بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه الزهرا (س)**

**دانشکده علوم پایه**

**پایان نامه**

**جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد**

**رشته فیزیک اتمی و مولکولی**

**عنوان**

# دوپایداری نوری و رفتار گذرای حلقه فیبر نوری آغشته به اربیوم و نقطه‌های کوانتومی

**اساتید راهنما**

**دکتر بتول سجاد**

**دکتر علیرضا بهرامپور**

**استاد مشاور**

**دکتر فاطمه شهشهانی**

**دانشجو**

**سمیه صفری**

اسفند ۱۳۹۰

کلیه دستاوردهای این تحقیق متعلق به دانشگاه الزهرا است.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

# قدردانی و سپاس

خداوند بزرگ را شاکرم که با امید و یاری اش توانستم این مسیر را با موفقیت طی کنم و این تحقیق را در کنار اساتید عالم، مهربان، و دلسوزی چون خانم دکتر سجاد، آقای دکتر بهرامپور و خانم دکتر شهشهانی به انجام برسانم. از ایشان برای راهنمایی ها، کمک ها و محبت بی کران شان بی نهایت سپاسگذارم.

از دوست عزیزم خانم سارا توفیقی که با همفکری های بی دریغ اش در این راه همراهم بود و تمامی دوستانی که به نحوی در این پژوهش یاری ام رساندند کمال تشکر را دارم.

## چکیده

در این رساله، دوپایداری نوری در حلقه فیبر نوری که نیمی از آن آغشته به یون‌های اربیوم و نیمه دیگر آغشته به نقطه‌های کوانتومی است، در حالت پایا و گذرا مورد مطالعه قرار گرفته است. نیمه آغشته به نقطه‌های کوانتومی، نقش جاذب اشباع پذیر را دارد که باعث ایجاد دوپایداری نوری  می‌شود. نیمه آغشته به یون‌های اربیوم، به عنوان تقویت کننده، با تقویت سیگنال داخل حلقه باعث کاهش توان کلیدزنی می‌شود. دوپایداری نوری در حلقه فیبر نوری در حالت پایا با روش تحلیلی و عددی بدست آمده و مقادیر عددی دو نقطه گذار بالا و پایین مشخص گردیده و توان کلیدزنی در هر دو روش تحلیلی وعددی حدود ۷mw بدست آمده است. سپس تغییر توان کلیدزنی تحت پارامترهای مختلف حلقه فیبر از جمله غلظت یون‌های اربیوم، ضریب عبور، توان دمش و...مورد بررسی قرار گرفته است. و در نهایت رفتار زمانی حلقه فیبر نوری با حل عددی بررسی شده است.

# فهرست مطالب

## فصل اول : مقدمه

مقدمه ..... ۲

## فصل دوم : دوپایداری نوری

مقدمه ..... ۷
۲-۱ تعریف دوپایداری و انواع آن ..... ۸
۲-۲ رفتار کلی قطعه‌ای با دوپایداری شدت ..... ۹
۲-۳ شرایط لازم برای ساخت یک قطعه دوپایدار نوری ..... ۱۰
۲-۴ انواع قطعه دوپایدار نوری ..... ۱۱
۲-۴-۱ قطعه دوپایدار نوری پاشنده ..... ۱۲
۲-۴-۲ قطعه دوپایدار نوری جاذب ..... ۱۵
۲-۵ دوپایداری نوری در تشدیدگر حلقه‌ای فیبری با محیط جاذب غیرخطی ..... ۱۷

## فصل سوم : نقطه‌های کوانتومی

مقدمه ..... ۲۶
۳-۱ تعریف نقطه‌های کوانتومی ..... ۲۷
۳-۲ مدل یک نقطه کوانتومی ..... ۲۷
۳-۳ شکل‌های مختلف نقطه‌های کوانتومی ..... ۲۹
۳-۳-۱ نقطه‌های کوانتومی مکعبی ..... ۲۹
۳-۳-۲ نقطه‌های کوانتومی کروی ..... ۳۰
۳-۳-۳ نقطه‌های کوانتومی هرمی ..... ۳۳
۳-۴ اثر محبوس‌سازی کوانتومی ..... ۳۴
۳-۵ قطبش سطح و بر هم کنش‌های ذره ..... ۳۵

