



دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه دوره دکتری، فیزیک اتمی مولکولی

تکنیک و اندازه گیری شکست و جذب غیرخطی

در مواد نوری

دانشجو:

کاظم جمشیدی قلعه

استاد راهنما:

دکتر نسترن منصور

۱۳۸۶ / ۸ / ۲۸

۱۳۸۶ / ۸ / ۱۸

تیرماه ۱۳۸۳

۷۹۹۵۳

وزارت اطلاعات ایران
توسعه و آموزش

تقدیم به:

ارواح پاک پدر و مادرم

حمد و سپاس خداوند متعال را که توان اندیشیدن را بر من عطا کرد.

از استاد ارجمندم سرکار خانم دکتر نسترن منصور که در طی دوره دکتری تجربیات و معلومات ایشان راه‌گشای مسائل من بودندند تشکر و قدردانی می‌کنم. همچنین از کلیه استاتید محترمی که در تمامی دوران تحصیل افتخار شاگردیشان را داشتم، به خصوص جناب آقای دکتر بهفروز و دکتر علومی از دانشگاه ارومیه در دوره کارشناسی و دکتر توسلی از دانشگاه تهران در دوره کارشناسی ارشد، که تاثیر مهمی در پیشرفت علمی و شخصیتی بنده داشتند سپاسگزارم.

از خانواده محترم که در نبود پدر و مادر همواره پشتیبان محکمی برایم بودندند و از همسر مهربانم که در لحظات بحرانی کمک و یاور من بودندند و همچنین از آقای محمد کریمی و خانواده محترم که همواره از مشوقان اصلی من بودندند کمال تشکر و قدردانی را دارم اگر موفقیتی است مدیون همه این عزیزان هستم امید است که این کار رضایت خاطرشان باشد.

در پایان از مدیریت محترم گروه فیزیک جناب آقای دکتر غفوری تبریزی که هیچ کمکی را از من دریغ نکردند همچنین از آقای کریم اروجی و خانم حسینی که با چایبهای داغشان گرمی بخش لحظه‌های خستگی‌م بودندند تشکر و قدردانی می‌کنم.

اشباع

واژه‌های مهم

Ultra Short Pulses	تپهای فوق کوتاه	Nonlinear Optics	کیتپا غیرخطی
Self-Phase Modulation		Nonlinear Refraction	شکست غیرخطی
	خود- تحریر فازی	Nonlinear Absorption	جذب غیرخطی
Optical Limiter	مهار کننده نوری	Self-Lensing	خود- عدسی شدگی
Optical Limiting	مهار کنندگی نوری	Self-Focusing	خود - همگرایی
..Supercontinuum	طیف ابرپیوسته	Self-Defocusing	خود- واگرایی
Darkening Effect	اثر تیرگی	Saturable Absorption	جذب اشباع پذیر
Experimental Set-up	آرایش تجربی	Reverse Saturable Absorption	جذب اشباع پذیر وارون
		Edge Scan	جاروب لبه
		Moiré Fringes	فریزهای ماره
		Moiré Deflectometry	انحراف سنجی ماره

چکیده

در سال‌های اخیر، ذرات نانومتری و هم‌چنین مواد با اندازه‌های نانومتری و میکرومتری، در برهمکنش با میدان نوری، ضرایب غیرخطی را نشان می‌دهند که چندین مرتبه بزرگتر از ماده‌ی کپه‌ای مشابه می‌باشند. این خاصیت، بررسی و مطالعه‌ی فرآیندهای غیرخطی را با لیزرهای کم توان و ارزان قیمت نیز امکان پذیر می‌سازد. از طرف دیگر، رشد دانش فناوری سریع در دستیابی به تپهای لیزری فوق کوتاه مشاهده‌ی اثرات غیرخطی مهمی را امکان پذیر کرده‌است. با این تحولات، اثرات غیرخطی نوری القاء شده در فرآیندهای برهمکنش نور با ماده انقلابی را ایجاد کرده‌است.

در این پایان نامه، با استفاده از انحراف سنجی ماره^۱، روش جدیدی را برای تعیین علامت و اندازه‌گیری مقدار ضریب شکست مرتبه‌ی دوم مواد، $\chi^{(2)}$ ارائه می‌هیم. تغییرات ایجاد شده در ضریب شکست ماده، در اثر القای میدان نوری، منجر به اثرات شناخته شده‌ی خود-همگرایی^۲ و یا خود-واگرایی^۳ باریکه‌ی لیزری می‌شود. در حضور یک محیط غیرخطی، همگرایی و یا واگرایی باریکه لیزر، با سیستم انحراف سنجی آشکار سازی می‌شود. اندازه‌ی ضریب شکست غیرخطی و علامت آن از تجزیه و تحلیل فریزها بدست می‌آیند. روش ارائه شده برای اندازه‌گیری ضریب شکست مرتبه‌ی دوم ذرات نانومتری اکسید آهن با استفاده از لیزر هلیوم-نئون با توان ۵ میلی وات بکار برده شده‌است.

