بررسی خاصیت غیر خطی *SPM* درتقویت کننده نوری نیمه هادی(*SOA*) با نرم افزارمتلب

آرام قادری

دانشجوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کردستان
آرام قادری

Archive of SID

چکیده :
دراین موضوع گردآوری شده که اثرات غیر خطی را در تقویت کننده نوری نیمه هادی*(SOA)* نام برده ایم، به شرح تفصیلی مدولاسیون خودفاز *(SPM)* ونحوه به وجود آمدن و معادلات حاکم برآن پرداخته ایم،که در نهایت به سالیتون های نوری که عبارت اند از جبهه موجهای منزوی خود تقویت کننده رسیده ایم که معادلات را در با نرم افزار متلب شبیه سازی و بررسی نموده ایم و نمودارهای موجود در صفحات با استفاده از متلب *R2014a* بدست آمده اند.

کلید واژه: ، اثرات غیرخطی، تقویت کننده نوری نیمه هادی، سالیتون نوری، *SOA، SPM*

www.SID.ir

مقدمه:

امروزه باتوجه به فراوان شدن کاربرد فرستنده های نوری در علم مخابرات و الکترونیک، اغلب مهندسان و محققان الکترونیک را بر گسترش این تجهیزات واداشته است.
ما هم در این سمینار که قدم اول در جهت حرکت به سوی تکنولوژی های جدید هستیم ابتدا از شبیه سازی مقالات قدیمی و بررسی آثار موجود در تقویت کننده نوری نیمه هادی پرداخته ایم که درنهایت امر به نتایج قابل انتظار و موجود رسیدیم و همچنین در راه حرکت به سمت افق های چشمگیرتری خواهیم بود.

اپتیک غیرخطی[1] *(NLO)*

اپتیک غیرخطی *(NLO)* شاخه‌ای از اپتیک است که رفتار نور درماده غیرخطی را توصیف می‌کند، که در این ماده قطبش دی‌الکتریک P به طور غیرخطی به میدان الکتریکی E نور پاسخ می‌دهد. معمولاً این غیرخطیت فقط در شدت‌های نور بسیار بالا)مقادیر میدان الکتریکی قابل مقایسه با میدان‌های الکتریکی درون اتمی، نوعاً 10^8 ولت بر متر) مانند شدت لیزرهای پالسی مشاهده شده است. انتظار می‌رود که خلأ فراتر از حد شوینگر غیرخطی شود. در اپتیک غیرخطی، اصل برهم‌نهی دیگر اعتبار ندارد.[۱]

فرایندهای غیرخطی

- اثر کر نوری، شدت وابسته به ضریب شکست (اثر X^3)
- خود کانونی، نتیجه اثر کر نوری (و امکان غیرخطبت مرتبه بالاتر) ناشی از تغییرات فضایی شدت که ایجاد کننده تغییرات فضایی در ضریب شکست است
- خود مدولاسیون فازی(SPM)، نتیجه اثر کر نوری (و امکان غیرخطیت مرتبه بالاتر) ناشی از تغییرات زمانی در شدت که ایجاد کننده تغییرات زمانی در ضریب شکست است.
- سالیتون‌های نوری، حالت پایدار برای هر پالس نوری (سالیتون زمانی) یا مد فضایی (سالیتون فضایی) که در زمان انتشار به علت تعادل بین پراش و اثر کر تغییر نمی‌کند
- مدولاسیون عرضی فاز *(XPM)*
- ترکیب چهار موج (FWM^2) ، همچنین می‌تواند از سایر غیرخطیت‌ها ناشی شود
- ناپایداری مدولاسیون

فرایندهای مرتبط

در این فرایندها، ماده دارای پاسخ خطی به نور است، اما خواص ماده متأثر از علل دیگر است:

- اثر پاکلز، ضریب شکست توسط یک میدان الکتریکی ایستا تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ مورد استفاده در مدولاتورهای الکترو- اپتیک؛
- اکوستو- اپتیک، ضریب شکست توسط امواج صوتی) فراصوت) تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ مورد استفاده در مدولاتورهای اکوستو- اپتیک؛
- پراکندگی رامان، برهم‌کنش فوتون‌ها با فونونهای نوری؛[۱]

