

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

تعیین مقدار اختلاف فاز موثر پالس نوری عبور کرده از محیطی با اثر غیر خطی کر

سمیرا نظیف کار

دانشگاه نیشابور

چکیده

این تحقیق درباره یکی از اثرات ماده غیر خطی بر روی پالس‌های الکترومغناطیسی به نام اثر غیر خطی کر (Nonlinear Kerr effect) می‌باشد و برهمکنش بین یک پالس لیزری بسیار باریک گوسی شکل و محیط غیر خطی با ضریب شکست مرتبه دو بررسی می‌شود. جواب تحلیلی نشان می‌دهد در انتهای محیط غیر خطی دامنه و پهنا پالس تغییر می‌کند، دچار اختلاف فازی می‌شود که تابع زمان است و بعضی قسمت‌های باز و بعضی قسمت‌های آن فشرده می‌شود.

در این مقاله به اثرات غیر خطی کر بر روی یک پالس نوری گوسی می‌پردازیم. همین طور که می‌دانیم در مبحث محاسبات کوانتومی یک نوع کیوبیت که مقبولیت خاصی دارد فوتون‌ها هستند. نمونه‌ای از گیت‌ها گیت فاز (Phase gate) است که به کیوبیت ورودی توسط مواد غیر خطی اختلاف فاز دلخواه اعمال می‌کند. به نظر می‌آید که مواد با اثر غیر خطی "کر" می‌توانند این فرآیند را بر روی پالس ورودی داشته باشند [۶-۱]. اگر یک محیط غیر خطی داشته باشیم که تقارن وارونی یا به عبارت دیگر مرکز تقارن داشته باشد، اولین جمله غیر خطی قطبش ماده $P^{(3)}(\mathbf{r}, \omega)$ است [۷]. این نوع برهمکنش پالس نوری با محیط غیر خطی مرتبه سوم را مدولا سین خود فازی گفته می‌شود. طی این فرآیند نور خروجی دچار یک اختلاف فاز می‌شود که در ادامه مقدار فاز دریافتی محاسبه می‌شود. اگر ماده غیر خطی جهت پلاریزه را حفظ کند و میدان الکتریکی نور فرودی قطبیده خطی در یک راستی خاص باشد.

$$P^{(3)}(\mathbf{r}, \omega = \omega - \omega + \omega) = \frac{3}{4} \epsilon_0 \chi^{(3)} |E(\mathbf{r}, \omega)|^2 E(\mathbf{r}, \omega) \quad (1)$$

با تعریف $n_1 = \sqrt{1 + \chi^{(1)}}$ ضریب شکست خطی ماده و $n_2 = \frac{3\chi^{(3)}}{8n_1}$ ضریب شکست مرتبه دوم یا ضریب شکست غیر خطی یا ضریب کراپتیکی (optical Kerr coefficient) ضریب شکست محیط غیر خطی مرتبه دوم به شکل زیر خواهد بود:

$$n(\omega) = n_1 + n_2 |E^+(\mathbf{r}, \omega)|^2 \quad (2)$$

اگر پالس از محیطی با اثر کر به طول L عبور کند، اختلاف فاز پالس به علت اثر کر برابر است با:

$$\Delta\varphi(t) = \varphi^{(0)} + \varphi^{(1)}t + \varphi^{(2)}t^2 \quad (3)$$

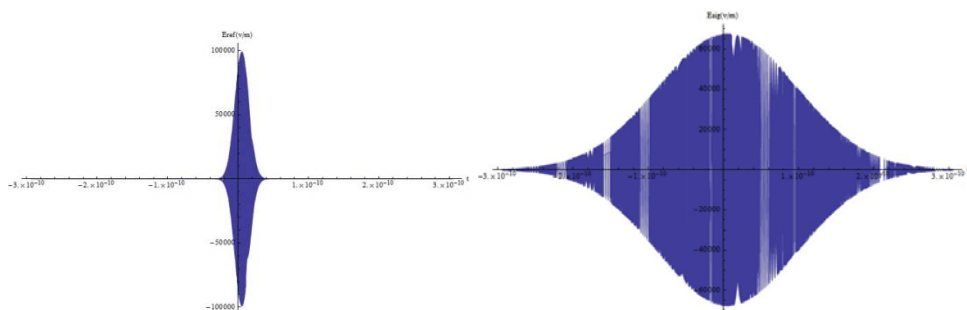
که در آن ضرائب به شکل زیر تابعی از خواص محیط غیر خطی و پالس ورودی می‌باشند:

$$\varphi^{(0)} = \frac{\omega_0}{c} n_2 E_0^2 L - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\omega_0 n_2 E_0^2 L}{c} \right) + \frac{\omega_0 n_2 E_0^2 L^3 (n_1 + n_2 E_0^2)^2}{c\sigma (c^2 + (2\omega_0 n_2 E_0^2 L)^2)} \quad (4)$$

$$\varphi^{(1)} = -\frac{2\omega_0 n_2 E_0^2 L^2 (n_1 + n_2 E_0^2)}{\sigma (c^2 + (2\omega_0 n_2 E_0^2 L)^2)} \quad \varphi^{(2)} = \frac{\omega_0 c n_2 E_0^2 L}{\sigma (c^2 + (2\omega_0 n_2 E_0^2 L)^2)}$$