در قسمت دیگر، پاسخ‌های غیرخطی و تغییر خواص نوری شیشه‌های سیلیکات آلاینده با عناصر قلیایی را تحت تابش با تپهای ۲۰۰ فمتوثانیه بررسی کرده‌ایم. مشاهده شده که این برهمکنش با القاء اثرهای خود-همگرایی به واسطه‌ی پدیده‌ی غیرخطی کر، تولید شدن طیف ابرپیوسته در اثر فرآیند خود-تحریر فازی^۴ و تشکیل پلازما از طریق جذب چند-فوتونی و در پی آنها با تغییر خواص نوری شیشه همراه است. با فرآیندهای شکست و جذب غیرخطی و اثر تیرگی پایدار ایجاد شده در شیشه‌ها محیط مناسبی جهت استفاده در مهار کنندگی نوری و ذخیره سازی اطلاعات و ساخت قطعات نوری مهیا می‌شود.

^۱ Moiré

^۲ Self-focusing

^۳ Self-defocusing

^۴ Self-phase modulation

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	پیشگفتار:
۳	فصل-۱: مقدمه‌ای بر اپتیک غیرخطی
۴	۱-۱ مقدمه
۶	۲-۱ شکست غیرخطی
۸	۳-۱ جذب غیرخطی
۱۱	۴-۱ جذب اشباع پذیر و جذب اشباع پذیر وارون
۱۴	۵-۱ اثر خود-عدسی شدگی
۱۸	۶-۱ اثر خود-تحریر فازی
۲۴	۷-۱ مراجع‌ها
۲۶	فصل-۲: روش‌های اندازه‌گیری
۲۷	۱-۲ روش جاروب لبه برای اندازه‌گیری شعاع باریکه لیزر
۳۱	۲-۲ انتشار باریکه گاوسی و روش جاروب-Z
۳۲	۳-۲ اندازه‌گیری ضریب شکست و ضریب جذب غیرخطی با روش جاروب-Z
۳۸	۴-۲ پدیده‌ی خود-تصویر و روش انحراف سنجی ماره
۴۲	۵-۲ مراجع‌ها

فصل-۳: اندازه‌گیری ضریب شکست غیرخطی مواد با روش انحراف سنجی

ماره..... ۴۳

۱-۳ مقدمه ۴۴

۲-۳ آرایش تجربی ۴۵

۳-۳ فرمول‌بندی نظری ۴۶

۴-۳ نتایج تجربی ۵۳

۵-۳ مرجع‌ها ۵۸

فصل-۴: پاسخ غیرخطی و رفتار مهار کنندگی نوری شیشه‌های سیلیکات تحت تابش با تپهای فمتوثانیه

تابش با تپهای فمتوثانیه..... ۶۰

۱-۴ مقدمه ۶۱

۲-۴ مهار کننده‌های نوری ۶۱

۳-۴ آرایش تجربی ۶۵

۴-۴ نتایج تجربی ۶۷

۵-۴ مدل نظری برای رفتار جذب، غیرخطی ۷۰

۶-۴ مرجع‌ها ۷۸

فصل-۵: تغییر خواص نوری شیشه‌ها تحت تابش با تپهای فمتوثانیه

۵-۱ مقدمه ۸۱

۵-۲ پدیده‌ی تولید طیف ابرپیوسته ۸۳

۵-۳ اثر تیرگی در شیشه تحت تابش با تپهای فمتوثانیه ۸۴

۵-۵ آرایش تجربی ۸۵

۵-۶ مشاهدات و نتایج تجربی ۸۶

۵-۶-۱ نتایج تجربی تولید طیف ابرپیوسته ۸۷

۵-۶-۲ نتایج تجربی ایجاد موجبر ۸۹

۵-۶-۳ نتایج تجربی تیرگی در شیشه‌های بروسیلیکات و سدالیم ۹۱

۵-۶-۴ نتایج تجربی اثر تپهای فمتوثانیه در شیشه‌های فتوکرم ۹۳

۵-۷ استفاده‌های کاربردی ۹۶

۵-۸ مرجع‌ها ۹۷

پیوست‌ها ۹۹

پیوست - الف: خواص غیرخطی ذرات نانومتری معلق در یک دی

الکتریک ۹۹

پیوست - ب: حل معادله جذب غیرخطی همزمان مرتبه اول، سه و

چهار ۱۰۱

پیوست - ج: پدیده‌ی گیرافتادگی باریکه‌ی فمتوثانیه ۱۰۳

پیش گفتار

اپتیک غیرخطی تحولی بزرگ در اپتیک است که با اختراع و تکامل لیزرها آغاز و تحول یافته است. موضوعات مورد بحث در شاخه اپتیک غیرخطی، مطالعه‌ی اثرات و پدیده‌هایی است که از تغییر خواص نوری مواد در برهمکنش با میدان قوی و همدوس نوری حاصل می‌شوند. تنها نور لیزر شدت و شرایط لازم را برای تغییر خواص نوری مواد دارا می‌باشد. امروزه، از یک طرف، تکامل تکنولوژی لیزر در دستیابی به توان‌های بالا و از طرف دیگر تهیه و تولید موادی جدید با خواص غیرخطی قابل ملاحظه روز به روز بر جذابیت‌ها و پویایی شاخه‌ی اپتیک غیرخطی می‌افزایند. در برهمکنش با تپهای لیزری فمتوثانیه با شدت بالا، در هر محیطی، جامد، مایع و گاز حتی در فشار اتمسفر، خواص نوری غیرخطی القاء می‌شود. از طرف دیگر رفتار غیرخطی شکست انگیز ذرات نانومتری با ضریب شکست غیرخطی بالا راه را برای مطالعه خواص غیرخطی با توان‌های کم نیز باز کرده‌است. به طوری که در تابش لیزری پیوسته ۳ میلی وات هم خاصیت غیرخطی از خود نشان می‌دهند.