اثر کر

اثر کر، همچنین اثر الکترواپتیکی درجه دوم اثر (QEO^3) نامیده می‌شود، که تغییر ضریب شکست ماده در پاسخ به یک میدان الکتریکی اعمال شده می‌باشد. اثر کر متمایز از اثر پاکلز می‌باشد که آن متناسب با مجذور میدان الکتریکی می‌باشد (به جای تغییر خطی با میدان). همه مواد اثر کر را از خود نشان می‌دهند. اثر کر در سال ۱۸۷۵ توسط جان کر فیزیکدان اسکاتلندی، کشف شد .دو مورد ویژه از اثر کر معمولاً در نظر گرفته می‌شود، که عبارتند از اثر کر الکترواپتیکی یا اثر کرDC ، واثر کر اپتیکی یا اثر کر AC. [۲]

اثر کر اپتیکی

اثر کر اپتیکی یا اثر کرAC ، اثری است که در آن میدان الکتریکی به علت وجود خود نور است. این باعث یک تغییر در ضریب شکست که متناسب با تابندگی مکانی نور است. این تغییر در ضریب شکست مسئول اثرات اپتیکی غیر خطی خود کانونی، مدولاسیون خود فازی و ناپایداری مدولاسیونی و نیز اساسی برای مدلاکینگ لنزهای کر می‌باشد. این اثر تنها با پرتوهای خیلی شدید، مانند پرتوهای لیزری، قابل توجه خواهد بود. [۲]
در اثر کر اپتیکی یا AC ، یک پرتو شدید نور در محیط می‌تواند میدان الکتریکی مدوله کننده را فراهم می‌کند، بدون نیاز به اینکه یک میدان خارجی به کار رود. در این مورد میدان الکتریکی به صورت زیر است:
که E_ω دامنه موج می‌باشد.

$E = E_w \cos(wt)$ معادله ۱.

ترکیب این با معادله قطبش و برداشتن تنها عبارت‌های خطی و عبارت‌های شامل:

$\mathcal{X}^{(3)} |E_w|^2$ معادله ۲.

$P \cong \varepsilon 0 \left(\chi^{(1)} + \frac{3}{4} \chi^{(3)} |E_w|^2\right) E_w \cos(wt)$ معادله ۳.

مثل قبل این یک پذیرفتاری خطی با عبارت غیر خطی اضافی می‌باشد:

$\chi = \chi LIN + \chi NL = \chi^{(1)} + \frac{3}{4} \chi^{(3)}$ معادله ۴.

از آنجاییکه:

$n = (1 + X)^{1/2} = (1 + \chi LIN + \chi NL)^{1/2} \cong n_0 \left(1 + \frac{1}{2n_0^2} \chi NL\right)$ معادله ۵.

[1] Nonlinear optic
[2] Four Wave Mixing
[3] quadratic electro-optic effect

Archive of SID
www.SID.ir

که $n_0 = (1 + X_{LIN})^{1/2}$ ضریب شکست خطی است. با استفاده از یک بسط تیلور $Xnl \ll n^2{}_0$،
این یک شدت وابسته به ضریب شکست را می‌دهد:

$n = n_0 + \frac{3\chi^{(3)}}{8n_0}|E_w|^2 = n_0 + n_2 I$ معادله ۶

که n2ضریب شکست غیرخطی مرتبه دوم است و I شدت موج می‌باشد. مقادیر ۲n نسبتاً کوچک برای بیشتر موارد می‌باشد، برای شیشه‌ها نوعاً از مرتبه منفی ۲۰ است. بنابراین شدت‌های پرتو (مانند آنچه که لیزرها تولید می‌شود) برای تولید تغییرات قابل توجه در ضریب شکست از طریق اثر کر AC ضروری هستند. اثر کر اپتیکی خودش را به صورت مدولاسیون خودفازی، فاز خودالقایی و انتقال فرکانس یک پالس نوری زمانیکه آن از میان یک محیط حرکت می‌کند نشان می‌دهد. این فرایند، در امتداد پراکندگی می‌تواند سالیتون‌های اپتیکی را تولید کند. از نظر فضایی، یک پرتو شدید نور در یک محیط، یک تغییر در ضریب شکست محیط را تولید خواهد کرد که الگوی شدت عرضی پرتو را تقلید خواهد کرد. برای نمونه، یک پرتو گوسی در نتیجه یک پروفایل ضریب شکست گوسین، شبیه به لنزهای با ضریب شکست متغیر می‌باشد. این باعث می‌شود تا پرتو خودش را متمرکز کند که این پدیده، خود کانونی نامیده می‌شود.[۲]

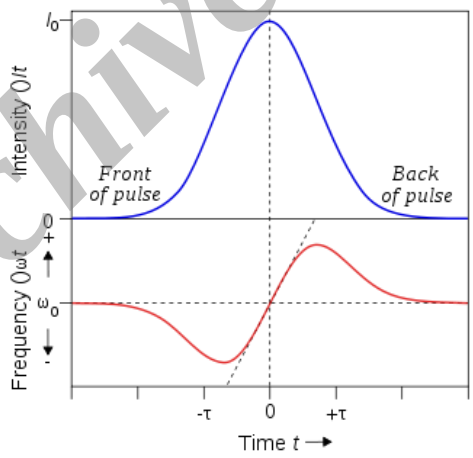
مدولاسیون خود فازی (SPM)[1]

مدولاسیون خود فازی (SPM) اثرغیر خطی اپتیکی از برهمکنش نور با ماده است. پالس فوق کوتاه نور، با انتشار درمحیط، بواسطه اثراپتیکی کر، موجب تغییرضریب شکست محیط می‌گردد .این تغییرات ضریب شکست، با ایجاد شیفت فازی درپالس منجربه تغییرات طیف فرکانسی می‌گردد.

این پدیده در اثر برهمکنش پالس تند تغییر و وابسته به زمان با ضریب شکست وابسته به شدت ماده ی اپتیکی غیر خطی روی می دهد . با این روش پهنای باند فرکانسی اضافی به پالس در حال انتشار درون محیط غیر خطی اضافه شده و با افزایش پهنای فرکانسی ، طبق اصل عدم قطعیت پهنای زمانی پالس کم می شود . اگر شدت عبوری از محیط I باشد ، در این صورت ضریب شکست وابسته به شدت محیط غیر خطی خواهد بود:

$n = n_0 + n_2 I$ معادله ۷.

که در آن n_0 ضریب شکست عادی محیط بوده که با فرکانس تغییر می کند و n_2 هم ضریب شکست وابسته به شدت است . توجه کنید که n_2کمیتی بی بعد مانند ضریب شکست عادی نیست ، بلکه آن با شدت پالس ضرب شده تا یک کمیت بی بعد به وجود آورد . وقتی پالس از یک چنین محیطی عبور می کند ، شدت در قسمت جلویی پالس که رو به افزایش است ، در صورتی که n_2 مثبت باشد ، ضریب شکست رو به افزایشی خواهد دید و بدین ترتیب سرعت آن رو به کاهش خواهد رفت و تعداد مولفه های فرکانسی کمتری در یک زمان معین می توانند فاصله ی معینی را طی کنند و به این ترتیب قسمت جلویی پالس دچار یک شیفت فرکانسی به فرکانس های پایین تر شده و اصطلاحاً جلوی پالس قرمز می شود . مطابق با تحلیل فوق قسمت پشتی پالس که شدت آن رو به کاهش است ، ضریب شکست رو به افتی را خواهد دید و بدین ترتیب سرعت آن رو به فزونی می گذارد و تعداد مولفه های فرکانسی بیشتری در یک زمان معین فاصله ی معینی را طی می کنند و به این صورت قسمت پشتی پالس دچار یک شیفت فرکانسی به فرکانس های بیشتر شده و به اصطلاح آبی می شود .(به این پدیده چریپ فرکانسی)[2]می گویند. [۳]



شکل ۱- تصویر چریپ فرکانسی [۳]

مدولاسیون خودفازی اثری مهم در سیستم‌های اپتیکی که در آن از پالس‌های نوری کوتاه وشدیداستفاده می‌شود، دارد مانند لیزرها و سیستم‌های ارتباطاتی فیبرنوری.
برای پالس‌های فوق کوتاه گوسی شکل با فاز ثابت، شدت در زمانt با I(t) داده می‌شود:

$I(t) = I_0 exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right)$ معادله ۸.