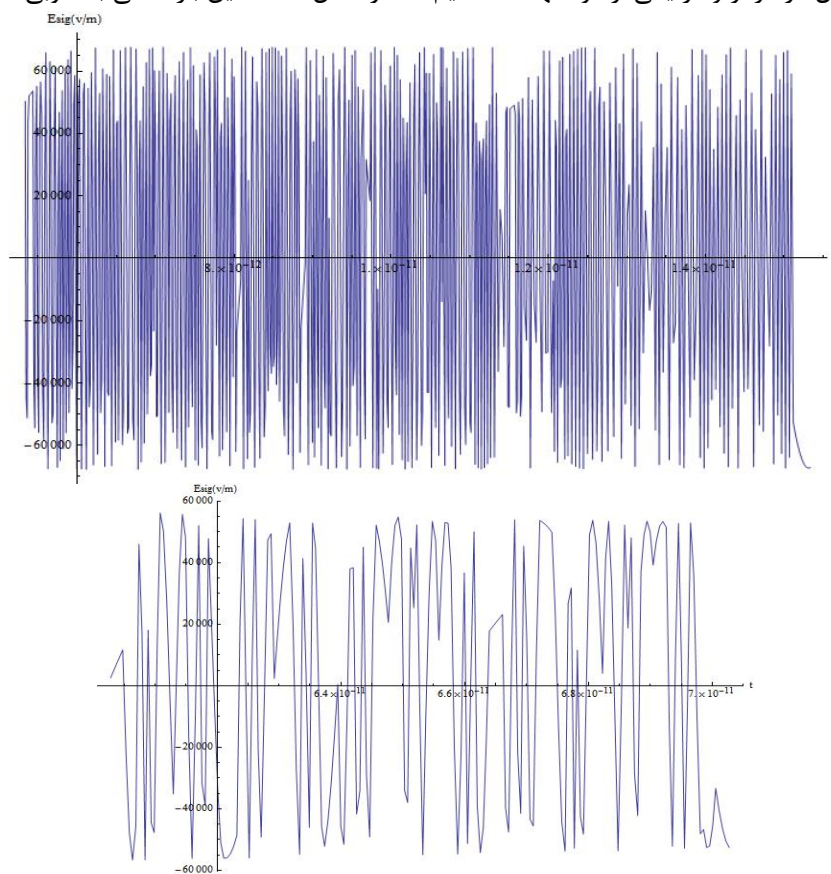
مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

که این روابط نشان می‌دهد که پالس نوری در اثر برهم کنش با محیط غیر خطی کر دچار چیرپ شده است یعنی قسمت از پالس در نمایش زمانی فشرده‌تر و قسمت دیگر آن بازتر شده است. در سال ۲۰۰۶ به روش EIT توانستند برای پالس‌هایی هم که ضعیف بودند $\bar{I} \sim 10^{-3} \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ ضریب شکست غیر خطی به بزرگی $\bar{n}_2 = 0.27 \frac{\text{cm}^2}{\text{mW}}$ را مشاهده کنند که ابعاد ابر گازی برابر با $L = 1.6 \times 10^{-3} \text{m}$ بود [۸]. با استفاده از نتایج این مقاله شکل پالس مرجع و پالس سیگنال را در شکل ۱ رسم شده اند.



شکل ۲: پالس مرجع (شکل سمت چپ) و پالسی که از محیط کر عبور کرده اند (شکل سمت راست)

اگر به پالس سیگنال در مرکز و در یکی از دو انتها نگاه کنیم که در شکل ۲ آمده این بازشدگی به خوبی نمایان است.

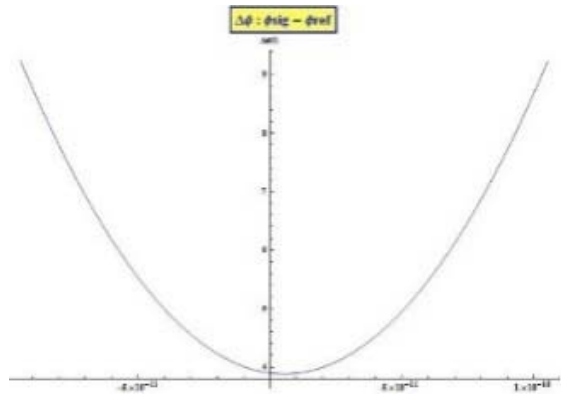


مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

شکل ۲: مرکز و انتهای سمت چپ پالس که از محیط کر عبور کرده اند

اختلاف فاز دریافتی پالس نوری در حین عبور از محیط کر با توجه به داده‌های مقاله [۸] به شکل زیر خواهد بود:

$$\Delta\varphi(t) \sim 3.88 + 5.358 \times 10^{-2} (t - 5.338 \times 10^{-12})^2 \quad (5)$$