توانایی بالای لیزرها در پردازش مواد برای ساخت قطعات مورد نیاز در اندازه‌های نانومتری و میکرومتری افق‌های تازه‌ایی را در صنعت باز کرده‌است. از یک طرف امکان ایجاد ساختارهای نانومتری از مواد بوسیله لیزر و از طرف دیگر توانایی لیزرهایی با تپ فوق کوتاه در تغییر خواص نوری مواد دی الکتریک بدون ایجاد خسارت در ساختار ماده انتظار انقلاب دیگری در صنعت الکترونیک می‌رود. با تغییر دادن خواص نوری ماده، ضریب شکست، ضریب جذب و پراکندگی ساخت قطعات نوری امکان پذیر می‌شود. در اپتیک غیرخطی بسیاری از قطعات نوری به طور خودکار در اثر برهمکنش محیط با نور ایجاد می‌شوند. برای مثال در اثر القاء فرآیندهای غیرخطی ضریب شکست ماده تغییر می‌کند. با کنترل این تغییرات با نور می‌توان محیط را به صورت یک عدسی یا یک موجبر برای خود نور مهیا کرد. این فعالیت‌ها، تغییر خواص نوری ماده و کنترل نور با نور، در جهت استفاده‌های مورد نیاز، شاخه‌ی جدیدی را در اپتیک باز کرده‌است که مهندسی nk نامیده می‌شود و شامل تمام روش‌های تجربی است که ضریب شکست مختلط ماده $n + ik$ در جهت ساخت

قطعه‌ی مورد نظر تغییر داده می‌شود.

این پایان نامه مطابق چارچوب زیر تهیه شده‌است. در فصل-۱ اصول و سازوکار بعضی از فرآیندهای غیرخطی که با مفاهیم آنها سر و کار خواهیم داشت ارائه شده‌است. در فصل-۲ روش‌های اندازه‌گیری که از آنها استفاده کرده‌ایم توضیح داده شده‌اند. روش جاروب لبه، برای اندازه‌گیری پهنای باریکه، پدیده‌ی خود-تصویر جهت استفاده در انحراف سنجی ماره و روش جاروب-Z برای مطالعه‌ی و بررسی فرآیندهای شکست و جذب غیرخطی توضیح داده شده‌اند. در فصل-۳ با استفاده از انحراف سنجی ماره روش جدیدی را برای مطالعه‌ی پدیده خود عدسی-شدگی و تعیین علامت و اندازه‌گیری ضریب شکست غیرخطی مواد ارائه داده‌ایم. روش ارائه شده را برای اندازه‌گیری ضریب شکست غیرخطی ذرات نانومتری اکسید آهن به کار برده و نتایج به دست آمده با مقادیر اندازه‌گیری شده با روش جاروب-Z مقایسه شده‌اند. در فصل-۴ پاسخ روش‌های غیرخطی شیشه‌های سیلیکات آلائیده با عناصر قلیایی را تحت تابش با تپهای فمتوثانیه در طول موج ۸۰۰ نانومتر را بررسی کرده‌ایم. نشان داده شده که این مواد در طول موج مورد آزمایش به صورت محدودکنندگی نوری عمل می‌کنند. در فصل-۵، اثر تپهای فمتوثانیه تحت فرآیندهای غیرخطی روی انواع شیشه‌ها را بررسی کرده‌ایم. نشان خواهیم داد که فرآیندهای غیرخطی زیادی، از قبیل خود-کانونی شدگی، خود-تحریر فازی و جذب چند فوتونی انتشار تپ فمتوثانیه از میان شیشه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند. اثر تولید طیف ابر-پیوسته که مجموعه‌ای از اثرات غیرخطی را در بر می‌گیرد توضیح داده شده‌است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که عبور تپهای فمتوثانیه از میان شیشه‌ها بدون ایجاد خسارت در ساختار شیشه منجر به تغییر خواص نوری از جمله، ضریب شکست و ضریب جذب آن می‌شود. با کنترل این تغییرات، محیط مناسبی جهت ذخیره سازی اطلاعات، ساخت موجبر نوری و مدارهای مجتمع نوری مهیا می‌شود.

کاظم جمشیدی قلعه

تیرماه ۱۳۸۳

مقدمه‌ای بر اپتیک غیرخطی

در این فصل اصول و سازوکار فرآیندهای، شکست غیرخطی^۱، جذب غیرخطی^۲، جذب اشباع پذیر^۳ و جذب اشباع پذیر وارون^۴، خود-عدسی شدگی^۵ و خود-تحریر فازی^۶ که از پاسخ‌های غیرخطی ماده در برهمکنش با نور ایجاد می‌شوند را توضیح می‌دهیم. سعی شده که روابط به طور ساده و متناسب با اهداف این پایان نامه بیان شوند. برای اطلاعات بیشتر و جنبه‌های کاربردی از اثر فرآیندهای غیرخطی دیگر به مراجع همین فصل ارجاع داده می‌شود.