که در آنI ۰ شدت قله و τ نصف دوره تناوب است. با انتشار پالس در محیط، اثراپتیکی کر، ضریب شکست متغیر باشدت تولید می‌کند:

$n(I) = n_0 + n_2 I$ معادله ۹.

که n۰ ضریب شکست خطی و n2 ضریب شکست مرتبه دوم غیرخطی محیط می‌باشد. هنگامی که پالس منتشر می‌شود، شدت در هر نقطه از محیط افزایش می یابدوسپس با پیشروی پالس افت می‌کند، که منجر به تغییر ضریب شکست متغیر با زمان می‌گردد:

[1] Self Phase Modulation
[2] frequency chirping

Archive of SID
www.SID.ir

$\frac{dn(I)}{dt} = n_2 \frac{dI}{dt} = n_2 . \mathrm{I}_0 . \frac{-2t}{\tau^2} . exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right)$ معادله ۱۰.

این تغییرات ضریب شکست باعث شیفت لحظه‌ای پالس خواهد شد:

$\phi(t) = \omega_0 t - kx = \omega_0 t - \frac{2\pi}{\lambda_0}$ معادله ۱۱.

که و فرکانس حامل و طول موج) خلا) پالس و فاصله ایست که پالس در آن منتشر می‌شود. شیفت فازی منجربه شیفت فرکانسی پالس می‌گردد. فرکانس لحظه‌ای ω(t) توسط رابطه زیر بیان می‌گردد:

$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \omega_0 - \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{dn(I)}{dt}$ معادله ۱۲.

وازdn/dtکه در بالا داشتیم به معادله زیرمی رسیم:

$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \omega_0 + \frac{4\pi L n_2 I_0}{\lambda_0 \tau^2} . t . exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right)$ معادله ۱۳.

نمودار ω(t) جابجایی هر قسمت از پالس را نشان می‌دهد. لبه جلویی به سمت فرکانس‌های پایین تر (قرمزتر) ولبه عقبی به سمت فرکانس‌های بالاتر (آبی تر) جابجا می‌شود، اما قله پالس تغییر مکان نمی‌دهد. برای محدوده فرکانس مرکزی($t = \pm\tau/2$) ، یک تقریب جابجایی فرکانسی خطی توسط رابطه زیر داده می‌شود:

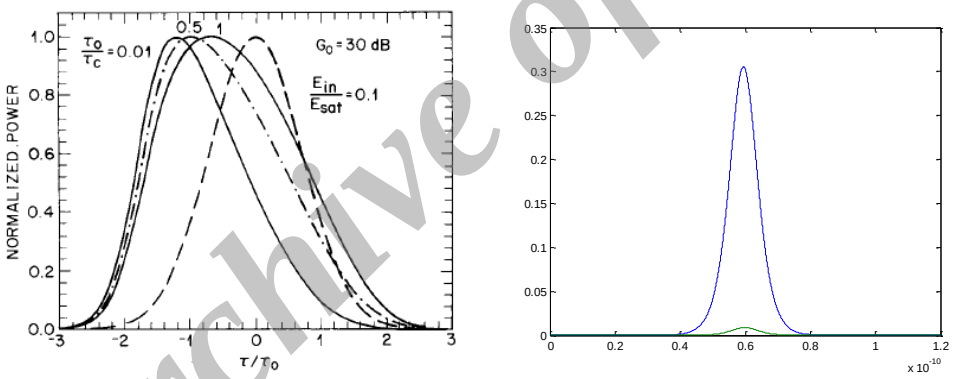
$\omega(t) = \omega_0 + \alpha . t$ معادله ۱۴.

