$  که نشانگر رابطه‌ی متناسب بین میدان



و قطبش است، در محیط‌های غیر خطی رابطه به صورت زیر درمی‌آید [۷]:

$$P(t) = \varepsilon_0 [\chi^{(1)} E(t) + \chi^{(2)} E^2(t) + \chi^{(3)} E^3(t) + \dots] \equiv P^{(1)}(t) + P^{(2)}(t) + P^{(3)}(t) + \dots \quad (۷-۱)$$

که در قدرت‌های تابش بالا، ضریب پذیرفتاری مرتبه دو و یا بالاتر، در مقایسه با پذیرفتاری خطی مرتبه‌ی اول  $\chi^{(1)}$  به تدریج محسوس و قابل مقایسه‌تر می‌شوند.

در محدوده‌ی اپتیک غیر خطی روابط قبل دیگر برقرار نیست. قبل از هر چیز برای درک مفاهیم غیر خطی و علت ظهور آنها در مواد لازم است معادلات ماکسول را بررسی کنیم. معادلات ماکسول می‌دهد که چگونه یک قطبش غیر خطی منجر به تولید یک موج دیگر می‌شود و چگونگی تولید قطبش را نشان نمی‌دهد. این معادلات عبارتند از [۸]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (۸-۱)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (۹-۱)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (۱۰-۱)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (۱۱-۱)$$

که در آن  $\vec{B}$  القای مغناطیسی،  $\vec{E}$  میدان الکتریکی و  $\vec{D}$  جابجایی الکتریکی است.  $J$  و  $\rho$  به ترتیب چگالی جریان و چگالی بار می‌باشند که این دو کمیت توسط رابطه‌ی پیوستگی  $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  به هم مربوط می‌شوند. شار انرژی الکترومغناطیسی در واحد سطح توسط بردار پوینتینگ  $\vec{S}$  داده می‌شود:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (12-1)$$

مقدار متوسط  $\vec{S}$  (میانگین زمانی روی دوره‌های نوسانات اپتیکی)، برابر با شدت در واحد  $\left(\frac{w}{m^2}\right)$  می‌باشد.

اگر میدان‌های اپتیکی به صورت امواج تخت با بردار موج انتشار  $\vec{k}$  باشند. یعنی داشته باشیم:

$$\vec{E} = \text{Re}\left(\vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}\right) \quad (13-1)$$

$$\vec{H} = \text{Re}\left(\vec{H}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}\right) \quad (14-1)$$

با توجه به آنچه تا کنون گفتیم چگالی انرژی الکترومغناطیسی به شکل زیر می‌باشد:

$$u = u_\varepsilon + u_m = \frac{1}{2}(\vec{D} \cdot \vec{E} + \vec{B} \cdot \vec{H}) \quad (15-1)$$

که اندیس‌های  $\varepsilon$  و  $m$  به ترتیب نشان دهنده‌ی سهم الکتریکی و مغناطیسی هستند.

اگر یک موج تخت تکفام در یک محیط خطی باشد، برابر است با [۷]:

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon_0 \chi^{(1)}(\vec{r} - \vec{r}', t - t') \cdot \vec{E}(\vec{r}', t') d\vec{r}' dt' \quad (16-1)$$

که  $\chi^{(1)}$  پذیرفتاری خطی می‌باشد.

اگر  $\vec{E}$  یک موج تخت تکفام به صورت زیر باشد،

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{k}, \omega) = \vec{E}(\vec{k}, \omega) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (17-1)$$

در وضعیت غیر خطی، هنگامی که  $\vec{E}$  به اندازه‌ی کافی کوچک باشد، می‌توان قطبش  $\vec{P}$  را که تابعی از  $\vec{E}$

است به صورت یک سری توانی بر حسب بسط داد [۷]:

$$\bar{P}(\bar{r}, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \chi^{(1)}(\bar{r} - \bar{r}_1, t - t_1) \cdot \bar{E}(\bar{r}_1, t_1) d\bar{r}_1 dt_1 \quad (18-1)$$

$$+ \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \chi^{(2)}(\bar{r} - \bar{r}_1, t - t_1 \quad \bar{r} - \bar{r}_2, t - t_2) : \bar{E}(\bar{r}_1, t_1) \bar{E}(\bar{r}_2, t_2) d\bar{r}_1 d\bar{r}_2 dt_1 dt_2$$

$$+ \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \chi^{(3)}(\bar{r} - \bar{r}_1, t - t_1 \quad \bar{r} - \bar{r}_2, t - t_2 \quad \bar{r} - \bar{r}_3, t - t_3) : \bar{E}(\bar{r}_1, t_1) \bar{E}(\bar{r}_2, t_2) \bar{E}(\bar{r}_3, t_3) d\bar{r}_1 d\bar{r}_2 d\bar{r}_3 dt_1 dt_2 dt_3 \dots$$

