



بررسی خاصیت غیر خطی SPM در تقویت کننده نوری نیمه هادی (SOA) با

نرم افزار متلب

آرام قادری

دانشجوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کردستان
آرام قادری

چکیده :

در این 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 بر آن 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 غیر خطی، تقویت کننده نوری نیمه هادی، سالیتون نوری، SPM SOA

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^۱ (NLO)

اپتیک غیرخطی (NLO) شاخه ای از اپتیک است که رفتار نور در ماده غیرخطی را توصیف می کند، که در این ماده قطبش دی الکتریک P به طور غیرخطی به میدان الکتریکی E نور پاسخ می دهد. معمولاً این غیرخطیت فقط در شدت های نور بسیار بالا (مقادیر میدان الکتریکی قابل مقایسه با میدان های الکتریکی درون اتمی، نوعاً 10^8 ولت بر متر) مانند شدت لیزرهای پالسی مشاهده شده است. انتظار می رود که خلأ فراتر از حد شوینگر غیرخطی شود. در اپتیک غیرخطی، اصل برهم نهی 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 غیرخطیت 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.
- سالیوتون های نوری، حالت پایدار برای هر پالس نوری (سالیوتون زمانی) یا مد فضایی (سالیوتون فضایی) که در زمان انتشار به علت تعادل بین پراش و اثر کر تغییر نمی کند
- مدولاسیون عرضی فاز (XPM)
- ترکیب چهار موج (FWM^2)، همچنین می تواند از سایر غیرخطیت ها ناشی شود
- ناپایداری مدولاسیون

فرایندهای مرتبط

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

- اثر پاکلز، ضریب شکست توسط یک میدان الکتریکی ایستا تحت تأثیر قرار می گیرد؛ مورد استفاده در مدولاتورهای الکترو-اپتیک؛
- اکوستو-اپتیک، ضریب شکست توسط امواج صوتی (فراصوت) تحت تأثیر قرار می گیرد؛ مورد استفاده در مدولاتورهای اکوستو-اپتیک؛
- پراکندگی رامان، برهم کنش فوتون ها با فونونهای نوری؛ [۱]

اثر کر

اثر کر، همچنین اثر الکترواپتیکی درجه دوم اثر (QEO^2) نامیده می شود، که تغییر ضریب شکست ماده در پاسخ به یک میدان الکتریکی اعمال شده می باشد. اثر کر متمایز از اثر پاکلز می باشد که آن متناسب با مجذور میدان الکتریکی می باشد (به جای تغییر خطی با میدان). همه مواد اثر کر را از خود نشان می دهند. اثر کر در سال ۱۸۷۵ توسط جان کر فیزیکدان اسکاتلندی، کشف شد. دو مورد ویژه از اثر کر معمولاً در نظر گرفته می شود، که عبارتند از اثر کر الکترواپتیکی یا اثر کر DC، و اثر کر اپتیکی یا اثر کر AC. [۲]

اثر کر اپتیکی

اثر کر اپتیکی یا اثر کر AC، 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 می باشد. 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 می تواند میدان الکتریکی مدوله کننده را فراهم می کند، بدون نیاز به اینکه یک میدان خارجی به کار رود. در این مورد میدان الکتریکی به صورت زیر است:

که E_{ω} دامنه موج می باشد.

$$E = E_{\omega} \cos(\omega t) \quad \text{معادله ۱.}$$

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

$$\chi^{(3)} |E_{\omega}|^2 \quad \text{معادله ۲.}$$

$$P \cong \epsilon_0 \left(\chi^{(1)} + \frac{3}{4} \chi^{(3)} |E_{\omega}|^2 \right) E_{\omega} \cos(\omega t) \quad \text{معادله ۳.}$$

مثل قبل این یک پذیرفتاری خطی با عبارت غیر خطی اضافی می باشد:

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

از آنجاییکه:

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

¹ Nonlinear optic

² Four Wave Mixing

³ quadratic electro-optic effect

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

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

که n_2 ضریب شکست غیرخطی مرتبه دوم است و I شدت موج می‌باشد. مقادیر n_1 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]