۳-۶ پذیرفتاری سامانه‌های نقطه کوانتومی ..... ۴۱
۳-۷ ویژگی‌های نوری نقطه‌های کوانتومی ..... ۴۶
۳-۸ ویژگی‌های ساختاری و نوری نقطه کوانتومیPbS ..... ۴۶
۳-۹ روش‌های ساخت نقطه‌های کوانتومی ..... ۴۹
۳-۹-۱ لیتوگرافی باریکه الکترونی یا یونی ..... ۴۹
۳-۹-۲ ساخت کلوئیدی ..... ۵۰
۳-۹-۳ اپیتکسی ..... ۵۰
۳-۱۰ نقطه‌های کوانتومی در دیودهای گسیل‌کننده نور یا QD LED ..... ۵۲

## فصل چهارم : تقویت کننده‌های فیبر نوری

مقدمه ..... ۵۴
۴-۱ تقویت کننده‌های فیبر آغشته به اربیوم ..... ۵۵
۴-۱-۱ یون‌های خاکی کمیاب ..... ۵۵
۴-۱-۲ اربیوم ..... ۵۶
۴-۱-۳ شبیه سازی تقویت کننده ..... ۵۸
۴-۱-۳-۱ معادلات نرخ ۳ ترازی ..... ۵۸
۴-۱-۳-۲ کاهش معادلات نرخ ۳ ترازی به ۲ ترازی ..... ۶۰
۴-۱-۳-۳معادلات انتشار دمش و سیگنال ..... ۶۱
۴-۱-۳-۴ معادله انتشار گسیل خود به خودی تقویت شده ..... ۶۱
۴-۱-۳-۵ معادلات انتشار با در نظر گرفتن تلفات زمینه ذاتی در فیبر ..... ۶۳
۴-۱-۴ بهره تقویت کننده ..... ۶۳
۴-۱-۵ نویز تقویت کننده ..... ۶۵
۴-۱-۶ جذب حالت برانگیخته سیگنال و دمش ..... ۶۷
۴-۲ تقویت‌کننده فیبر آغشته به نقطه کوانتومی ..... ۶۸
۴-۲-۱ ترازهای انرژی ..... ۶۸
۴-۲-۲ معادلات نرخ و انتشار توان ..... ۶۹
۴-۲-۳ سطح مقطع‌های جذب و گسیل ..... ۷۰

۴-۲-۴ بهره تقویت کننده ..... ۷۲
۴-۲-۵ وابستگی دمایی محدود ..... ۷۲
۴-۲-۶ تغییرات بهره با طول فیبر و غلظت نقطه کوانتومی ..... ۷۴
۴-۲-۷ بستگی بهره به توان دمش ..... ۷۵
۴-۲-۸ تقویت‌کننده فیبر از نقطه‌های کوانتومی نیم رسانای PbS ..... ۷۶
۴-۲-۸-۱ ساختار تقویت کننده ..... ۷۶
۴-۲-۸-۲ بیناب‌های فرکانسی سیگنال ورودی، دمش و سیگنال با دمش ..... ۷۷
۴-۲-۸-۳ طیف بهره بر حسب طول موج و توان دمش ..... ۷۸
۴-۳ تقویت‌کننده‌های فیبر رامان ..... ۷۹
۴-۳-۱ بهره تقویت‌کننده ..... ۷۹
۴-۳-۲ نویز تقویت‌کننده ..... ۸۰
۴-۴ تقویت‌کننده‌های فیبر بریلوئن ..... ۸۱

