بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

بررسی تقویت اثر غیرخطی کر در سیستم اپتومکانیکی در نقطه شکست پاریتی-زمان

سمیه شاکری ،زهره محمودی میمند[۱] ،دکتر امید حمیدی[۱]، دکتر علیرضا بهرامپور[۲]

دانشگاه شهید باهنر کرمان ، دانشکده فیزیک[۱]، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده فیزیک[۲]

somayeh.shakeri@gmail.com

چکیده - سیستم پیشنهادی شامل دو مد نوری در حفره فعال و غیرفعال است که همزمان به یک مد مکانیکی متصل شده اند. با استفاده خاصیت ذاتی غیرخطی در سیستم اپتومکانیکی، در حفره غیرفعال اثر غیرخطی کر ضعیف ایجاد شده و به شکل تئوری تقویت اثر غیرخطی در نزدیکی نقطه شکست پاریتی-زمان بررسی شده است.

کلید واژه-اثر تقارن پاریتی-زمان-اثر غیرخطی کر- سیستم اپتومکانیکی- هامیلتونی غیرهرمیتی

Considering Kerr effect in Optomechanical system near the broken PT-symmetry

Somayeh shakeri, Zohreh Mahmoudi[1] ,Omid Hamidi[1],Alireza Bahrampour[2]

Faculty of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman[1], Sharif University[2]

E-mail: somayeh.shakeri@gmail.com

Abstract- Proposed system includes two optic modes in active and passive cavities. These system are coupled to the mechanical mode simultaneously.Using the weak kerr effect in optomechanical systems, it is proved that the kerr effect is enhanced near the PT broken point.

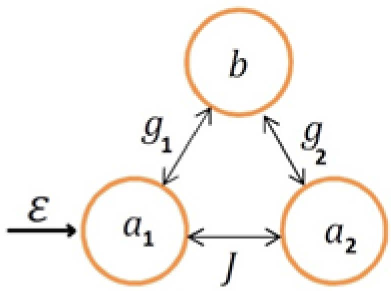
Keywords:PT-symmetry effect- Kerr nonlinearity effect- optomechanical system, Non-Hermitian Hamiltonian

مقدمه

اثر کر غیرخطی برای تولید حالت کلاسیکی غیرخطی ماکروسکوپیک یا وسایل منطق کوانتمی و بسیاری کاربردهای دیگر ضروری است. تاکنون روشهای بسیاری برای افزایش اثر کر پیشنهاد شده است. از جمله این روشها می‌توان به استفاده از آنسامبل اتمی، اتصالات جوزفسون، شفافیت ناشی از اثر الکترومغناطیسی یا تئوری کوانتومی تقارن پاریتی-زمان اشاره کرد[۱]. در این میان برخی تجهیزات کوانتومی به طور ذاتی خاصیت غیرخطی دارند. سیستم های اپتومکانیکی، نمونه خوبی برای نشان دادن این موضوع هستند. ساده ترین سیستم اپتومکانیک، یک حفره اپتیکی است که یکی از آینه‌ها می‌تواند در اثر نیروی فشار تابشی حرکت کند. اتصال اپتومکانیکی بین آینه و نیروی تابشی به طور ذاتی غیرخطی است، به این دلیل که طول حفره بستگی به شدت میدان الکتریکی دارد. دقیقا مشابه طول اپتیکی یک ماده کر که به شدت میدان وابسته است. بنابراین پدیده‌های کوانتمی مثل تولید حالتهای غیر کلاسیکی از مدهای اپتیکی و مکانیکی، فوتون بلوکه شده، درهمتنیدگی بین فوتون و فونون، دوپایداری و مانند آن در سیستم‌های اپتومکانیکی بررسی می‌شود. اثر غیرخطی کر در تحقیقات تقارن کوانتومی زمان-پاریتی مورد توجه قرار گرفته است. مدل تجربی و آزمایشگاهی تقارن پاریته-زمان به شکل دو حفره متصل شده می‌باشد که در آنها نرخ بهره و اتلاف معادل هستند. این موضوع به اثبات رسیده است که اگر اثر کر ضعیف به یکی از حفره‌ها اضافه شود، می‌تواند تحت تاثیر اثر پاریتی-زمان تقویت شود [۲]. نقطه شکست پاریتی – زمان، دقیقاً محلی است که بعد از آن می‌توان نتایج شگفت انگیز فیزیکی را مشاهده کرد. از این ایده در این مقاله استفاده شده است. بسیاری از مقاله‌ها از برهمکنش اتم و سیستم اپتومکانیکی برای افزایش اثر غیرخطی بهره گرفته‌اند [۳]. تفاوت این سیستم پیشنهادی با مقاله‌های دیگر در این است که در آنها از ماده غیرخطی استفاده شده است اما در اینجا اثر غیرخطی، مربوط به حفره اپتومکانیکی است. سیستم توصیف شده در این مقاله شامل سه مد است. دو حفره فعال و غیرفعال که همزمان به یک مد مکانیکی متصل هستند. دراین سیستم نوسانگر غیرفعال، اثر غیرخطی ضعیفی دارد. در نزدیکی نقطه شکست پاریتی-زمان، اثر غیرخطی ضعیف بین حفره‌ها توزیع می‌شود. در نزدیکی نقطه شکست، سوپر مد نوری در حفره فعال جایگزیده می‌شود. این خاصیت سبب توزیع اثر غیرخطی و تقویت آن شده است. از این ایده می‌توان برای تولید دیود فونونی استفاده کرد[۱]. در این مقاله ابتدا هامیلتونی سیستم توصیف شده است. سپس با بررسی سیستم در نزدیکی نقطه شکست پاریتی-زمان، افزایش اثر غیرخطی در سیستم پیشنهادی، از طریق محاسبات بر روی هامیلتونی اثبات می‌شود.