رابطه‌ی فوق با یک تبدیل فوریه به شکل زیر درمی‌آید:

$$\bar{P}(\bar{k}, \omega) = \bar{P}^{(1)}(\bar{k}, \omega) + \bar{P}^{(2)}(\bar{k}, \omega) + \bar{P}^{(3)}(\bar{k}, \omega) + \dots \quad (19-1)$$

که در آن:

$$\bar{P}^{(1)}(\bar{k}, \omega) = \varepsilon_0 \chi^{(1)}(\bar{k}, \omega) \cdot \bar{E}(\bar{k}, \omega) \quad (20-1)$$

$$\bar{P}^{(2)}(\bar{k}, \omega) = \varepsilon_0 \chi^{(2)}(\bar{k} = \bar{k}_i + \bar{k}_j, \omega = \omega_i + \omega_j) : \bar{E}(\bar{k}_i, \omega_i) \bar{E}(\bar{k}_j, \omega_j)$$

$$\bar{P}^{(3)}(\bar{k}, \omega) = \varepsilon_0 \chi^{(3)}(\bar{k} = \bar{k}_i + \bar{k}_j + \bar{k}_l, \omega = \omega_i + \omega_j + \omega_l) : \bar{E}(\bar{k}_i, \omega_i) \bar{E}(\bar{k}_j, \omega_j) \bar{E}(\bar{k}_l, \omega_l)$$

همانطوری که قبلاً گفتیم  $\chi^{(1)}$  پذیرفتاری خطی،  $\chi^{(2)}$  و  $\chi^{(3)}$  پذیرفتاری مرتبه‌ی دوم و سوم هستند.

$\varepsilon_0 \chi^{(1)} E$  اثر مرتبه‌ی اول میدان است و قطبش خطی را ایجاد کرده و یک تانسور مرتبه‌ی دوم است.

$\varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2$  اثر مرتبه‌ی دوم میدان است و  $\chi^{(2)}$  یک تانسور مرتبه‌ی سوم است در موادی که فاقد تقارن

وارونی باشند رخ می‌دهد عامل ایجاد فرایندهایی مثل تولید هماهنگ دوم یکسوسازی اپتیکی، اثر پاکلز،

تقویت یا تضعیف پارامتریک است.

$\varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3$  اثر مرتبه‌ی سوم میدان است، بازهم از جملات قطبش غیرخطی است و  $\chi^{(3)}$  یک تانسور مرتبه‌ی چهارم است در وجود آمدن پدیده‌هایی مثل تولید هماهنگ سوم، اثر کر، همیوگ فاز اپتیکی اختلاط چهارموجی، پراکندگی رامان و پراکندگی بریلوئن نقش دارد در ضمن  $\chi^{(3)}$  یک تانسور مرتبه چهارم با ۸۱ مولفه است.

و به طور کلی مشابه رابطه‌ی (۱۷-۱) می‌توان نوشت [۷]:

$$\chi^{(n)}(\bar{k}_1 + \dots + \bar{k}_n, \omega_1 + \dots + \omega_n) = \quad (۲۱-۱)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \chi^{(n)}(\bar{r} - \bar{r}_1, t - t_1; \dots; \bar{r} - \bar{r}_n, t - t_n) e^{-i[\bar{k}_1(\bar{r} - \bar{r}_1) - \omega_1(t - t_1) + \dots + \bar{k}_n(\bar{r} - \bar{r}_n) - \omega_n(t - t_n)]} \times d\bar{r}_1 d\bar{r}_2 \dots d\bar{r}_n dt_1 dt_2 \dots dt_n$$

اگر پذیرفتاری مرتبه‌ی  $n$  ام  $\chi^{(n)}$  برای یک ماده مشخص باشد، آنگاه اثرات اپتیکی مرتبه‌ی  $n$  ام در آن محیط نیز با استفاده از معادلات ماکسول قابل پیشبینی خواهد بود. به طور کلی پذیرفتاری مراتب بالاتر فقط هنگامی دارای اهمیت می‌باشند که میدان الکتریکی قوی باشد. در روابط فوق به وضوح مشخص است که  $\chi^{(n)}$  با توان  $n$  ام میدان  $E^{(n)}$  متناسب است.

بررسی هر جمله از بسط  $\chi^{(n)}$  به ساختار میکروسکوپی محیط مرتبط است و ارزیابی آن نیاز به محاسبات پیچیده‌ی کوانتومی دارد، اما بعضاً در بسیاری از موارد مدل‌های کلاسیکی ساده بسیار مفید هستند و می‌توانند منشاء رفتار اپتیکی غیر خطی را در مواد نشان دهند.

تا کنون مواد مختلفی که دارای خواص نوری غیر خطی باشند، شناخته شده و مورد استفاده قرار

گرفته‌اند. توجه شود که وجود تقارن مرکزی در کریستال منجر به صفر شدن ضریب پذیرفتاری  $\chi^{(2)}$