## فصل پنجم : رفتار زمانی و دوپایداری نوری حلقه فیبر نوری آغشته به اربیوم و نقطه‌های کوانتومی

مقدمه ..... ۸۳
۵-۱ ساختار و عملکرد حلقه فیبر نوری آغشته به اربیوم و نقطه‌های کوانتومی ..... ۸۴
۵-۲ معادلات آهنگ در نیمه آغشته به یون‌های اربیوم تشدیدگر حلقه ای ..... ۸۵
۵-۳ معادلات آهنگ در نیمه آغشته به نقطه‌های کوانتومی تشدیدگر حلقه ای ..... ۸۸
۵-۴ شرایط مرزی ..... ۸۹
۵-۵ پاسخ تحلیلی دوپایداری نوری در حلقه فیبر نوری آغشته به اربیوم و نقطه‌های کوانتومی در حالت پایا ..... ۹۱
۵-۵-۱ دوپایداری نوری با ضرایب عبور مختلف t۱ در EDFA-QD RR ..... ۹۸
۵-۵-۲ دوپایداری نوری با ضرایب عبور مختلف t۲ در EDFA-QD RR ..... ۹۹
۵-۵-۳ دوپایداری نوری با ضرایب عبور مختلف t۱ و t۲ در EDFA-QD RR ..... ۹۹
۵-۵-۴ دوپایداری نوری با ضرایب جذب مختلف در EDFA-QD RR ..... ۱۰۰

۵-۶ بررسی دوپایداری نوری در حلقه فیبر نوری آغشته به اربیوم و نقطه‌های کوانتومی در حالت پایا با حل عددی ..... ۱۰۱
۵-۶-۱ الگوریتم حل عددی ..... ۱۰۴
۵-۶-۲ نتیجه حل عددی معادله‌ها در حالت پایا ..... ۱۰۶
۵-۶-۳ دوپایداری نوری با توان‌های دمش مختلف در EDFA-QD RR ..... ۱۰۹
۵-۶-۴ دوپایداری نوری با ضرایب عبور مختلف t۱ در EDFA-QD RR ..... ۱۱۰
۵-۶-۵ دوپایداری نوری با ضرایب عبور مختلف t۲ در EDFA-QD RR ..... ۱۱۱
۵-۶-۶ دوپایداری نوری با غلظت‌های مختلف نقطه‌های کوانتومی در EDFA-QD RR ..... ۱۱۲
۵-۶-۷ دوپایداری نوری با غلظت‌های مختلف یون اربیوم در EDFA-QD RR ..... ۱۱۳
۵-۶-۸ دوپایداری نوری با قطرهای مختلف حلقه فیبر در EDFA-QD RR ..... ۱۱۴
۵-۷ بررسی دوپایداری نوری در تشدیدگر حلقه‌ای فیبر آغشته به اربیوم و نقطه‌های کوانتومی در حالت گذرا با حل عددی ..... ۱۱۵
۵-۷-۱ روش میانگین‌گیری ..... ۱۱۶
۵-۷-۱-۱ محاسبه $\eta$ ..... ۱۱۸
۵-۷-۱-۲ محاسبه $\gamma$ ..... ۱۲۰
۵-۷-۲ روش گسسته سازی ..... ۱۲۱
نتیجه‌گیری و پیشنهاد ..... ۱۲۴
فهرست منابع ..... ۱۲۶

# فصل اول

## مقدمه

## مقدمه

استفاده از موجبرهای دی الکتریک یا فیبرهای نوری شیشه ای به عنوان محیط انتقال شبکه‌های انتقال نوری در سال ۱۹۶۶مطرح شد[۱].

برتری‌های استفاده از فیبر نوری به عنوان محیط انتقال نسبت به سیم‌های مسی عبارتند از:

۱- پهنای باند انتقال بزرگ و نرخ داده بالایی دارند.
۲- تلفات انتقال شبکه‌های فیبر نوری پایین است.
۳- سیستم‌های انتقال فیبر نوری از هر گونه تداخل امواج الکترومغناطیسی مصون هستند.
۴- فیبرهای نوری عایق الکتریکی هستند.
۵- اندازه و وزن کوچک دارند.
۶- امنیت سیگنال در یک شبکه انتقال فیبر نوری بالاست.

فیبر نوری دو فاکتور محدودکننده مهم دارد: ۱- میرایی ۲- پاشندگی

میرایی سبب تلفات توان سیگنال می شود که فاصله انتقال را کم می کند و پاشندگی نیز پهن‌شدگی پالس نوری را به دنبال دارد. پاشندگی و میرایی سیگنال با افزایش طول فیبر، افزایش پیدا می کند. بنابراین در مخابرات فیبر نوری، سیگنال نوری نیاز به بازسازی دارد. این امر با استفاده از تکرارکننده‌ها انجام می شود.