^۱ Nonlinear Refraction

^۲ Nonlinear Absorption

^۳ Saturable Absorber

^۴ Reverse Saturable Absorber

^۵ Self-Lensing

^۶ Self-Phase Modulation

اپتیک غیرخطی شامل مطالعه و بررسی اثرها و فرآیندهایی است که از تغییر خواص نوری مواد، در مقایسه با خواص خطی، در برهمکنش با نور حاصل می‌شوند [۱-۶]. از نقطه نظر فیزیکی چیزی که ملاک خطی یا غیرخطی بودن را تعیین می‌کند پاسخ ماده به میدان نوری تابشی است که با قطبش ماده مشخص می‌شود. در حالت کلی، قطبش محیط، $\bar{P}(t)$ ، با بردار میدان الکتریکی نوری \bar{E} ، چنین رابطه‌ای دارد:

$$\bar{P}(t) = \chi^{(1)} \bar{E} + \chi^{(2)} \bar{E}\bar{E} + \chi^{(3)} \bar{E}\bar{E}\bar{E} + \dots \quad (1-1)$$

که در آن $\chi^{(i)}$ ها ($i=1, 2, 3, \dots$) به ترتیب ثابت‌های پذیرفتاری الکتریکی مرتبه‌ی اول (خطی)، $\chi^{(2)}$ مرتبه‌ی دوم غیرخطی و مرتبه‌ی سوم غیرخطی نامیده می‌شوند. برای محیط‌های ناهمسانگرد، موادی که پاسخ محیط به جهت تابش میدان بستگی دارد، $\chi^{(1)}$ ، $\chi^{(2)}$ و $\chi^{(3)}$ به ترتیب تانسورهای مرتبه‌ی دوم، سوم و چهارم هستند. $\chi^{(i)}$ ها برای محیط‌های پاشنده و جاذب تابعی از بسامد نور تابشی هستند. برای سادگی و هدف ما در این مقدمه می‌توانیم محیط را همسانگرد و غیر پاشنده در نظر بگیریم. برای اطلاعات بیشتر در مورد خواص $\chi^{(i)}$ ها به مرجع [۲] رجوع شود. جمله‌ی اول که با میدان الکتریکی رابطه‌ی خطی دارد فرآیندهای اپتیک خطی را بیان می‌کند و شکست و جذب خطی از آن جمله هستند. جمله‌ی دوم، مرتبه‌ی دوم غیرخطی نامیده می‌شود و پدیده‌هایی از قبیل تولید هارمونیک دوم، ایجاد جمع و تفاضل بسامدها و فرآیند تقویت نوری و... از پاسخ این جمله حاصل می‌شوند. در این فرآیندها سه میدان یا به بیان کوانتومی سه فوتون در فرآیند شرکت می‌کنند و به اصطلاح فرآیندهای سه فوتونی نامیده می‌شوند. به همین ترتیب جمله‌ی سوم، پاسخ مرتبه‌ی سوم غیرخطی نامیده می‌شود و فرآیندهایی نظیر تولید هارمونیک سوم، پراکندگی القایی رامان، خود-واگرایی باریکه‌ی گاوسی از پاسخ این جمله حاصل می‌شوند. یکی از اثرات مهمی که از پاسخ مرتبه‌ی سوم غیرخطی در یک محیط حاصل می‌شود وابستگی ضریب شکست محیط به شدت میدان تابشی است که اثر خود-عدسی شدگی را ایجاد می‌کند. در بخش‌های زیر به طور مفصل در مورد آن بحث خواهیم کرد. در فرآیندهای مرتبه‌ی سوم چهار فوتون در برهمکنش درگیر است و به همین خاطر فرآیندهای چهار فوتونی

نامیده می‌شوند.

یک خاصیت مهم رابطه‌ی (۱-۱) این است که همه‌ی جملات با توان زوج، برای محیط‌هایی که مرکز تقارن وارونی دارند، حذف می‌شوند چرا که با تبدیل $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$ در محیط تغییری حاصل نمی‌شود ولی $\vec{E} \rightarrow -\vec{E}$ و $\vec{P} \rightarrow -\vec{P}$ تبدیل می‌شوند. با اعمال این تبدیلات در رابطه (۱-۱) نتیجه می‌شود که بایستی $\chi^{(2)}$ و همه‌ی ضرایب با توان‌های زوج صفر باشند. این نوع محیط‌ها فرآیندهای غیرخطی مرتبه‌ی دوم از خود نشان نمی‌دهند. مایعات، گازها، و جامدهای امرف (مثل شیشه‌ها) و حتی بسیاری از بلورهای همگن، از این قبیل محیط‌ها هستند. به این خاطر از این محیط‌ها نمی‌توان هارمونیک دوم گرفت. فرآیندهای غیرخطی مرتبه سوم- پدیده‌هایی مربوط به $\chi^{(3)}$ - در هر محیطی چه دارای مرکز تقارن باشند یا فاقد مرکز تقارن، ایجاد می‌شوند. در حالت کلی $\chi^{(i)}$ ها، به ساختار ماده و پارامترهای میدان تابشی بستگی دارند و با مدل اندرکنش نیمه کلاسیکی تابش با ماده (دیدگاه تابش کلاسیکی و ماده کوانتومی) روابط دقیق آنها به دست می‌آیند [۲].