که درآن:α

$\alpha = \left.\frac{d\omega}{dt}\right|_0 = \frac{4\pi L n_2 I_0}{\lambda_0 \tau^2}$ معادله ۱۵.

واضح است که فرکانس اضافی که در *SPM* تولید می‌شود، طیف فرکانسی پالس را بطور متقارن پهن می‌کند. در حوزه زمان، پوش پالس تغییر نمی‌کند، اگرچه در هر محیط حقیقی، اثرات پالس بطور همزمان روی پالس عمل می‌کند. درمحدوده پاشندگی نرمال، نواحی فرکانس پایین نسبت به نواحی فرکانس بالاسرعت بیشتری دارد در نتیجه بخش جلویی پالس سریعتر از عقب آن حرکت می‌کند، واین همان پهن شدگی پالس در زمان است. در محدوده پاشندگی غیرنرمال، عکس حالت قبل رخ می‌دهد، یعنی پالس با انتشارش در زمان، کوچکتر می‌شود. از این اثر برای پالس‌های فشرده فوق کوتاه بهره گرفته می‌شود. [۳, ۴]

آنالیزهای مشابهی برای اشکال مختلف پالسی انجام می‌گیرد بطور مثال نمودار پالسیsech ۲،که توسط لیزرهای پالسی فوق کوتاه تولید می‌شود. اگر پالس به قدرکافی شدت داشته باشد، روندپهن شدگی طیفی *SPM* بافشرده شدن زمانی، که بواسطه پاشندگی غیر نرمال ایجاد شده بود، به تعادل می‌رسد، که پالس نهایی تولید شده سالیتون نوری نامیده می‌شود. که خروجی تقویت شده ما در متلب به صورت زیر است:



شکل ۲- شکل سمت راست موج تقویت شده بدون اختلاف فاز و اثرات غیر خطی، شکل سمت چپ شکل موج تقویت شده همرا با اختلاف فاز به صورت نرمال شده[۵]

معادله موج در مواد غیرخطی

منشأیی برای مطالعه امواج الکترومغناطیس معادله موج است. با شروع از معادلات ماکسول در فضای همسانگرد بدون بار آزاد، می‌توان نشان داد که:

$\nabla \times \nabla \times E + \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E = -\frac{1}{\varepsilon_0 c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} P^{NL}$ معادله ۱.

که P^{NL}بخش غیرخطی چگالی قطبش است و n ضریب شکست ناشی از ترم خطی در Pاست.

توجه داشته باشید که معمولاً می‌توان با استفاده از بردار یکانی

$\nabla \times (\nabla \times V) = \nabla(\nabla . V) = -\nabla^2 V$ معادله ۲.

و قانون گاوس

$\nabla . \mathrm{D} = 0$

برای به‌دست آوردن معادله موج آشناتر

$\nabla^2 E - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E = 0$ معادله ۳.

در حالت کلی، برای محیط غیرخطی قانون گاوس به صورت زیر

$\nabla . \mathrm{E} = 0$ معادله ۴.

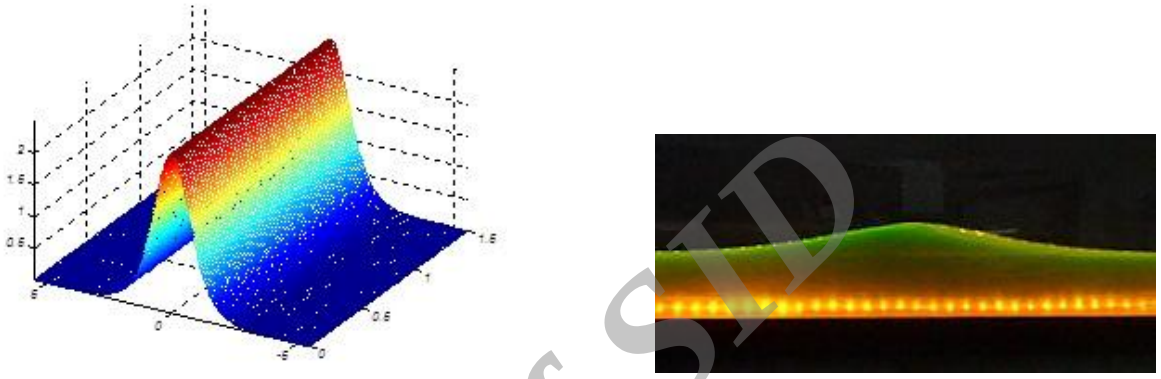
حتی برای ماده همسانگرد درست نمی‌باشد. اگرچه در صورتی که این ترم عیناً صفر نیست، اغلب بسیار کوچک است و بنابراین معمولاً با صرف نظر کردن آن، معادله موج غیرخطی استاندارد به صورت زیر بیان می‌شود: [۴]

Archive of SID
www.SID.ir

$$\nabla^2 E - \frac{n^2}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}E = \frac{1}{\varepsilon_0 c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}P^{NL}$$ معادله ۵.

سالیتون

سالیتون در ریاضیات و فیزیک، یک موج منزوی خود-تقویت کننده (یک بسته موج یا پالس) است که وقتی با سرعت ثابت حرکت می‌کند شکلش را حفظ می‌کند. سالیتون‌ها در نتیجه‌ی خنثی‌سازی آثار غیرخطی و پاشندگی در محیط حاصل می‌شوند. «آثار پاشندگی» به رابطه پراش بین فرکانس و سرعت امواج برمی‌گردند. سالیتون‌ها به عنوان جوابهای دسته‌ی گسترده‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی بطور ضعیف غیرخطی پاشنده ناشی می‌شوند که سیستمهای فیزیکی را توصیف می‌کنند. پدیده‌ی سالیتونی اولین بار توسط جان اسکات راسل (۱۸۸۲-۱۸۰۸م) توصیف شد. او یک موج سالیتوری را در کانال مشترک در اسکاتلند مشاهده کرد و این پدیده را در یک مخزن موج بازسازی کرد و آن را موج انتقال نامید. به عبارتی دیگر سالیتون به دسته‌ی خاصی از جوابهای موضعی یک معادله غیرخطی موج گفته می‌شود که با شکل، ارتفاع، و سرعت ثابت به پیشروی و انتشار در محیط ادامه می‌دهند. البته توافق عام بر سر تعریف سالیتون وجود ندارد و درمنابع مختلف سالیتون را به صورت‌های متفاوت تعریف می‌کنند. [۶] [۴]



شکل ۳- شکل سمت راست موج سالیتوری در یک کانال موج آزمایشگاهی، شکل سمت چپ شبیه سازی سالیتون نوری در متلب[۶]

نتیجه گیری

مدولاسیون خودفازی کاربردهای وسیعی درزمینه پالس فوق کوتاه دارد که به صورت مختصر عبارتند از: پهن شدگی طیفی وابرپیوستار، فشرده سازی زمانی پالس، فشرده سازی طیفی پالس. اثرغیرخطی ویژگی اصلی مفیدی برای تکنیک‌های پردازش نوری مختلف مثل احیا اپتیکی ویا تبدیل طول موج دارد.

منابع و مراجع

[1] Y.-R. Shen, *The Principles of Nonlinear Optics*: wikipedia, 2002.
[2] P. Weinberger, "John Kerr and his Effects Found in 1877 and 1878," *Philosophical Magazine Letters* vol. 88 (12), pp. 897–907, 2008.
[3] Wikipedia. (2014). *Self-phase modulation*. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Self-phase_modulation
[4] R. Boyd, *Nonlinear Optics*: Academic Press, 2008.
[5] G. P. AGRAWAL, "Self-Phase Modulation and Spectral Broadening of Optical Pulses in Semiconductor Laser Amplifiers," *IEEE JOURNAL. OF QUANTUM ELECTRONICS.,* vol. 25, pp. 2297-2306, 1989.
[6] Wikipedia. (2014). *Soliton*. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Soliton

Archive of SID

www.SID.ir