تا سال ۱۹۶۶، میرایی فیبرهای نوری حدود $\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{Km}}$ ۱۰۰۰ بود و تا سال ۱۹۷۰ میرایی به $۲۰\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{Km}}$ کاهش پیدا کرد[۲].

در سال ۱۹۷۵ نخستین سامانه ارتباط فیبر نوری در طول موج $۰.۸\mu m$ ساخته شده که در آن از لیزرهای نیمه رسانای GaAs استفاده شده است. آهنگ بیت این سامانه ۴۵MbPs و فاصله تکرار کننده‌ها بیشتر از ۱۰Km بود.

دومین سامانه ارتباط فیبر نوری در سال ۱۹۸۰ در طول موج $۱.۳\mu m$ و با استفاده از لیزرهای نیمه رسانای InGaAsP ساخته شد. این سامانه‌ها محدودیت پاشندگی فیبر چند مدی را داشتند که در سال ۱۹۸۱ با ساخت فیبرهای تک مد عملکرد این سامانه‌ها به اندازه زیادی بهبود پیدا کرد. برای فاصله تکرارکننده ۵۰Km، آهنگ بیت این سامانه‌ها به $۱.۷\frac{\mathrm{Gb}}{\mathrm{s}}$ رسید.

سومین سامانه ارتباط فیبر نوری در طول موج ۱.۵۵$\mu m$ عمل می کرد و تلفات ۰.۲$\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{Km}}$ داشت. در آن طول موجی که از لیزرهای نیمه رسانا استفاده می شد، پاشندگی پالس وجود داشت که با طراحی فیبرهایی با پاشندگی انتقال یافته یا محدود کردن طیف لیزر نیمه‌رسانا به یک تک مد طولی این مشکل برطرف شد. این فیبرها طوری طراحی شدند که در طول موج ۱.۵۵$\mu m$ کمترین پاشندگی را داشته باشند. با این پیشرفت‌ها سومین سامانه ارتباط فیبر نوری با نرخ بیت ۲.۵$\frac{\mathrm{Gb}}{\mathrm{s}}$ با فاصله تکرارکننده ۱۰۰Km ساخته شد.

در چهارمین سامانه ارتباط فیبر نوری، از تقویت نوری استفاده شد تا نیاز به تکرارکننده کاهش پیدا کند. همچنین برای افزایش ظرفیت داده WDMها[1] مورد استفاده قرار گرفتند. این دو پیشرفت در سال ۱۹۹۲، ظرفیت این سامانه‌ها را دوبرابر کرد و در سال ۲۰۰۱آهنگ بیت به ۱۰$\frac{\mathrm{Tb}}{\mathrm{s}}$ و در سال ۲۰۰۶ با استفاده از تقویت‌کننده های نوری به ۱۴$\frac{\mathrm{Tb}}{\mathrm{s}}$رسید[۳].

تکرارکننده‌ها با تبدیل سیگنال نوری به سیگنال الکتریکی، پردازش سیگنال الکتریکی و سپس بازانتقال[2] سیگنال نوری، آن را بازسازی می کنند. سه نوع تکرارکننده در سامانه‌های ارتباط فیبر نوری مورد استفاده قرار گرفته اند:

۱- تکرارکننده‌های R: این تکرارکننده‌ها فقط پالس داده را تقویت می کنند که عمل تقویت با استفاده از تقویت کننده‌های فیبر آغشته به اربیوم یا تقویت کننده‌های دیگر انجام می شود. تقویت کننده‌های نوری قطعات آنالوگ هستند که سبب اضافه شدن نویز به سیگنال می شوند. این نویز تولید شده مانند سیگنال از میان تعدادی تقویت‌کننده عبور می کند که این سبب انباشتگی نویز و ایجاد خطا در انتقال دیجیتالی می‌شود.