با فرض اینکه فرآیندهای غیرخطی از پاسخ الکترون‌ها به میدان نوری تابیده به ماده حاصل می‌شود می‌توان برآوردی برای مقادیر $\chi^{(i)}$ ها به دست آورد. در مرجع [۷] برآوردی از سهم دیگر پاسخ‌های غیرخطی دیگر، پاسخ هسته‌ها یا نامتقارنی مولکولی، ارائه شده‌است. برای اینکه در برهمکنش نور با ماده پاسخ مرتبه‌ی دوم غیرخطی، جمله دوم در رابطه (۱-۱)، مهم باشد بایستی مقدار آن با پاسخ خطی، جمله اول در رابطه (۱-۱)، قابل مقایسه باشد. برای القاء پاسخ خطی باید کمترین شدت میدان اعمالی با میدان اتمی ($E_{at} = e/a_0^2$) که در آن، $a_0 = \hbar e / 2\pi c \approx 0.5 \times 10^{-10} \text{ m}$ شعاع بوهر و e بار الکترون است) برابر باشد. بنابراین از تساوی جمله اول و جمله دوم در رابطه (۱-۱) داریم:

$$\chi^{(2)} \approx \chi(1) / E_{at} \approx 5 \times 10^{-8} \text{ esu} \quad (2-1)$$

برای مواد چگال مقدار ثابت پذیرفتاری الکتریکی خطی از مرتبه واحد است $\chi^{(1)} = (n^2 - 1) / 4\pi \approx 1$ [۲]. و به همین ترتیب وقتی مرتبه سوم غیرخطی چشمگیر خواهد بود که مقدار آن با مرتبه‌ی دوم قابل مقایسه

باشد و با این برابری مقدار عددی $\chi^{(3)}$ می‌شود:

$$\chi^{(3)} = \chi^{(1)} / E_{at}^2 = \chi^{(2)} / E_{at} \approx 3 \times 10^{-15} \text{ esu} \quad (3-1)$$

و به عنوان یک رابطه کلی، برای برآورد مقدار مرتبه $\chi^{(n)}$ ، برای یک میدان نوری تابشی ثابت، وقتی مرتبه n غیر خطی موثر خواهد بود که مقدار آن با مقدار جمله اول قابل مقایسه باشد. یعنی:

$$\chi^{(n)} = (E / E_{atom})^{n-1} \chi^{(1)} \quad (4-1)$$

وقتی که میدان تابشی از حد میدان اتمی بیشتر شود الکترون‌ها از قید اتم آزاد شده و رابطه بین E و P به شکل رابطه (۱-۱) نخواهد بود. در بخش‌های بعدی این فصل تعدادی از فرآیندهای غیرخطی که از پاسخ‌های الکترونی حاصل می‌شوند را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

۲-۱ شکست غیر خطی

محیطی را در نظر می‌گیریم که دارای مرکز تقارن وارونی است لذا برای این محیط، $\chi^{(2)} = 0$ و در برهمکنش با میدان نوری قطبش مرتبه‌ی دوم ایجاد نمی‌شود. با این فرض، رابطه‌ی (۱-۱) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\bar{P}(t) = \chi^{(1)} \bar{E} + \chi^{(3)} \bar{E} \bar{E} \bar{E} + \dots \quad (5-1)$$

فرض می‌کنیم محیط بدون پاشندگی است و یک میدان نوری تکفام با قطبشی عمود بر راستای انتشار بر آن می‌تابد. بردار جابجایی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$D(t) = E(t) + 4\pi P(t) \quad (6-1)$$

با جایگذاری از رابطه (۵-۱) داریم

$$D(t) = (1 + 4\pi\chi^{(1)} + 4\pi\chi^{(3)} |E(t)|^2) E(t) = \varepsilon E(t) \quad (7-1)$$

که در آن ε ثابت دی‌الکتریک محیط است و با ضریب شکست رابطه‌ی $n = \sqrt{\varepsilon}$ را دارد. بنابراین ضریب شکست محیط با رابطه زیر داده می‌شود:

$$n = 1 + 4\pi\chi^{(1)} + 4\pi\chi^{(3)}I = n_0(1 + 4\pi\chi^{(3)}|E|^2/n_0^2)^{1/2} \quad (8-1)$$