مدل فیزیکی

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، سیستم پیشنهادی شامل دو مد اپتیکی با عملگرهای نابودی a_1, a_2، بسامد ω_1 و ω_2 و یک مد مکانیکی با عملگر b و بسامد ω_m است (شکل ۱).



شکل ۱: شمایی از سیستم پیشنهادی با دو مد نوری که همزمان به یک مد مکانیکی متصل شده اند.

دو مد نوری با ضریب اتصال g_1 و g_2 به مد مکانیکی متصل هستند و با ضریب اتصال ضعیف J به شکل خطی به یکدیگر متصل شده‌اند. حفره فعال توسط نور لیزر با نرخ

ε و بسامد ω_L پمپ می‌شود. در هامیلتونی یک سیستم ساده اپتومکانیکی با یک مد نوری a و یک مد مکانیکی b، به شکل معادله (۱) است.

$$\mathrm{H}= \Delta a^{\dagger}a+\omega_m b^{\dagger}b+g a^{\dagger}a(\mathrm{b}+b^{\dagger}) \qquad (۱)$$

در این معادله $\Delta=\omega_L-\omega$ است. اگر این هامیلتونی تحت تحول عملگر $U=(g^2/\omega_m)\exp(a^{\dagger}a(b^{\dagger}-b))$ قرار گیرد جمله $g a^{\dagger}a(\mathrm{b}+b^{\dagger})$ با جمله مربوط به اثر غیرخطی کر $\Delta_g a^{\dagger}a a^{\dagger}a$، که در آن $\Delta_g=-g^2/\omega_m$ است، جایگزین می‌شود. با این توضیحات، هامیلتونی مربوط به سیستم پیشنهادی در این مقاله با دو مد نوری و یک مد مکانیکی، به صورت معادله (۲) نوشته می‌شود. با این تحول، حفره غیرفعال یعنی مد a_2، دارای یک اثر غیرخطی کر ضعیف خواهد شد.

$$\begin{aligned}\mathrm{H}=&\sum_{i=1}^{2}\Delta_i a_i^{\dagger}a+\omega_m b^{\dagger}b+g_1 a_1^{\dagger}a_1(\mathrm{b}+b^{\dagger})\\&+\Delta_g a_2^{\dagger}a_2a_2^{\dagger}a_2+J(a_1^{\dagger}a_2+a_2^{\dagger}a_1)\\&+\mathrm{i}\,\varepsilon(a_1^{\dagger}-a_1)\end{aligned} \qquad (۲)$$

در اینجا $\Delta_1=\omega_L-\omega_1$ و $\Delta_2=\omega_2+\Delta_g$ است. در این صورت هامیلتونی کل $H=H_1+H_2$ است.