۲- تکرارکننده‌های ۲R: این تکرارکننده‌ها علاوه بر تقویت توان، شکل پالس داده را هم بازسازی می‌کنند. انتقال سولیتون امکان بازسازی ۲R را فراهم می کند. به این علت که سولیتون‌ها تا زمانی که شدت مورد نیازشان را از دست ندهند، شکل پالس‌شان را در سیستم انتقال حفظ می کنند. تقویت کننده‌های نوری سیگنال را تقویت می کنند، در حالی که برهم کنش‌های غیرخطی بین پالس‌های نوری و فیبر شکل پالس را تغییر می دهد. بازسازی ۲R می تواند بر نویز تقویت شده غلبه کند.

[1] Wavelength Division Multiplexing
[2] Retransmitting

۳- تکرارکننده‌های ۳R: بازسازی ۳R، عمل بازسازی زمانی به علاوه بازسازی شکلی و توانی پالس را انجام می دهد.

در تکرارکننده‌های ۲R و ۳R از قطعه‌های دوپایدار نوری استفاده می شود. یک قطعه دوپایدار نوری از یک تشدیدگر فابری-پرو یا تشدیدگر حلقه‌ای تشکیل شده است که یک ماده غیرخطی درون آن قرار گرفته است و می تواند به ازای یک مقدار توان سیگنال ورودی دو مقدار توان سیگنال خروجی مختلف و پایدار داشته باشد. این پدیده از طریق اثر کر، اثر جذب اشباع‌شونده و جذب دوفوتونی ایجاد می شود.

قطعه‌های دوپایدار نوری فیبری، تشدیدگرهایی هستند که در آن ها از فیبر به عنوان یک محیط فعال غیرخطی استفاده می شود. دوپایداری نوری در فیبر به دلیل کاربردهایی که در سامانه‌های پردازش سیگنال نوری از جمله گیت‌های منطقی، حافظه‌ها، محدودکننده‌ها، مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال، تکرارکننده‌ها و... دارد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. همچنین دوپایداری نوری به عنوان اساس عملکرد کلیدزنی به شمار می‌رود.

دوپایداری نوری برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ توسط اسزوک[1] به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفت و در سال ۱۹۷۶ توسط گیبس[2] به صورت تجربی مشاهده شد.

طرح‌های مختلفی از دوپایداری نوری که در فیبر ارائه شده عبارتند از:

۱- یک قطعه دوپایدار نوری هیبریدی فیبری با فیدبک الکتریکی توسط یان چنگ[3] و همکارانش پیشنهاد و تحلیل شده است و نحوه عملکرد دوپایداری و برخی از کاربردهای آن برای پردازش سیگنال نوری به صورت آزمایشی بررسی شده است[۴].
۲- این گروه همچنین یک قطعه دوپایدار فیبر نوری برای کلیدزنی نوری و تقویت سیگنال دیجیتالی پیشنهاد داده اند[۵].
۳- یک قطعه دوپایدار نوری فیبر آغشته به اربیوم برای تقویت سیگنال نوری دیجیتالی ارائه شده و بهره سیگنال نوری با تغییر پارامترهای مختلف قطعه بررسی شده است[۶].

[1] Szok
[2] Gibbs
[3] Yuancheng

۴- یک قطعه دوپایدار نوری شامل کاواک تمام فیبر از فیبر آغشته به اربیوم در طول موج عملکرد ۱.۵۵$\mu m$ ارائه شده و توان آستانه دوپایداری به صورت تجربی از مرتبه mw بدست آمده است[۷].

۵- دوپایداری ایجاد شده از طریق اثر کر در یک تشدیدگر حلقوی فیبری به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفته است[۸].

۶- همچنین طرح‌های مختلفی برای کلیدزنی نوری ارائه شده است[۹،۱۲].

۷- یکی از ایده‌های دیگر برای مشاهده دوپایداری نوری ساختاری است که از دو بخش فیبر آغشته به اربیوم تشکیل شده است[۱۳]. که در آن یکی از فیبرهای آغشته به اربیوم به عنوان تقویت کننده و دیگری به عنوان جذب کننده عمل می کند. این ابزار نوری منحنی مشخصه بهره خاصی دارد که منجر به دوپایداری در لیزر فیبر حلقوی می شود. با تنظیم توان دمش اعمال شده به قسمت جذب کننده می‌توان رفتار دوپایداری نوری و همچنین گستره آن را تغییر داد.

۸- همچنین دوو[1] و لی[2] دوپایداری را در تشدیدگر حلقوی فیبری بررسی کرده اند که نیمی از آن شامل تقویت کننده آغشته به اربیوم و نیمه دیگرش فیبر معمولی از جنس سیلیکون بود که توانستند به توان کلیدزنی بهینه‌ای در حدود ۶۰mw دست یابند[۱۴]. این توان در مقایسه با توان ۱kw که با تشدیدگری شامل فیبر حلقوی معمولی، بدون تقویت کننده آغشته به اربیوم حاصل می‌شد بسیار کوچک بود.

در این پژوهش، دوپایداری نوری در تشدیدگر فیبر حلقه‌ای که نیمی از آن آغشته به اربیوم و نیمه دیگر آغشته به نقطه‌های کوانتومی است، مورد بررسی قرار گرفته است. نیمه آغشته به نقطه‌های کوانتومی نقش جاذب اشباع‌پذیر دارد که سبب ایجاد دوپایداری نوری می شود و نیمه آغشته به اربیوم نقش تقویت کننده دارد که با تقویت سیگنال ورودی باعث کاهش توان کلیدزنی می شود. دوپایداری در این تشدیدگر حلقه‌ای در حالت پایا با دو روش تحلیلی و عددی بررسی شده و توان آستانه کلیدزنی در هر دو حالت بدست آمده و تغییر آن تحت پارامترهای مختلف حلقه فیبر بررسی شده است. سپس رفتار زمانی این حلقه فیبر تحلیل و بررسی شده است.

[1] Na Dou
[2] Li

# فصل دوم

# دوپایداری نوری

## مقدمه

دوپایداری نوری[1] یکی از مهم‌ترین اثرات غیر خطی در اپتیک به شمار می رود. این اثر توسط پدیده‌های غیرخطی از قبیل اثر کر، اثر جذب اشباع شونده و جذب دوفوتونی ایجاد می شود. سیستم دوپایدار نوری به ازای یک مقدار ورودی، دو مقدار خروجی متفاوت و پایدار دارد. به علت این خاصیت دودویی، قطعه‌های دوپایدار می‌توانند برای عملگرهای دیجیتالی از جمله سوئیچ‌ها، حافظه‌ها، فلیپ فلاپ‌ها[2]، گیت‌های منطقی[3]، مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال، تکرارکننده‌ها[4] و... استفاده شوند. مدارها و قطعات الکترونیکی دوپایدار، از اجزا لازم و ضروری سیستم‌هایی هستند که احتیاج به ذخیره اطلاعات دودویی دارند. به علاوه می‌توانند به عنوان تفکیک‌کننده های پالس نوری و محدودکننده‌های توان نوری مورد استفاده قرار می گیرند.

در این فصل نخست مفهوم دوپایداری و عوامل ایجاد کننده آن توضیح داده شده، سپس مشخصه کلی قطعه دوپایدار و شرایط لازم برای ساخت یک قطعه دوپایدار و انواع آن و در نهایت دوپایداری در یک تشدیدگر حلقه‌ای بیان شده است.

---

[1] Optical Bistability
[2] Flip flop
[3] Logical gate
[4] Repeater

## ۲-۱ تعریف دوپایداری و انواع آن

به دو حالت خروجی پایدار یک سیستم، دوپایداری گفته می شود. قطعه‌ای که به ازای یک پارامتر ورودی، دو پارامتر خروجی مختلف و پایدار داشته باشد یک قطعه دوپایدار است. قطعه دوپایدار نوری ورودی و خروجی‌اش موج نوری است. دوپایداری نوری شامل دوپایداری شدت، فاز، فرکانس و قطبش است. دوپایداری نوری از طریق اثر کر، جذب اشباع شونده و جذب دوفوتونی حاصل می شود. این سه اثر از پدیده‌های غیرخطی در اپتیک به شمار می روند و در شدت‌های  بالای نور رخ می دهد.

### اثر جذب اشباع شونده

ضریب جذب موادی که خاصیت جذب اشباع پذیر دارند تابعی از شدت نور است. به این صورت که در شدت‌های پایین، جذب بالایی دارند. در حالی که در شدت‌های بالا، میزان جذب بسیار پایین است. ضریب جذب برای این مواد به صورت زیر تعریف می شود:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1+\frac{I}{I_{sat}}} \qquad (2-1)$$

که $\alpha_0$ ضریب جذب در شدت‌های پایین و $I_{sat}$ شدت اشباع ماده می باشد.

### اثر کر

وقتی ضریب شکست مواد در شدت‌های بالا تابعی از شدت نور شود، اثر کر رخ می دهد. که ضریب شکست برای این مواد به صورت زیر تعریف می شود:

$$n = n_0 + n_2 I \qquad (2-2)$$

که $n_0$ ضریب شکست در شدت‌های پایین و $n_2$ یک ثابت اپتیکی است.

### اثر جذب دوفوتونی

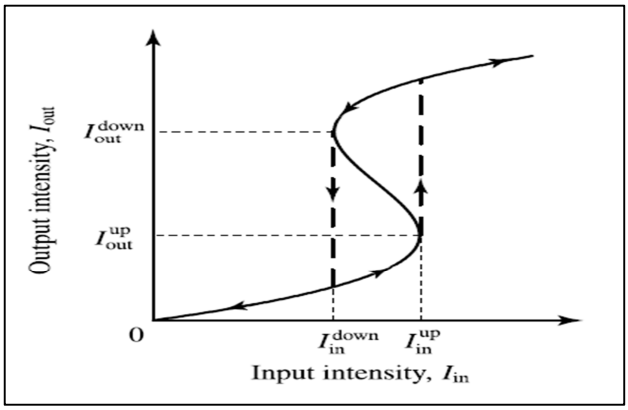
در این فرآیند اتم با جذب هم‌زمان دو فوتون، از حالت پایه به حالت برانگیخته می رود. سطح مقطع جذب اتم در این فرآیند به صورت زیر با شدت نور تغییر می کند:

$$\sigma = \sigma^{(2)} I \qquad (2-3)$$

که $\sigma^{(2)}$ قدرت فرآیند جذب دوفوتونی را توصیف می کند.

## ۲-۲ رفتار کلی قطعه‌ای با دوپایداری شدت

شکل (۲-۱) رفتار کلی دوپایداری شدت یک سامانه دوپایدار را نشان می‌دهد. به ازای شدت ورودی بین $I_{in}^{up}$ و $I_{in}^{down}$ سه مقدار برای شدت خروجی وجود دارد. شاخه‌های بالا و پایین منحنی اندازه‌های خروجی پایدار هستند. در حالی که شاخه میانی ناپایدار است، چون شیب منفی دارد ( $\frac{dI_{out}}{dI_{in}} < 0$ ). وقتی شدت ورودی به تدریج از مقدار صفر افزایش پیدا می‌کند، شدت خروجی طبق شاخه پایینی افزایش می‌یابد. تا اینکه شدت ورودی به نقطه گذار بالا در $I_{in}^{up}$ برسد، در این نقطه خروجی یک پرش ناگهانی به شاخه بالایی خواهد داشت. وقتی شدت ورودی تا نقطه گذار پایین در $I_{in}^{down}$ کاهش پیدا کند، سامانه می تواند از شاخه بالایی به شاخه پایینی برگردد. اگر مقدار شدت ورودی در ناحیه دوپایداری ( $I_{in}^{down}$-$I_{in}^{up}$) تنظیم شود، خروجی می تواند بسته به گذشته در یکی از دو حالت پایدار باشد. در این حالت با یک برانگیختگی خارجی مناسب می تواند از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر سوئیچ شود، در غیر این صورت هم‌چنان در آن حالت باقی می ماند.




شکل (۲-۱): رفتار کلی دوپایداری شدت، شدت خروجی بر حسب شدت ورودی[۱۵].

همان طور که در شکل دیده می شود، شیب منحنی مشخصه برای دوپایداری در نقطه‌های گذار بالا و پایین تغییر علامت می دهد. این واقعیت سبب ایجاد شرطی برای دوپایداری و نقطه‌های گذار می شود. $I_{out}$ یک تابع چند مقداری از $I_{in}$ است، در حالی که $I_{in}$ یک تابع