در این رابطه $n_0 = \sqrt{1 + 4\pi\chi^{(1)}}$ ضریب شکست خطی است. رابطه‌ی (8-1) را دوباره به صورت زیر می‌نویسیم:

$$n = n_0 + 2\pi\chi^{(3)}|E|^2/n_0 = n_0 + n_2I \quad (9-1)$$

که در آن $I = n_0c|E|^2/8\pi$ شدت باریکه‌ی لیزری و n_2 یک ثابت اپتیکی است که قدرت غیرخطی ماده را مشخص می‌کند و ضریب شکست غیرخطی مرتبه‌ی دوم نامیده می‌شود. رابطه‌ی (9-1) وابستگی ضریب شکست به شدت میدان را نشان می‌دهد و گاهی اثر غیرخطی - کر هم نامیده می‌شود. این نامگذاری برای محیط‌هایی است که خاصیت غیرخطی از پاسخ الکترون‌های پیوندی ایجاد می‌شود. مقدار n_2 با رابطه‌ی زیر داده می‌شود

$$n_2 = \frac{12\pi^2}{n_0^2c} \chi^{(3)} \quad (10-1)$$

با استفاده از مقادیر عددی $\chi^{(3)}$ برای مواد چگال، رابطه‌ی (10-1)، مقدار n_2 از مرتبه $10^{-17} \text{ cm}^2/\text{W}$ می‌باشد. در محلول CS_2 مقدار n_2 از مرتبه‌ی $10^{-14} \text{ cm}^2/\text{W}$ می‌باشد [8]. نتایج تجربی و تحلیل‌های نظری نشان می‌دهند که ذرات نانومتری فلزها و نیمه رساناهای معلق در یک ماده دی‌الکتریک خاصیت غیرخطی بالایی از خود نشان می‌دهند (از مرتبه $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{Wat}$ و بزرگتر). علت این رفتار عجیب به اثرهای محدود شدگی و افزایش میدان موضعی در اثر برانگیزش پلاسمون‌های سطحی در اندرکنش با میدان نوری مربوط می‌شود [9-12]. بیشتر از روش جاروب-Z برای اندازه‌گیری مقدار n_2 استفاده می‌شود [13 و 14]. در فصل‌های بعد در مورد روش جاروب-Z و روش اندازه‌گیری با این تکنیک شرح خواهیم داد و در فصل-3 یک روش جدید برای اندازه‌گیری ضریب شکست غیرخطی مواد معرفی خواهیم کرد.

۳-۱ جذب غیر خطی

ثابت‌های پذیرفتاری خطی و غیرخطی برای محیط‌های جاذب کمیت‌های مختلط هستند. بنابراین ضریب شکست این محیط‌ها نیز کمیتی مختلط خواهد بود. اگر ضریب شکست مختلط را با $N = n + ik$ نشان دهیم قسمت حقیقی همان ضریب شکست ماده که در بخش قبلی پاسخ خطی و غیرخطی مربوط به آن را بررسی کردیم. و قسمت موهومی آن به ضریب جذب ماده مربوط می‌شود که در این بخش فرآیندهایی را که باعث رفتار غیرخطی جذب می‌شوند را بررسی می‌کنیم. وقتی یک باریکه نوری وارد محیطی می‌شود شدت آن با یک ضریبی کاهش می‌یابد که معادله آن را به این صورت می‌توان نوشت:

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha(I)I \quad (11-1)$$

در این رابطه، $\alpha(I)$ ، ضریب جذب ماده است و در حالت کلی همانند ضریب شکست به شدت باریکه‌ی تابشی بستگی دارد. از دیدگاه کوانتومی جذب شدت باریکه معادل کاهش تعداد فوتون‌های نوری است. وقتی فوتونی در یک محیط جذب می‌شود انرژی آن یا صرف بالا رفتن الکترون‌ها در ترازهای انرژی و یا باعث ارتعاش‌های شبکه‌ای اتمها (القاء فونون) و یا باعث بالا رفتن انرژی حرارتی محیط می‌شود. هر کدام از این اثرات باعث می‌شوند که شرایط ماده از جمله چگالی موضعی، نسبت به حالت اول تغییر کند. این تغییرات می‌توانند فرآیندهای برگشت پذیر و یا برگشت ناپذیر باشند. در هر دو حالت برهمکنش میدان نوری با ماده باعث تغییر ضریب جذب ماده می‌شود. نحوه بستگی تابعی ضریب جذب به شدت، به نوع فرآیند غیرخطی بستگی خواهد داشت که در داخل ماده اتفاق می‌افتد (برای مثال، فرآیندهای جذب دو-فوتونی و جذب از حالت‌های برانگیخته ضریب جذبی وابسته به شدت ایجاد می‌کنند که شکل تابعی متفاوتی دارند). می‌توان نشان داد که برای هر نوع فرآیند غیرخطی که در داخل ماده اتفاق بیافتد ضریب جذب به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\alpha(I) = \alpha_0 + \alpha^{(2)}I + \alpha^{(3)}I^2 + \dots \quad (12-1)$$

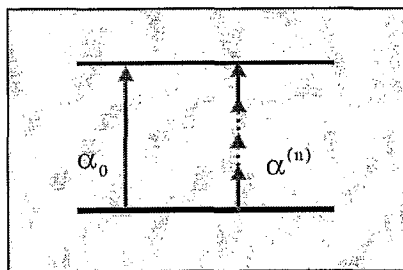
برای شدت‌های لیزری پایین، ضریب جذب مستقل از شدت، مقداری ثابت است که با α_0 نشان داده می‌شود. این فرآیند جذب تک- فوتونی نامیده می‌شود که شدت باریکه‌ی نوری در انتشار از داخل ماده به صورت خطی کاهش می‌یابد. به بیان کوآنتومی کاهش تعداد فوتون‌ها با چگالی فوتون‌های تابشی به صورت خطی است. در این صورت، اگر شدت لیزر در روی سطح ماده I_0 باشد، در فاصله z از سطح، در داخل ماده، مقدار شدت از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$I(z) = I_0 \text{Exp}[-\alpha_0 z] \quad (1-13)$$

