فیزیک فراماده

صدیقه روستا
دبیر آموزش‌وپرورش ناحیه ۲ شیراز

چکیده

در این مقاله به تعریف اپتیک غیرخطی، فراماده، تعریف ضریب شکست منفی، رابطه مفهوم ضریب شکست مختلف مواد با ثابت دی‌الکتریک منفی، گذردهی مغناطیسی منفی و به کاربرد آن‌ها می‌پردازیم.

کلیدواژه‌ها: فراماده، اپتیک غیرخطی، ضریب شکست منفی، ثابت دی‌الکتریک منفی، گذردهی منفی

مقدمه

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های جدید در ساخت مواد الکترومغناطیسی به جایی رسیده که تولید مواد با ضریب شکست منفی، با گذردهی الکتریکی و مغناطیسی منفی، در گستره‌ای از بسامدها امکان‌پذیر شده است.

ضریب شکست منفی مفاهیم جالب و جدیدی را در فوتونیک باز می‌کند. یک مثال جالب، بحث عدسی کامل است که امکان تصویرسازی با ابعاد زیر طول موج را فراهم می‌کند.

در اینجا به تعریف فراماده، تعریف ضریب شکست، رابطه ماکسول برای آن، مفهوم ضریب شکست مختلط، مواد با ثابت دی‌الکتریک منفی، گذردهی مغناطیسی منفی و ضریب شکست منفی می‌پردازیم.

اپتیک غیرخطی [۱]

اپتیک غیرخطی، یک شاخه از اپتیک است که واکنش‌های غیرخطی از تابش الکترومغناطیسی و محیط را مطالعه می‌کند. واکنش‌های غیرخطی به این معنی است که ماده در یک روند غیرخطی به میدان‌های تابش ورودی پاسخ می‌دهد و به محیط این ویژگی را می‌بخشد که طول موج یا بسامد موج‌های الکترومغناطیسی را تغییر دهد. معمولاً این واکنش غیرخطی تنها در شدت‌های زیاد (میدان الکتریکی) نور دریافتی مشاهده می‌شود. رهاورد چنین واکنش‌هایی بروز آثار جدید متعدد و کشف پدیده‌های نو در زمینه خواص نوری مواد است و اپتیک غیرخطی به مطالعه این آثار جدید و فناوری‌های نوین مربوط به این موضوع می‌پردازد. پدیده‌های اپتیکی غیرخطی با تأثیر بر خواص نوری محیط در حال انتشار خود، قادرند پرتوهای نوری همدوس ویژه‌ای را تولید کنند. امروزه کاربرد پدیده‌های نوری غیرخطی در بلورها و مواد آلی، ساخت ابزارهای نوری متعدد در زمینه‌های اپتیکی، اپتوالکترونیکی و فوتونیکی را نوید می‌دهد. پدیده‌های نوری جالبی نظیر دو یا سه برابرسازی بسامد، تولید بسامدهای مجموع یا تفاضل، تقویت پارامتری، خودکانونی و ... هرکدام موضوع‌هایی قابل توجه و پرکاربرد هستند.

تعریف فراماده

فراماده، مواد غیرمعمول دارای ضریب گذردهی الکتریکی ε و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی μ منفی هستند که به ضریب شکست منفی می‌انجامد.

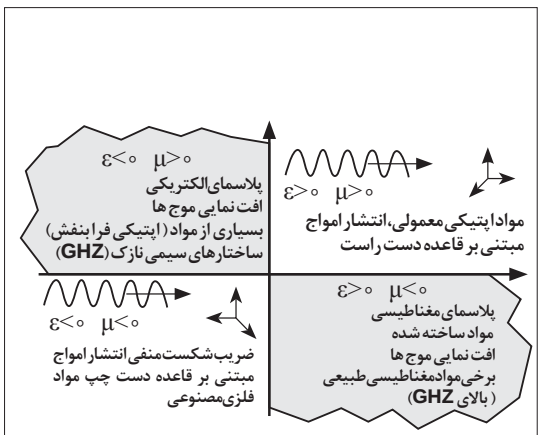
در اپتیک ضریب شکست یک ماده معمولاً به‌صورت $n = \frac{c}{v}$ تعریف می‌شود که در آن c سرعت نور در خلأ و v سرعت موج الکترومغناطیسی تخت در محیط است. با استفاده از معادله‌های ماکسول می‌توان نشان داد که ضریب شکست

یک محیـــط با فرمول $n=\sqrt{\varepsilon\mu}$ به گذردهـــی الکتریکی و مغناطیسی نسبی آن ماده مربوط می‌شود.

در ســـال ۱۹۶۸ میلادی وسلاگو[1] محیطی را در نظر گرفت که گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی آن منفی بود و به این نتیجه رسید که ضریب شکست این محیط نیز باید منفی[2] باشد. (یعنی ریشـــه منفی $n=-\sqrt{\varepsilon\mu}$ باید انتخاب شـــود) اما به علت عدم وجود مواد با ضریب شکســـت منفی توجه زیادی به این مسئله نشد.

در سال‌های اخیر به علت فراهم شدن امکاناتی برای ساخت این مواد (در یک گستره بسامد) کارهای این دانشمند روسی مورد توجه قرار گرفته است.

می‌تـــوان گفت که در نواحی که ε و μ هم علامت هســـتند انتشـــار موج وجود دارد ولـــی در دو ناحیه به علت موهومی شدن بردار موج، انتشار وجود ندارد و فقط افت‌نمایی میدان‌ها را داخل محیط خواهیم داشت.



▲ ساختار مواد معمولی، پلاسمای الکتریکی، پلاسمای مغناطیسی و فرامواد

مسئلهٔ انتشار امواج الکترومغناطیسی در این مواد، اولین بار توسط وسلاگو در سال ۱۹۶۸ به‌طور نظری مورد مطالعه قرار گرفت. طبق معادله‌های ماکســـول، در این مواد، بردار میدان الکتریکی، بردار میدان مغناطیســـی و بردار موج یک دستگاه چپگرد را تشکیل می‌دهند.

جهـــت بردار پویینتینگ[3] و بردار موج مخالف یکدیگرند. به همین دلیل وسلاگو، این مواد را، مواد چپگرد نامید. این مواد دارای ویژگی‌های غیرمعمول هستند و ضریب شکست منفی دارند و این در تضاد با موادی با ضریب شکســـت مثبت است که به آن‌ها مواد راستگرد گویند. مواد چپگرد به‌طور طبیعی وجود ندارند. به‌طور کلی در اپتیک پذیرفته شده است که در بســـامد نوری، آثار مغناطیس ناچیز است و از این‌رو هر نقش ضروری را نمایش نمی‌دهد.

نبود مواد چپگرد در طبیعت باعث تحقق یافتن فناری نانو شده است.

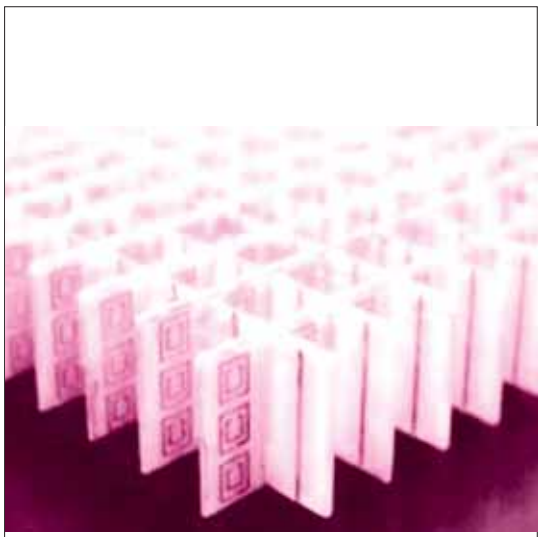
اکثر فلزات در بســـامدهای نوری، گذردهی الکتریکی منفی دارند. اگر الکترون‌های آزاد را در زمینه‌ای از بارهای مثبت را در نظر بگیریم، می‌توان نشـــان داد گذردهی الکتریکی فلز از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\varepsilon(\mu)=1-\frac{\omega_p^2}{\omega(\omega+i\gamma)}$$

در این رابطه $\omega_p=\sqrt{\frac{nc^2}{m\varepsilon\varepsilon_0}}$ بسامد پلاسمای الکتریکی است که برای بیشـــتر فلزات در ناحیه فرابنفش قرار دارد. با توجه به رابطه بالا برای بســـامدهای کمتر از بسامد پلاسما، گذردهی الکتریکی فلز منفی است.

مواد با ضریب شکست منفی [۱]

همان‌طور که قبلاً بیان شد مواد با ε و μ منفی دارای ضریب شکســـت منفی خواهند بود. اســـمیت و همکاران محیطی مرکب از ســـیم‌های فلزی نازک با $\varepsilon<0$ و با $\mu<0$ را پیشنهاد کردند. محاسبه‌ها و آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که برهم‌کنش دو دستگاه به جابه‌جایی بسامد تشدید و افزایش میرایی محیط منجر می‌شود.



▲ یک شبکه فراماده که دارای ضریب شکست منفی است.

قانون اصلاح شـــده اســـنل ـ دکارت در پدیده شکست

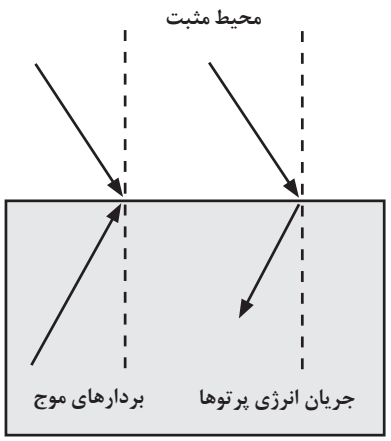
وقتی نور به‌طـــور مایل از محیطـــی وارد محیط دیگری با ضریب شکست متفاوت می‌شود، می‌شـــکند. بنابراین قانون اسنل ـ دکارت اگر زاویه تابش و شکست به ترتیب θ_i, θ_r باشد به‌صورت زیر است:

$$n_i \sin\theta_i = n_r \sin\theta_r$$

پدیده‌های جالب غیرخطی نه‌تنهـــا در درون فراماده اتفاق می‌افتـــد بلکه در ارتباط بین یـــک فراماده با محیط معمولی نیز رخ می‌دهد. این به موج‌های سطحی پایدار اشاره می‌شود و می‌توانـــد در مرز بین یک ماده با ضریب شکســـت منفی و معمولی (ماده با ضریب شکســـت مثبت) رخ می‌دهد. تحت شرایط خاصی، چنین موج‌های سطحی خواصی از موج‌هایی با ضریب شکست منفی را دارند که جریان انرژی با انتشار فاز در خلاف یکدیگرند.

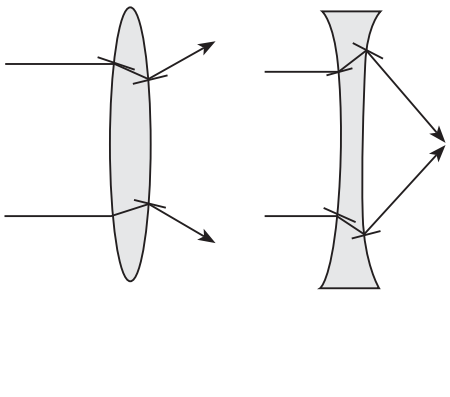
وقتی نور به‌طور مایل از محیطی با ضریب شکســـت مثبت وارد محیطی با ضریب شکست منفی شود، چه اتفاقی می‌افتد؟

با در نظر گرفتن دو موج تخت ورودی و خروجی و نوشـــتن شرایط مرزی در مرز جدایی دو محیط می‌توان نشان داد که در این حالت نیز قانون اســـنل ـ دکارت برقرار اســـت، منفی شدن زاویه شکست بدین معنی است که پرتو در جهت دیگر خط عمود بر مرز دو محیط شکسته می‌شود.



▲ عبور نور در مرز بین دو محیط با ضریب شکست مثبت و منفی

برخی نتایج جالب ناشـــی از منفی شـــدن زاویه شکســـت عبارت‌اند از: اگر ضریب شکســـت آب منفی شـــود، عدســـی محدب نور را واگرا و عدسی مقعر نور را همگرا می‌کند.



▲ اگر ضریب شکســـت آب منفی باشد واگرا بودن عدسی محدب و همگرا بودن عدسی مقعر را نشان می‌دهد

اثر دوپلر معکوس

فرض می‌کنیم چشـــمه نوری با بسامد ω، با سرعت $\vec{V}$ در محیطی با ضریب شکســـت منفی حرکـــت کند. بر طبق اثر دوپلر بسامدی که ناظر ساکن در محیط می‌بیند از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\omega' = (\gamma\,\omega + \vec{K}\vec{V})$$

که در این رابطه $\vec{K}$ بردار انتشار مدی است که از چشمه به سمت ناظر می‌آید و ضریب نسبیتی را می‌توان چنین نوشت:

$$\gamma = (1 - (\frac{v^2}{c^2}))^{-\frac{1}{2}}$$

γ ضریب نسبیتی است. با توجه به اینکه در محیط با ضریب شکســـت منفی بردار انتشار و بردار پویینتینگ خلاف جهت یکدیگر هســـتند بردار انتشار مدی که به سمت ناظر می‌آید منفی اســـت. به عبارت دیگر بســـامد مشـــاهده شده توسط ناظر در محیط با ضریب شکســـت منفی از سوی چشمه‌ای با ســـرعت $\vec{V}$ برابر بسامد مشاهده شده توسط ناظری است که در محیطی با همان ضریب شکست ولی با علامت مثبت قرار دارد و چشمه با سرعت $-\vec{V}$ حرکت می‌کند.

ســـرعت فاز، ســـرعت گروه و انتشار انرژی در محیط با ضریب شکست منفی

از آنجا که بردار انتشـــار موج در محیط با ضریب شکســـت منفی خلاف جهت بردار پویینتینگ اســـت سرعت فاز نیز در این محیط معکوس می‌شـــود، [۱] ولی سرعت انتشار انرژی همچنان در جهت بردار پویینتینگ خواهد بود. می‌توان نشان داد که ســـرعت گروه برای بسته موج با پهنای کم همواره در

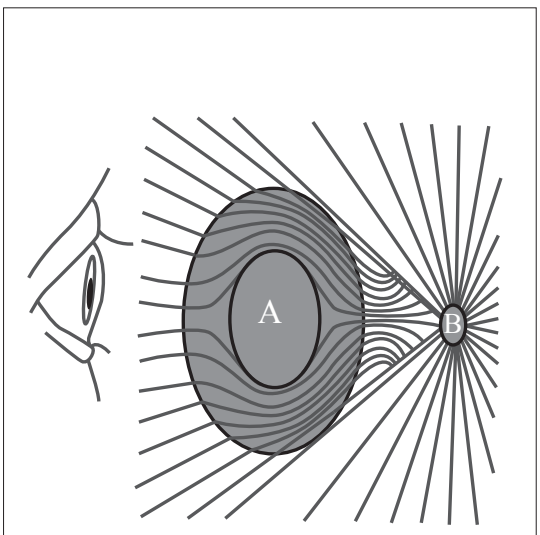
جهت بردار پویینتینگ است. در نتیجه سرعت گروه موج نیز در جهت جریان انرژی در جهت خلاف سرعت فاز خواهد بود.

نامرئی شدن یک شیئی توسط یک فراماده

پژوهشگران آمریکایی و چینی با ساخت یک دستگاه خاص، پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینهٔ نامرئی کردن اشیا انجام داده‌اند و برای اولین بار ثابت کردند که نامرئی کردن امکان‌پذیر است. دیوید اسمیت[۴] از دانشگاه دوک ایالت کارولینای شمالی گفت: ما با استفاده از سراب که در تابستان بر روی جاده‌های بسیار گرم دیده می‌شود متوجه شدیم که امکان نامرئی کردن اشیا وجود دارد. شما از دور آبی را می‌بینید که در جاده وجود دارد اما درواقع این بازتاب آسمان است.

سرابی که می‌بینید جاده را نامرئی می‌کند و به همین شیوه کشف جدید ما یک سراب تولید می‌کند. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد می‌توان به وسیله فراماده‌ها، یک شیء را در میدان الکترومغناطیسی نامرئی کرد.

در سمت چپ شیئی، میدان مغناطیسی آهنربایی را تحت‌تأثیر خود قرار می‌دهد، که شیئی به وسیله آهنربا جذب می‌شود. در سمت راست، اگر شیء به وسیله فراماده پوشانده شود، میدان مغناطیسی بدون تغییر باقی می‌ماند، درست مانند حالتی که شیء وجود ندارد و حتی به طرف آهنربا کشیده نمی‌شود.



نامرئی شدن یک شیء توسط یک فراماده

برخی از کاربردهای اپتیک غیرخطی

بخش قریب به اتفاقی از نتایج تجربی بر روی فراموادی که تاکنون گزارش شده، روی پاسخ خطی از فراماده متمرکز شده است. با این حال آثار غیرخطی در فراموادی یک زمینه نوظهور از مطالعه، در میان فیزیک‌دانان نظری شده است. طیف گسترده‌ای از پدیده‌های غیرخطی در انواع فراموادی به‌ویژه مواد با ضریب شکست منفی به‌طور نظری تا حد قابل توجهی بررسی شده است. موضوع‌های مورد مطالعه شامل رفتارهای کلی برای انتشار موج غیرخطی و همچنین فرایندهای غیرخطی خاص مانند تولید هماهنگ دوم و تقویت پارامتر نوری است.

پاسخ‌های خطی از فراموادی، به‌طور قابل ملاحظه‌ای خواص خطی مواد را که به‌طور طبیعی اتفاق می‌افتند تکمیل می‌کند. مطالعات فراموادی غیرخطی ممکن است تأثیری انقلابی در زمینه‌ای از اپتیک غیرخطی داشته باشد. مطالعاتی از اپتیک غیرخطی به‌طور عمده روی اکتشافات مختلف در فرایندهای مرتبه بالاتر در بلورهای مختلف متمرکز شده است. برای طراحی مواد غیرخطی موجود در فراموادی ناگزیرند که روشی کاملاً جدید، در برهم‌کنش‌های نوری مواد غیرخطی ایجاد کنند.

واکنش‌های غیرخطی به این معنی است که ماده در یک روند غیرخطی به میدان‌های تابش ورودی پاسخ می‌دهد و به محیط این ویژگی را می‌بخشد که طول موج یا بسامد موج‌های الکترومغناطیسی را تغییر دهد

تبدیل یک ماده غیرمغناطیسی به یک آهنربای مصنوعی در دستگاه ام ـ آر ـ آی

یکی از برنامه‌های کاربردی دنیای واقعی برای فراموادی، آهنربای مصنوعی است. پژوهشگران متوجه شدند که تبدیل یک ماده غیرمغناطیسی به یک آهنربای مصنوعی می‌تواند روشی جدید برای ایجاد تصویربرداری تشدیدکننده مغناطیسی شود. این دستگاه با گرم کردن بدن در یک میدان مغناطیسی قوی کار و در گستره ماکروویو نوسان می‌کند. این تغییرات میدان باعث می‌شود هسته‌های اتم‌های هیدروژن داخل بدن به نوسان درآیند و به میدان‌های ضعیف‌تر پاسخ دهند. محافظ الکترونی، پاسخ بسامدی را تغییر می‌دهد و جزئیاتی در مورد هر اتم هیدروژن را معلوم می‌کند. در تصویربرداری تشدید مغناطیسی از یک میدان قوی از مرتبه یک تسلا استفاده می‌شود تا هسته‌های بدن را در یک تراز قرار دهند. سپس یک تپ الکترومغناطیسی در گسترهٔ بسامدی رادیویی آن‌ها را به اندازه کافی برانگیخته می‌کند تا در اطراف میدان اصلی پیش روند. یک فراماده را در میدان متمرکز می‌کنند تا شارمغناطیسی ضعیف را عبور دهد و یک آشکارساز کمک می‌کند که نه‌تنها میدان قوی را آشفته

نکند بلکه با وضوح بالاتری از بدن عکس بگیرد. با به‌کار بردن فراماد با ضریب شکست منفی می‌توان میدان را تغییر داد. در سال ۲۰۰۸ پژوهشگران دریافتند که با استفاده از مواد با ضریب شکست منفی می‌توانند میدان مغناطیسی داخل بدن بیمار را به بیرون گسترش دهند. قطعه‌ای از فراماده روی زانوی بیمار پیچیده می‌شود و اجازه می‌دهد تا تصاویری با وضوح بالاتر بدون نیاز به افزایش میدان استاتیک تولید شود و از خطر ایجاد نقاط روی بدن بیمار جلوگیری کند.

کاربرد فراماد در گستره بسامدی ماکروویو

مطالعات تجربی و تحلیلی از ویژگی فراماد نشان می‌دهد که به خوبی می‌توان در برنامه‌های کاربردی در گستره بسامدی وسیعی از موج‌های رادیویی نامرئی از آن‌ها استفاده کرد. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در کاربرد این مواد در گستره ماکروویو بین ۱ تا ۱۰ گیگاهرتز شده است.

در سال ۱۹۶۸ میلادی وسلاگو محیطی را در نظر گرفت که گذردهی و نفوذپذیری مغناطیسی آن منفی بود و به این نتیجه رسید که ضریب شکست این محیط باید منفی باشد

آنتن‌های فراماد

آنتن‌های فراماد، یک نوع از آنتن‌های رادیویی هستند که از فراماد برای بهبود عملکرد دستگاه آنتن‌ها از آن‌ها استفاده می‌شود. جدیدترین آنتن‌های فراماد بیشتر از ۹۵ درصد از سیگنال ورودی در بسامد رادیویی را تابش می‌کنند. علم مواد با ضریب شکست منفی منطبق با دستگاه‌هایی است که سیگنال الکترومغناطیسی را پخش، انتقال و دریافت می‌کنند. مواد و دستگاه‌هایی که درگیر این کار هستند می‌توانند ویژگی‌های آن‌ها را تغییر یا تشدید کنند. این قبلاً با آنتن‌های فراماد اتفاق افتاده است و به دستگاه‌هایی که به‌طور تجاری در دسترس هستند، مربوط می‌شود.

در ۳۰۰ مگاهرتز به‌عنوان مثال، یک آنتن نیاز به طولی برابر ۱/۵ متر دارد. در مقابل، طول آنتن‌های آزمایشگاهی کوچک‌تر از یک پنجاهم طول موج آن‌هاست و حتی می‌تواند بیشتر از این اندازه کاهش یابد.

فراماد پایه‌ای هستند برای کوچک‌سازی بیشتر آنتن‌هایی که در بسامد ماکروویو به‌کار می‌روند. علاوه بر این در گستره بی‌سیم همچنان پژوهشگران در حال تحقیق هستند.

فراماد تراهرتز [۴]

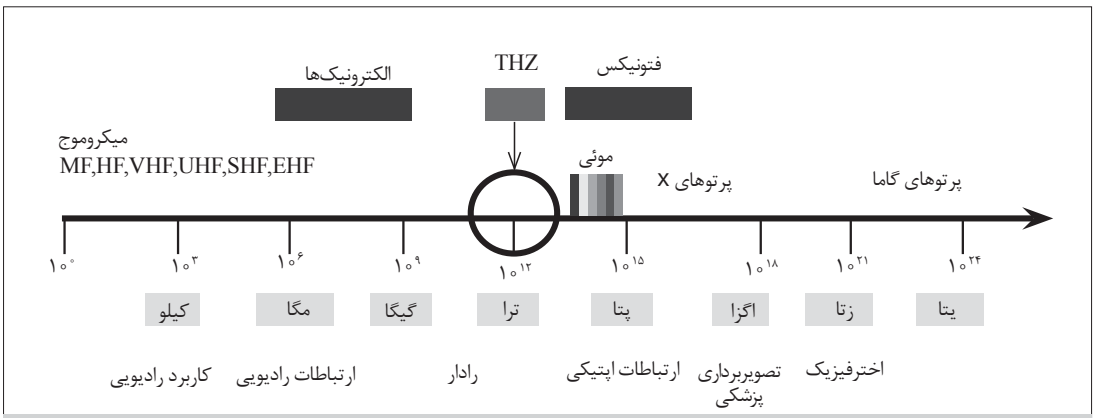
فراماد تراهرتز، فراموادی هستند که در بسامدهای تراهرتز برهم‌کنش می‌کنند. گستره بسامدی برای کاربردها و پژوهش‌ها بین ۰/۱ تا ۱۰ تراهرتز در نظر گرفته می‌شود و با اندازه میلی‌متر منطبق است.

فراماد فوتونیک [۳]

فراماد فوتونیک، فراموادی هستند که به‌طور مصنوعی ساخته شده‌اند و در گستره زیر طول موج به‌کار می‌روند و ساختار آن‌ها طوری طراحی شده که در بسامدهای نوری برهم‌کنش می‌کنند. در گستره بسامد نوری، توسعه اَبَرعدسی‌ها ممکن است امکان تصویربرداری زیر حد پراش نور را بدهند. سایر کاربردهای بالقوه برای مواد با ضریب شکست منفی، مدارهای فناوری نانو، برای تصویربرداری پزشکی و فوتولیتوگرافی در زیر طول موج می‌تواند به‌کار برده شود.

لیزر نقطهٔ کوانتومی

لیزر نقطهٔ کوانتومی، یک لیزر نیمرساناست که از نقطه‌های کوانتومی به‌عنوان محیط فعال لیزر در بخش گسیل نور خود بهره می‌گیرد. به دلیل محدودیت شدید حامل‌های



▲ محدوده بسامدی

بار، نقطه‌های کوانتومی ساختار الکترونی همسان با اتم‌ها از خود نشان می‌دهند. برخلاف لیزرهای حالت جامد و گازی معمولی، لیزرهای نقطه کوانتومی انرژی کمتری مصرف می‌کنند. به تازگی ابزارهایی که بر پایه محیط‌های فعال نقطه‌های کوانتومی هستند مانند چاقوی جراحی لیزری و توموگرافی اپتیکی همدوس کاربردهای تجاری گسترده‌ای در پزشکی یافته‌اند. انتشار نور توسط نقطه‌های کوانتومی در تشخیص پزشکی کاربرهای فراوان دارد. این نقطه‌ها به‌صورت فلوئورسانی عمل می‌کنند با این تفاوت که در برابر درخشان شدن، ویژگی و توانایی خود را از دست نمی‌دهند و در برابر تعداد چرخه‌های انگیزش و انتشار نور مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. اصولاً همه محیط‌های لیزری دارای پذیرفتاری اپتیکی غیرخطی مرتبه سوم هستند یعنی می‌توانند اشباع شوند و جفت‌شدگی فازی از خود نشان دهند. پذیرفتاری اپتیکی غیرخطی در کاربردهای تصویربرداری، محدودسازی اپتیکی فمتوثانیه‌ای اهمیت شایانی دارند. مواد دارای چنین ویژگی‌هایی از راه فوتودینامیکی القایی سه فوتونی تأثیر بسزایی در درمان سرطان دارند. لیزرهای نیمرسانا به دلایل زیر دارای جذابیت فراوان هستند.

۱. هزینه پایین و امکان تولید انبوه آسان
۲. پاسخ سریع زمانی به بازدهی الکتریکی
۳. درخشش بالا
۴. پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم

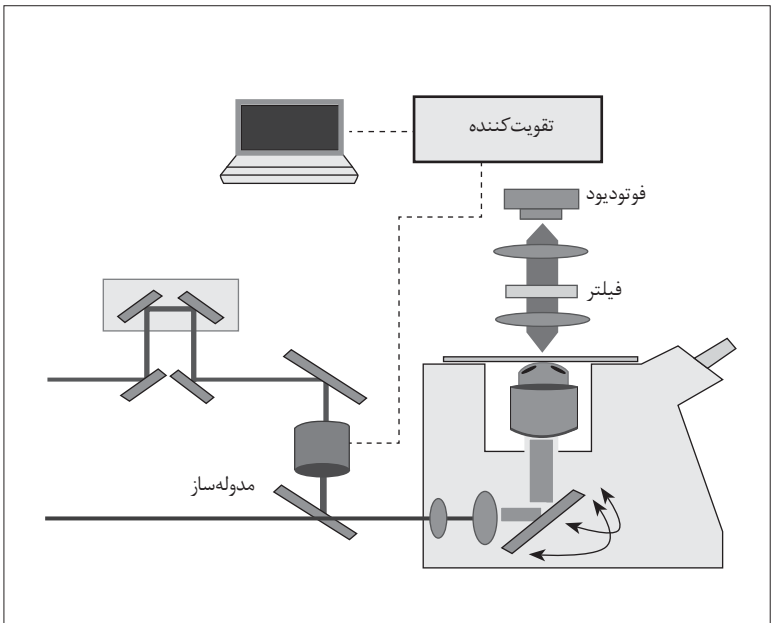
میکروسکوپ نوری غیرخطی

در طول دو دهه گذشته میکروسکوپ نوری غیرخطی به‌عنوان یک رشته مهندسی نوری جدید به سرعت در حال رشد است. این روش در درجه اول با تابش چند فوتون، برانگیخته می‌شود و می‌تواند تصاویری داخل یک نمونه ضخیم را با دقت زیر میکرومتر ارائه دهد. مزیت این میکروسکوپ نوری این است که توانایی حفظ دقت، وضوح و کنتراست بین بافت‌های پراکنده را دارد. یک عیب آن در برنامه‌های کاربردی داخل بدن، بزرگ بودن ابزارهای میکروسکوپی نوری است که مانع تصویربرداری از اندام‌های سالم داخل بدن و حیوانات در حال حرکت می‌شود.

نتیجه‌گیری

اپتیک غیرخطی و فیزیک فراماده و ضریب شکست منفی را تعریف کردیم. قانون اصلاح شده اسنل ـ دکارت را در پدیده شکست و پدیده دوپلر وارون و نامرئی کردن یک شیئی را توسط یک فراماده را بیان کردیم و بعضی از کاربردهای اپتیک غیرخطی را نیز شرح دادیم.

پژوهشگران آمریکایی و چینی با ساخت یک دستگاه خاص، به پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینهٔ نامرئی کردن اشیا رسیده‌اند و برای اولین‌بار ثابت کردند که نامرئی کردن امکان‌پذیر است



میکروسکوپ نوری غیرخطی را نشان می‌دهد.

پی‌نوشت‌ها

1. Veselago
2. negative refractive index
3. Poynting vector
4. David Smith

منابع

1. Alu, A., Salandrino, A., & Engheta, N. (2004), Negative effective permeability and left-handed maerials at optical frequencies. *ArXiv preprint cond-mat*/0412263.
2. Campagnola, P. J., Wei, M. D., Lewis, A., & Loew, L. M. (1999), High-resolution nonlinear optical imaging of live cells by second harmonic generation. *Biophysical journal*, 77(6), 3341-3349.
3. Chettiar, U. K., Kildishev, A. V., Yuan, H. K., Cai, W., Xiao, S., Drachev, V. P., & Shalaev, V. M. (2007, June), Double Negative Index Metamaterial: Simultaneous Negative Permeability and Permittivity at 812 nm. In *Photonic Metamaterials: From Random to Periodic*. Optical Society of America.
4. Fan, K., Strikwerda, A. C., Tao, H., Zhang, X., & Averitt, R. D. (2011), Stand-up magnetic metamaterials at terahertz frequencies. *Opt. Express*, 19(13), 12619-12627.