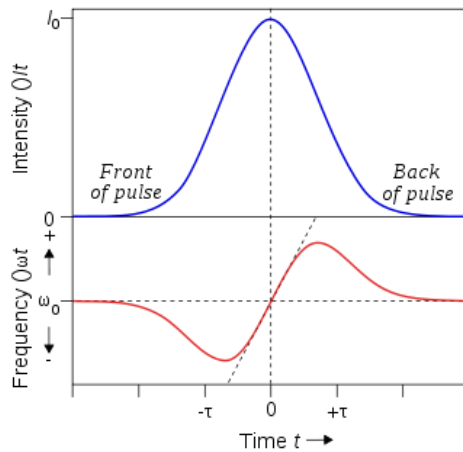
مدولاسیون خود فازی (SPM)

مدولاسیون خود فازی (SPM) اثر غیر خطی اپتیکی از برهمکنش نور با ماده است. پالس فوق کوتاه نور، با انتشار در محیط، بواسطه اثر اپتیکی کر، موجب تغییر ضریب شکست محیط می‌گردد. این تغییرات ضریب شکست، با ایجاد شیفت فازی در پالس منجر به 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 می‌دهد. 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 می‌شود. اگر شدت عبوری از محیط I باشد، در این صورت ضریب شکست وابسته به شدت محیط غیر خطی خواهد بود:

$$n = n_0 + n_2 I \quad \text{معادله ۷}$$

که در آن n_0 ضریب شکست عادی محیط بوده که با فرکانس تغییر می‌کند و n_2 هم ضریب شکست وابسته به شدت است. توجه کنید که n_2 کمیتی 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 می‌کند، 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 می‌توانند 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 می‌شود. 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 می‌گذارد و تعداد مولفه های فرکانسی بیشتری در یک زمان معین فاصله ی معینی را طی می‌کنند و به این صورت قسمت پشتی پالس دچار یک شیفت فرکانسی به فرکانس های بیشتر شده و به اصطلاح آبی می‌شود. (به این پدیده چریپ فرکانسی) می‌گویند. [۳]



شکل ۱- تصویر چریپ فرکانسی [۳]

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

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

که در آن I_0 شدت قله و τ نصف دوره تناوب است. با انتشار پالس در محیط، اثر اپتیکی کر، ضریب شکست متغیر باشد تولید می‌کند:

$$n(I) = n_0 + n_2 I \quad \text{معادله ۹}$$

که n_1 ضریب شکست خطی و n_2 ضریب شکست مرتبه دوم غیرخطی محیط می‌باشد. هنگامی که پالس منتشر می‌شود، شدت در هر نقطه از محیط افزایش می‌یابد و سپس با پیشروی پالس افت می‌کند، که منجر به تغییر ضریب شکست متغیر با زمان می‌گردد:

¹ Self Phase Modulation

² frequency chirping

$$\frac{dn(t)}{dt} = n_z \frac{dl}{dt} = n_z \cdot I_0 \cdot \frac{-2t}{\tau^2} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \quad \text{معادله ۱۰.}$$

این تغییرات ضریب شکست باعث شیفت لحظه‌ای پالس خواهد شد:

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

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

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

واز dn/dt که در بالا داشتیم به معادله زیر می‌رسیم:

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \omega_0 + \frac{4\pi L n_2 l_0}{\lambda_0 \tau^2} \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \quad \text{معادله ۱۳.}$$

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

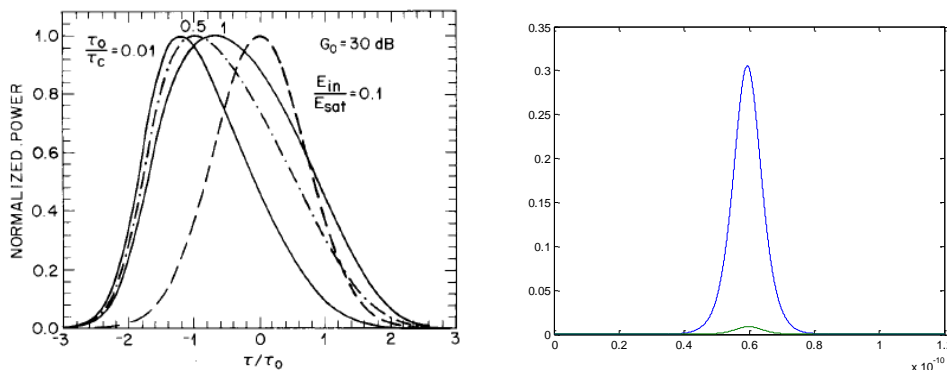
$$\omega(t) = \omega_0 + \alpha \cdot t \quad \text{معادله ۱۴.}$$