این رابطه به قانون بیر- لامبرت معروف است و یک روش آزمایشگاهی برای تعیین ضریب جذب خطی مواد می‌باشد. شیب منحنی لگاریتمی شدت عبوری به شدت تابشی بر حسب ضخامت نمونه ضریب جذب خطی را می‌دهد ($\text{Ln}(I_L / I_0) = -\alpha_0 L$). وقتی که شدت تابیده به ماده افزایش یابد، فرآیندهای غیرخطی ظاهر شده (اثر جمله‌های بالاتر در قطبش ماده چشمگیر می‌شوند) و ضریب جذب ماده تغییر می‌کند. به بیان کوآنتومی، با افزایش شدت باریکه چگالی فوتون‌ها زیاد شده و احتمال جذب شدن همزمان دو یا چندین فوتون بیشتر می‌شود. این تاثیر در حالت کلی به دو صورت:

اشباع جذب و یا افزایش جذب می‌باشد. اینکه کدام یک از این حالت‌ها در برهمکنش اتفاق می‌افتد به ساختار ماده بستگی دارد. در ادامه‌ی این بخش چند نمونه از فرآیندهای غیرخطی را که ضریب جذب ماده را در مقایسه با رژیم خطی تغییر می‌دهند بررسی خواهیم کرد.

اگر بر حسب ترتیب بزرگی مرتبه‌های بالاتر جذب را، با فرض اینکه بروز فرایند فوق در محیط مجاز باشد، در نظر بگیریم به ترتیب جذب دو- فوتونی، سه- فوتونی و مرتبه‌های بالاتر اهمیت خواهند داشت. ولی در نهایت ساختار ماده و پارامترهای تپ لیزری (زمان تپ، انرژی و طول موج) تعیین کننده هستند و ممکن است چندین فرآیند همزمان اتفاق بیافتند. برای هر حالت، می‌توان با یک فرمول‌بندی مناسب رفتار کاهش شدت را به دست آورد.



شکل ۱-۱. نمایش ترازهای انرژی و فرآیند جذب خطی و n - فوتونی

شکل ۱-۱ حالتی را نشان می‌دهد که در داخل یک ماده‌ی اختیاری شدت طی فرآیندهای جذب خطی تک- فوتونی و n - فوتونی کاهش می‌یابد. نمونه‌ای از این فرایند در برهمکنش تپهای فمتوثانیه با شیشه‌ها طی جذب سه- فوتون و جذب خطی پلاسما اتفاق می‌افتد (فصل-۴). برای چنین حالتی معادله کاهش شدت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha_0 I - \alpha^{(n)} I^n = -\alpha(I)I, \quad \alpha(I) = \alpha_0 + \alpha^{(n)} I^{n-1} \quad (14-1)$$

که در آن $\alpha^{(n)}$ ضریب جذب n - فوتونی و α_0 ضریب جذب خطی هستند. با انتگرال گیری از معادله (۱۴-۱) شدت در داخل ماده در فاصله z از سطح خواهد شد:

$$I(z) = \frac{I(0) \text{Exp}[-\alpha_0 z]}{[1 + (n-1)Z_{\text{eff}} \alpha^{(n)} I^{n-1}(0)]^{\frac{1}{n-1}}} \quad (15-1)$$

که در آن Z_{eff} ، به صورت زیر تعریف شده است

$$Z_{\text{eff}} = \frac{1 - \text{Exp}[-(n-1)\alpha_0 z]}{(n-1)\alpha_0} \quad (16-1)$$

اگر در رابطه (۱۴-۱)، $n=2$ در نظر بگیریم رابطه‌ی فوق به جذب تک فوتونی به همراه فرآیند جذب دو- فوتونی تبدیل می‌شود. در یک برهمکنش اندازه گاف انرژی ماده و انرژی فوتون و هم‌چنین چگالی فوتونها تعیین کننده هستند. اگر انرژی فوتون قابل مقایسه با گاف انرژی ماده باشد می‌تواند الکترونی را از نوار ظرفیت به نوار رسانش ببرد. در هر برهمکنشی نمی‌توان از جذب خطی صرف نظر کرد در هر صورت یک

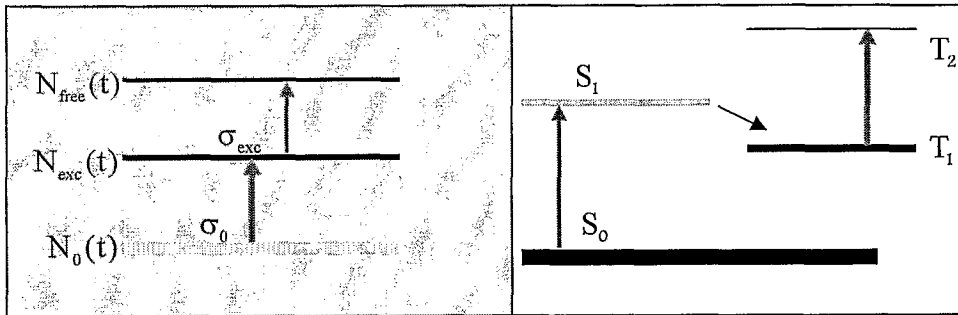
کانالی برای جذب خطی یا از ناخالصی‌ها و یا ترازهای واقعی خود ماده وجود خواهد بود. برای یک حالت خاص که جذب تک- فوتونی، دو و سه فوتونی به طور همزمان در فرآیند جذب شرکت می‌کنند در پیوست- ب ارائه شده است.