$$\mathrm{H}_1=\sum_{i=1}^{2}\Delta_i a_i^{\dagger}a_i+J(a_1^{\dagger}a_2+a_2^{\dagger}a_1) \qquad (۳)$$

$$\begin{aligned}H_2=&\,\omega_m b^{\dagger}b+g_1a_1^{\dagger}a_1(\mathrm{b}+b^{\dagger})+\\&\Delta_g(a_2^{\dagger})^2(a_2)^2+\mathrm{i}\,\varepsilon(a_1^{\dagger}-a_1)\end{aligned} \qquad (۴)$$

ابتدا روی H_1 تغییرات مربوط به اتلاف سیستم اعمال می‌شود. اثرات اتلاف در دو حفره فعال و غیر فعال، γ_g و γ_l است.

$$\begin{aligned}\mathrm{H}_1=&(\Delta_1+\mathrm{i}\gamma_g)a_1^{\dagger}a_1+(\Delta_2\text{-}\mathrm{i}\gamma_l)\,a_2^{\dagger}a_2\\&+J(a_1^{\dagger}a_2+a_2^{\dagger}a_1)\end{aligned} \qquad (۵)$$

این هامیلتونی مطابق با معادله (۶) قطری می‌شود.

$$H_1=\begin{pmatrix}a_1^{\dagger} & a_2^{\dagger}\end{pmatrix}V\begin{pmatrix}a_1\\a_2\end{pmatrix} \qquad (۶)$$

در این معادله V براساس معادله (۷) است.

$$V=\begin{pmatrix}(\Delta_1+i\gamma_g) & J\\ J & (\Delta_2\text{-}i\gamma_l)\end{pmatrix} \qquad (۷)$$

ماتریس V مطابق معادله (۸) قطری می‌شود.

$$V=\begin{pmatrix}(\Delta_{+}+i\gamma_{+}) & 0\\ 0 & (\Delta_{-}\text{-}i\gamma_{-})\end{pmatrix} \qquad (۸)$$

در اینجا تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}&\Delta_{\pm}-i\gamma_{\pm}=(\Delta_1+\Delta_2)/2+i(\gamma_g-\gamma_l)/2\pm\\&[(\Delta_1-\Delta_2)^2/2-(\gamma_g+\gamma_l)^2/2+\\&+i(\gamma_g+\gamma_l)(\Delta_1-\Delta_2)/2+J^2]^{\frac{1}{2}}\end{aligned} \qquad (۹)$$

در حالت تقارن پاریتی-زمان ویژه مقدارها حقیقی هستند. به عبارتی $\Delta=(\Delta_1+\Delta_2)/2$، $\gamma_{\pm}=(\gamma_l-\gamma_g)/2$ و $\gamma=(\gamma_l+\gamma_g)/2$. در این صورت $\Delta_{\pm}=\Delta\pm\Omega$ و $\Omega=(J^2-\gamma^2)^{1/2}$ است. قبل از نقطه شکست داریم، $\gamma\le J$، و سوپرمدها غیرتبهگن هستند. بعد از شکست، $\gamma>J$ و سوپرمدها تبهگن می‌شوند. در این صورت $\Delta_{\pm}=\Delta$ است. در ادامه سوپر مدها برای نقطه شکست پاریتی-زمان معرفی شده است.

$$\begin{aligned}a_1&=\alpha_{g+}a_{+}+\alpha_{g-}a_{-}\\a_2&=\alpha_{l+}a_{+}+\alpha_{l-}a_{-}\end{aligned} \qquad (۱۰)$$

با جاگذاری در هامیلتونی H_2 و صرفنظر از جملات غیرتشدیدی، در دو حالت تقارن و شکست پاریتی-زمان، هامیلتونی مطابق با معادله (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آید. معادله (۱۱) در رژیم تقارن پاریتی- زمان و معادله (۱۲) در نقطه شکست آن است.

$$H_{PS}=\omega_m b^{\dagger}b-(g_2^2/\omega_m)(4J^2/(J^2-\gamma^2)^2)\times(a_+^{\dagger}a_+)(a_-^{\dagger}a_-)+(g_1J^2/(2(J^2-\gamma^2)))\times(a_+^{\dagger}a_++a_-^{\dagger}a_-)(b^{\dagger}+b)+i\varepsilon[(i\gamma+\sqrt{J^2-\gamma^2})/\sqrt{2(J^2-\gamma^2)}\times(a_+^{\dagger}-a_-)+(-i\gamma+\sqrt{J^2-\gamma^2})/\sqrt{2(J^2-\gamma^2)}\times(a_-^{\dagger}-a_+)] \quad (۱۱)$$

$$H_{PB}=\omega_m b^{\dagger}b-(g_2^2/\omega_m)\times(J^2\gamma^2/(4(\gamma^2-J^2)^2))\times(a_+^{\dagger}a_+)(a_-^{\dagger}a_-)+(2g_1J\gamma/(2(\gamma^2-J^2)))\times((a_+^{\dagger}a_+)(a_-^{\dagger}a_-))(b^{\dagger}+b)+i\varepsilon[(\sqrt{(2\gamma^2+2\gamma\sqrt{\gamma^2-J^2})}/(2J\sqrt{(\gamma^2-J^2)})\times((-\gamma+\sqrt{\gamma^2-J^2})\times a_+^{\dagger}+(\gamma+\sqrt{\gamma^2-J^2})a_-^{\dagger}))-(\sqrt{(2\gamma^2-2\gamma\sqrt{\gamma^2-J^2})}/(2J\sqrt{(\gamma^2-J^2)})\times((\gamma+\sqrt{\gamma^2-J^2})a_++(-\gamma+\sqrt{\gamma^2-J^2})a_-)] \quad (۱۲)$$

در رژیم شکست پاریتی-زمان مد a_2 از a_1 کوچکتر است و میدان در حفره فعال جایگزیده می‌شود. در نقطه شکست پاریتی، سوپرمدها مطابق با معادله (۱۳) به دست می‌آید. در نهایت در حالت جایگزیدگی، هامیلتونی معادله (۱۴) محاسبه می‌شود. در جمله دوم مربوط به اثر کر در نقطه شکست، وقتی $\gamma = J$ است، مخرج به سمت صفر میل کرده و این جمله بزرگ می‌شود. به این ترتیب دستیابی به اثر غیرخطی بزرگ امکان پذیر است.

$$a_+\approx\frac{J}{\sqrt{J^2+(\gamma+i\sqrt{J^2-\gamma^2})^2}}a_1$$
$$a_-\approx\frac{J}{\sqrt{J^2+(-\gamma+i\sqrt{J^2-\gamma^2})^2}}a_1 \quad (۱۳)$$

$$H_{PB-localized}=\omega_m b^{\dagger}b-(g_2^2/\omega_m)\times(J^4\gamma^2/(16(\gamma^2-J^2)^2))\times(a_1^{\dagger}a_1)^2+((2g_1J^2)/(\gamma^2-J^2))\times a_1^{\dagger}a_1(b^{\dagger}+b) \quad (۱۴)$$

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم متشکل از دو مد نوری و یک مد مکانیکی، شامل حفره فعال و غیر فعال پیشنهاد شده است. از اثر غیرخطی ذاتی سیستم اپتومکانیکی، برای تولید اثرغیرخطی ضعیف در حفره غیرفعال استفاده شد. بررسی رفتار سیستم در نزدیکی نقطه شکست پاریتی-زمان نشان داد، اثر غیرخطی در این سیستم به شکل قابل توجهی تقویت می‌شود. بنابراین سیستم پیشنهادی می-تواند به عنوان یک دیود فونونی استفاده شود.

مرجع‌ها

[1] Jing Zhang, Bo Peng, Şahin Kaya Özdemir, Yu-xi Liu, Hui Jing, Xin-you Lü, Yu-long Liu, Lan Yang, and Franco Nori, *A route to low-threshold phonon diodes*, Phys.Rev.B, Vol.92, 2015.
[2] M. A. Lemonde, N. Didier, A. A. Clerk, *Enhanced nonlinear interactions in quantum optomechanics via mechanical amplification*. Nature communications, Vol.**7**, 2016.

[3] Y. Dong, X. Zheng, D. Wang, J. Ding, *Fluctuation-enhanced Kerr nonlinearity in an atom-assisted optomechanical system with atom-cavity interactions*. Optics Express, Vol.*29*, 2021.