شکل ۳: اختلاف فاز پالس بعد از محیط کر بر حسب زمان

اختلاف فاز مرکز پالس سیگنال با شدت ضعیف در انتهای ماده کر نسبت به پالس مرجع یعنی $\Delta\varphi(t = \tilde{k}_1 L)$ برابر خواهد بود با:

$$\Delta\varphi_c = 3.8800 \quad (6)$$

و اختلاف فاز پالس سیگنال در $z=L$ در زمان $t = \tilde{k}_1 L + \frac{\Delta t}{2} = \tilde{k}_1 L + 0.7\sqrt{\sigma}$ برابر است با:

$$\Delta\varphi(t = \tilde{k}_1 L + 0.7\sqrt{\sigma}) = 6.139 \quad (7)$$

که از مقایسه این دو کاملاً بازشدگی یا چیرب به وضوح دیده می‌شود.

نتیجه گیری

سوال این جاست که چرا تا کنون مسئله چیرب شدگی در نظر گرفته نشده بود. برای جواب به این سوال پالسی با شدت ضعیف $\bar{I} = 10^{-3} \frac{mW}{cm^2}$ ، پهنای اولیه $\sigma = 10^{-22} s^2$ و $\lambda_0 = 589 nm$ را در نظر می‌گیریم که با ماده ای کر با ضریب شکست های کوچک و ابعاد $L = 10^{-3} m$ بر هم کنش کند:

| $\bar{n}_2 \left(\frac{cm^2}{mW} \right)$ | σ | $\Delta\varphi_c$ | $\Delta\varphi \left(t = \tilde{k}_1 L + \frac{\Delta t}{2} \right)$ |
|--|-------------------------|-----------------------|---|
| 10^{-4} | 10^{-22} | 1.62×10^{-9} | 1.07×10^{-4} |
| 10^{-3} | 10^{-22} | 1.62×10^{-6} | 1.07×10^{-2} |
| 10^{-2} | 1.045×10^{-22} | 1.58×10^{-3} | ۰.۱۰۸ |
| 0.2 | 1.923×10^{-21} | ۱.۴۶۴ | ۳.۵۹۹ |

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

جدول ۱: پهنا و اختلاف فاز دریافتی پالس به ازای مقادیر متفاوت ضریب شکست غیر خطی محیط

از مقادیر [۲] مشاهده می‌شود که در بازه $\bar{n}_2 \leq 10^{-2}$ نه پهنا تغییر می‌کند و نه اختلاف فاز تابع واضحی از زمان خواهد بود و تنها یک مقدار ثابت است. با پیشرفت در زمینه یافتن محیط‌هایی که ضریب شکست بزرگتری دارند، اختلاف فاز بزرگتری در پالس ایجاد می‌شود و لی این تنها اثر برهم کنش با چنین محیطی نیست بلکه هم پالس چیرب می‌شود و هم دامنه و پهنای آن تغییر می‌کند که با ضریب شکست بزرگ این اثرات غیر قابل چشمپوشی می‌شوند و اگر با محیطی کار کنیم که اثر کر کوچکی داشته باشد اختلاف فاز مورد قبولی نخواهد داد. می‌توان گفت با داشتن یک اختلاف دلخواه برای پالس عبوری از محیط غیر خطی با اثر کر بزرگ، ویژگی‌ها و خواص پالس را از دست می‌دهیم. مشکل و مسئله‌ی مهم‌تر اینکه پالس دچا چیرب می‌شود. نتیجه این تحقیق این خواهد بود که محیطی با اثر کر به عنوان محیطی که اختلاف فاز دلخواه به پالس می‌دهد گزینه مناسبی نیست.

مراجع

- [۱] I. L. Chuang and Y. Yamamoto, Phys. Rev. A, 3489 (1995).
- [۲] J. Ph. Poizat and P. Grangier, Phys. Rev. Lett. 70, 271 (1993).
- [۳] Q. Lin and B. He, Phys. Rev. A 80, 042310 (2009).
- [۴] I. Carusotto and C. Ciuti, Rev. Mod. Phys. 85, 299 (2013).
- [۵] P. Adhikari, M. Hafezi, and J. M. Taylor, Phys. Rev. Lett. 110, 060503 (2013).
- [۶] S. Lee and H. Jeong, Phys. Rev. A 87, 022326 (2013).
- [۷] G. P. Agrawal, 'NONLINEAR FIBER OPTICS', Access online Via Elsevier (2007).
- [۳] Z. Wang, K. Marzlin and B. C. Sanders, Phys. Rev. Lett. 97, 063901 (2006).