که در آن α :

$$\alpha = \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_0 = \frac{4\pi L n_2 l_0}{\lambda_0 \tau^2} \quad \text{معادله ۱۵.}$$

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. در محدوده پاشندگی نرمال، نواحی فرکانس پایین نسبت به نواحی فرکانس بالا سرعت بیشتری دارد در نتیجه بخش جلویی پالس سریعتر از عقب آن حرکت می‌کند، و این همان پهن شدن 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 پالسی sech^2 ، که توسط لیزرهای پالسی فوق کوتاه تولید می‌شود. اگر پالس به قدر کافی شدت داشته باشد، روند پهن شدن پالسی *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 همراه 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:

$$\nabla \times \nabla \times E + \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 P^{NL}}{\partial t^2} \quad \text{معادله ۱.}$$

که P^{NL} بخش غیرخطی چگالی قطبش است و n ضریب شکست ناشی از ترم خطی در P است. توجه داشته باشید که معمولاً می‌توان با استفاده از بردار یکانی

$$\nabla \times (\nabla \times V) = \nabla(\nabla \cdot V) - \nabla^2 V \quad \text{معادله ۲.}$$

و قانون گاوس

$$\nabla \cdot D = 0$$

برای به دست آوردن معادله موج آشنا تر

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

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

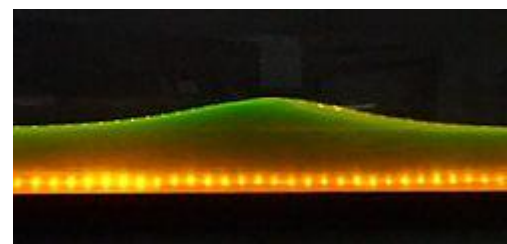
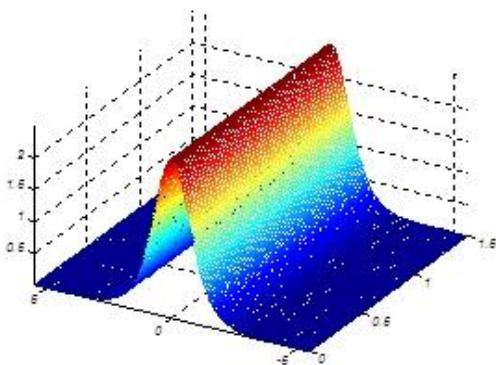
$$\nabla \cdot E = 0 \quad \text{معادله ۴.}$$

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]

$$\nabla^2 E - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 P_{NL}}{\partial t^2} \quad \text{معادله ۵.}$$

سالیتون

سالیتون در ریاضیات و فیزیک، یک موج منزوی خود-تقویت کننده (یک بسته موج یا پالس) است که وقتی با سرعت ثابت حرکت می کند شکلش را حفظ می کند. سالیتون ها در نتیجه ی خنثی سازی آثار غیرخطی و پاشندگی در محیط حاصل می شوند. «آثار پاشندگی» به رابطه پراش بین فرکانس و سرعت امواج برمی گردند. سالیتون ها به عنوان جوابهای دسته ی گسترده ای از معادلات دیفرانسیل جزئی بطور ضعیف غیرخطی پاشنده ناشی می شوند که سیستمهای فیزیکی را توصیف می کنند. پدیده ی سالیتونی اولین بار توسط جان اسکات راسل (۱۸۰۸-۱۸۸۲م) 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 دسته ی خاصی از جوابهای موضعی یک معادله غیرخطی موج گفته می شود که با شکل، ارتفاع، و سرعت ثابت به پیشروی و انتشار در محیط ادامه می دهند. البته توافق عام بر سر تعریف سالیتون وجود ندارد و در منابع مختلف سالیتون را به صورت های متفاوت تعریف می کنند. [۴] [۶]



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 در زمینه پالس فوق کوتاه دارد که به صورت مختصر عبارتند از: پهن شدگی طیفی و ابرپیوستار، فشردگی زمانی پالس، فشردگی سازی طیفی پالس. اثر غیرخطی ویژگی اصلی مفیدی برای تکنیک های پردازش نوری مختلف مثل احیا اپتیکی و یا 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>