۴-۱ جذب اشباع پذیر و جذب اشباع پذیر وارون

اگر تنها دو تراز انرژی اتمی را در نظر بگیریم در حالت ترازمندی گرمایی جمعیت تراز پایین بیشتر از تراز بالایی است و احتمال گذار از تراز پایین به تراز بالا بیشتر است و الکترون‌ها با جذب فوتون‌ها به تراز بالایی می‌روند. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که جمعیت هر دو تراز برابر شود. در این حالت احتمال برگشت الکترون‌ها از تراز بالایی به تراز پایین با احتمال بالا رفتن یکی می‌شود. بنابراین به ازای هر فوتون جذب شده یک فوتون آفریده می‌شود و تغییری در چگالی فوتون‌ها ایجاد نمی‌شود. این فرآیند اشباع دو تراز نامیده می‌شود. اینکه ماده تنها دو تراز انرژی داشته باشد حالت خیلی ایده‌آلی می‌باشد. در هر اتمی ترازهای انرژی بیشتری برای الکترون‌ها وجود دارد. از طرف دیگر احتمال جذب برای الکترون‌های ترازهای بالاتر نیز وجود دارد. برای بعضی مواد به خصوص مواد الی ترازهای اتمی تک-گانی^۷ و سه-گانی^۸ تعریف می‌شود [۱۵]. وقتی که الکترونی از تراز انرژی پایه به اولین حالت برانگیخته تک-گانی می‌رود می‌تواند در یک زمان کوتاه (در حدود پیکوثانیه) به اولین تراز برانگیخته نزدیک واهلش کند (شکل ۲-۱). عمل واهلش در ترازهای برانگیخته تک-گانی هم از زیر ترازهای بالایی به زیر ترازهای پایین می‌تواند اتفاق بیافتد. در این صورت الکترون فوق دیگر در گسیل القایی شرکت نخواهد کرد ولی می‌تواند یک فوتون دیگر جذب کرده به ترازهای بالاتر برود. این اثر یک کاهش غیرخطی در شدت لیزری ایجاد خواهد کرد. بسته به نوع ماده دو احتمال می‌تواند اتفاق بیافتد که جذب اشباع پذیر و اشباع پذیر وارون حاصل می‌شود [۱۵ و ۱۶].

^۷ Singlet

^۸ Triplet



شکل ۱-۲. نمایش ترازهای انرژی و جذب از تراز پایه و تراز برانگیخته. در سمت راست شکل فرآیند واهلش

از یک تراز تک-گانی برانگیخته به تراز سه-گانی نشان می دهد.

این فرآیند در محیط‌هایی دیده می‌شود که ضریب جذب از تراز پایه بیشتر از ضریب (یا ضرایب) جذب تراز (ترازهای) برانگیخته باشد. در این حالت با جذب بیشتر از تراز پایه جمعیت آن خالی شده و با افزایش شدت فرودی افزایشی در جذب صورت نمی‌گیرد. فرآیند عکس وقتی اتفاق می‌افتد که سطح مقطع جذب از تراز (یا ترازهای) برانگیخته بزرگتر از سطح مقطع جذب تراز پایه باشد. این فرآیند که جذب اشباع پذیر وارون نامیده می‌شود با افزایش شار لیزری جمعیت تراز برانگیخته خالی می‌کند [۱۶]. شکل ۲-۲ جذب از تراز پایه با سطح مقطع جذبی σ_0 و به همراه آن جذب از یک تراز برانگیخته با سطح مقطع σ_{exc} را نشان می‌دهد. اگر جمعیت‌های لحظه‌ای تراز پایه و برانگیخته را به ترتیب با $N_0(t)$ و $N_{exc}(t)$ نمایش دهیم و از باز ترکیب از حالت برانگیخته به حالت پایه هم صرف نظر کنیم، معادلات تحولات زمانی جمعیت ترازا خواهد شد:

$$\frac{\partial N_0(t)}{\partial t} = -\sigma_0 N_0(t) I(r, z, t) / h\nu \quad (17-1)$$

$$\frac{\partial N_{exc}(t)}{\partial t} = \sigma_0 N_0(t) I(r, z, t) / h\nu - \sigma_{exc} N_{exc}(t) I(r, z, t) / h\nu \quad (18-1)$$

و معادله‌ی حاکم بر کاهش شدت باریکه‌ی لیزری عبور کرده از داخل نمونه، بر اثر جذب خطی (جذب از حالت پایه) و جذب غیرخطی (جذب از حالت برانگیخته)، به صورت زیر خواهد بود: