بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک
ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و
فناوری فوتونیک ایران،

دانشگاه شهید چمران اهواز،

خوزستان، ایران.

۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

سردسازی تا حالت پایه کوانتمی در سیستم اپتومکانیک با استفاده از تداخل و تقارن پاریتی-زمان

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]

E-mail: zohre.mm@gmail.com

چکیده – حفره اپتومکانیکی در اتصال با یک حفره بهره در جهت سردسازی تا حالت پایه کوانتمی پیشنهاد شده است. در این سیستم بهبود فرآیند سردسازی از طریق جایگزیدگی و انباشت انرژی در حفره بهره و همچنین تنظیم تداخل ویرانگر روی فرآیند گرم‌سازی انجام می‌شود. بسامد مدها، ضریب اتلاف در مدهای نوری و مد مکانیکی، ضریب اتصال بین حفره‌ها و ضریب اتصال بین مد مکانیکی و مد اپتیکی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که سیستم در نزدیکی نقطه استثنایی در پدیده تقارن پاریتی-زمان قرار بگیرد. به این شکل سردسازی تا حد پایه کوانتومی در شرایط حفره با اتلاف زیاد و ضریب اتصال اپتومکانیکی ضعیف رخ می‌دهد. این نتیجه بسیار ارزشمند و مهم است.

کلید واژه :اپتومکانیک -اتصال فیزیک تقارن پاریتی-زمان - سردسازی کوانتومی

Bad-Cavity Optomechanical Ground-State Cooling Via quantum interference and a Parity-Time Symmetric

Zohreh Mahmoudi[۱] ,Omid Hamidi[۱],Alireza Bahrampour[۲]

Faculty of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman[۱], Sharif University[۲]

E-mail: zohre.mm@gmail.com

Abstract- We proposed a fast ground-state optomechanical cooling methodfor a bad optomechanical system. A PT system consists of a gain cavity, whichis coupled to an optomechanical cavity. Also, a quarter-wave plate provideslinear mixing interaction between the optomechanical cavity and the thirdmode. Our proposed system improved the cooling rate by using two methods. The energy localization in the gain cavity and the destructive quantum interference are the important e_ects that enhance the cooling rate. Our most important achievement is that the optomechanical cavity is present in both the bad-cavity limit and the weak optomechanical coupling regime. These innovations can be attained by parameter management of the system.

Keywords: optomechanic-bad-cavity-cooling-PT symmetry

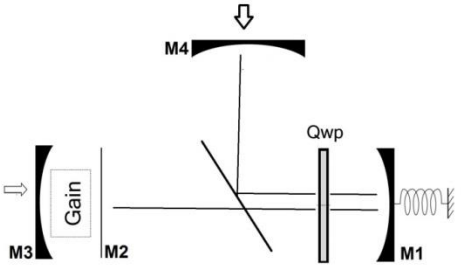
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

مقدمه

سردسازی تا حالت پایه در سیستم های اپتومکانیک یک روش عالی در آزمایشات کوانتومی است. در سیستم های اپتومکانیکی فشار تابشی سبب برهمکنش فوتون و فونون می‌شود. بسامدهای معروف به استوکس و آنتی استوکس به دلیل خلق یا نابودی فونونها در سیستم اپتومکانیکی ایجاد می‌شود. نرخ نابودی فونونها از اختلاف دامنه استوکس و آنتی استوکس به دست می‌آید. این کمیت در واقع در پایه محاسبات سردسازی در سیستم اپتومکانیک است و از طریق متغیرهای بسامدی در سیستم اپتومکانیک مهندسی می‌شود. روشهای سردسازی متفاوتی از جمله سردسازی اتلافی و سردسازی باند جانبی تیز تاکنون در سیستمهای اپتومکانیکی بررسی شده است [۱-۴]. روش سردسازی باند جانبی تیز که در آن بسامد مکانیکی از ضریب نرخ اتلاف در حفره بسیار بزرگتر باشد عملی است. در بسامدهای مکانیکی کوچک سرد سازی به اندازه کافی اتفاق نیفتاده و نرخ سردسازی کم است. یکی از مقاله هایی که در سال های اخیر سردسازی را به شیوه ای جدید در سیستم اپتومکانیکی بررسی کرده است روشی را بر پایه سردسازی پیشنهاد داده است .در روش جدید سردسازی تا حالت پایه از تقارن پاریتی زمان در سیستم اپتومکانیکی استفاده کرده است که در آن یک حفره با حضور ماده بهره با حفره دیگری که اتلاف بالایی دارد متصل شده اند [۱]. همچنین گروهی از پژوهشگران از روش تداخل کوانتومی ویرانگر بین دو بسامد در حفره برای حذف فرآیند گرمایشی و افزایش نرخ سردسازی استفاده کرده اند [۲]. سوالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که آیا می‌توان شرایط اپتومکانیکی را به گونه ای فراهم کرد که همزمان دو روش سردسازی در آن به کار گرفته شود و از این طریق با شرایط ساده تر و عملی تر و نزدیک به حالت آزمایشگاه سردسازی اپتومکانیکی را انجام داد؟ در این مقاله به این سوال پاسخ می‌دهیم. در بخش اول ابتدا سیستم اپتومکانیکی که بستر مناسبی برای پیاده سازی هر دو روش است را معرفی می‌کنیم و سپس در بخش تئوری نرخ سردسازی با توجه به کمیتهای اثرگذار در سیستم محاسبه می‌شود.

تئوری

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است سیستم طراحی شده شامل سه مد اپتیکی است. حفره اپتومکانیکی شامل دو مد است که درون آن یک صفحه ربع موج قرار دارد. این صفحه ترکیب خطی از دو مد ایجاد می‌کند. حفره با ماده بهره به حفره اپتومکانیکی متصل است.



شکل ۱: سیستم شامل یک حفره بهره-اتلاف(M۱-M۳) است که به حفره اپتومکانیکی (M۱-M٤) متصل شده است. مد a_3 مربوط به حفره (M۳-M۲) به مد a_1 در حفره (M۱-M۲) متصل شده و حفره پاریتی-زمان را شکل می‌دهند. صفحه ربع موج QWP مد a_1 را به مد حفره اتلافی (M۱-M۲) و مد مکانیکی b ترکیب می‌کند.

هامیلتونی موثر کل سیستم $H = H_0 + H_I$، خواهد بود که H_0 هامیلتونی آزاد و H_I هامیلتونی برهمکنش است. در معادله (۱) ، ω_j و $a_j, j = 1,2,3$ به ترتیب بسامد و عملگر بوزونی حفره ها می‌باشند.

$$H_0 = \sum_{j=1}^{3} (\omega_j a_j^{\dagger} a_j) + \omega_m b^{\dagger} b \qquad (۱)$$

عملگر خلق و فنا در مد مکانیکی b و $b^{\dagger}$ و بسامد آن ω_m می‌باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

$$H_1 = \sum_{j=1}^{2} G_j a_j^{\dagger} a_j (b + b^{\dagger}) + i \frac{g}{2}(a_2 a_1^{\dagger} - a_1 a_2^{\dagger}) + J(a_1^{\dagger} a_3 + a_1 a_3^{\dagger}) \quad (۲)$$

هامیلتونی برهمکنش در معادله (۲) تعریف شده است.اولین جمله از معادله مربوط به فشار تابشی آینه و میدان حفره و $G_j = G_0 \alpha_j$ ضریب اتصال بین مد مکانیکی و نوری است. در این عبارت G_0 ضریب اتصال اپتومکانیکی برای یک تک فوتون و α_J شدت در هر فوتون است. جمله دوم مربوط به اتصال مدها از طریق صفحه ربع موج است و g ضریب اتصال بین دومد است. جمله آخر مربوط به اتصال حفره فعال (بهره) و حفره منفعل(اتلافی) است. ضریب اتصال J قدرت تونل زنی فوتون را بین دو حفره فعال و منفعل نشان می‌دهد. تبدیل براساس بسامد را به معادله (۲) اعمال کرده و شکل جدید هامیلتونی براساس بسامدهای نوسانی $\Delta_j = \omega_l - \omega_j$, $j = 1,2,3$ به دست می‌آید.

$$H = \sum_{j=1}^{3}(-\Delta_j a_j^{\dagger} a_j) + \omega_m b^{\dagger} b + \sum_{j=1}^{2} G_j a_j^{\dagger} a_j (b + b^{\dagger}) + i \frac{g}{2}(a_1^{\dagger} a_2 - a_2^{\dagger} a_1) + J(a_1^{\dagger} a_3 + a_3^{\dagger} a_1) \quad (۳)$$

با استفاده از معادلات لانجوین و بعد از خطی سازی معادلات (۴) تا (۷) محاسبه می‌شود.

$$\dot{a_1} = (i\Delta_1 - \frac{k_1}{2})a_1 + \frac{g}{2}a_2 - iJa_3 - iG_1(b + b^{\dagger}) - \sqrt{k_1}a_{1in} \quad (۴)$$

$$\dot{a_2} = (i\Delta_2 - \frac{k_2}{2})a_2 - \frac{g}{2}a_1 - iG_2(b + b^{\dagger}) - \sqrt{k_2}a_{2in} \quad (۵)$$

$$\dot{a_3} = (i\Delta_3 + \frac{k_3}{2})a_3 - iJa_1 - \sqrt{k_3}a_{3in} \quad (۶)$$

$$\dot{b} = (-i\omega_m - \frac{\gamma_m}{2})b - i\sum_{j=1}^{2} G_j(a_j + a_j^{\dagger}) - \sqrt{\gamma_m}b_{in} \quad (۷)$$

در این معادلات $a_{jin}, j = 1,2,3, b_{in}$ عملگرهای نویز هستند که مقدار میانگین آنها صفر است. همچنین ضریبهای k_j و γ_m به ترتیب ضرایب اتلافی هر مد اپتیکی و مد مکانیکی است. نرخ سردسازی با استفاده از طیف نویز کوانتومی نیروی اپتیکی به دست می‌آید.

$$F(t) = -\frac{\hbar G}{x_{zpf}}(a_1(t) + a_1^{\dagger}(t)) \quad (۸)$$

$$S_{FF}(\omega) = \int dt e^{i\omega t} < F(t)\, F(0) > \quad (۹)$$

نرخ سردسازی مکانیکی اختلاف بین مد آنتی استوکس واستوکس است.

$$A_s = (x_{ZPF}^2 / \hbar^2) S_{FF}(-\omega_m)$$
$$A_{as} = (x_{ZPF}^2 / \hbar^2) S_{FF}(\omega_m) \quad (۱۰)$$

براساس روش محاسباتی در مقاله [۱] $S_{FF}(\omega)$ محاسبه شده است.

$$S_{FF}(\omega) = \frac{G_1^2}{x_{zpf}^2}(k_1|\chi(\omega)|^2 + \frac{g^2}{4}k_2|\chi(\omega)|^2|\chi_2(\omega)|^2 + J^2 k_3|\chi(-\omega)|^2|\chi_3(-\omega)|^2 \quad (۱۱)$$

$$\chi_i(\omega) = 1/(-i(\omega + \Delta_i) + k_i/2); i = 1,2 \quad (۱۲)$$

$$\chi_3(\omega) = 1/(-i(\omega + \Delta_3) - k_3/2) \quad (۱۳)$$

$$\chi_g(\omega) = \chi_1(\omega)/(1 + (g^2/4)\chi_2(\omega)\chi_1(\omega)) \quad (۱۴)$$

$$\chi_{PT}(\omega) = \chi_g(\omega)/(1 + J^2\chi_3(\omega)\chi_g(\omega)) \quad (۱۵)$$

ضرایب پذیرفتاری به ترتیب طبق معادله (۱۲) تا (۱۵) است. حد سرد سازی مکانیکی یعنی تعداد فونونها در حالت پایدار مطابق معادله (۱۶) محاسبه شده است.

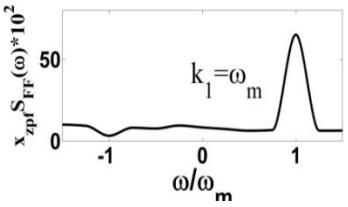
$$n_f = \frac{\gamma_m n_{th} + A_s}{\gamma_m + \Gamma_{opt}} \quad (۱۶)$$

در این معادله $\Gamma_{opt} = A_{as} - A_s$ و سرد سازی زمانی رخ می‌دهد که $n_f < 1$ باشد. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است $S_{FF}(\omega)$ برحسب ω / ω_m رسم شده

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

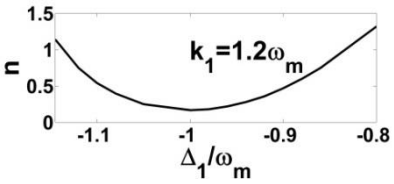
است. در این شکل $\omega_m / 2\pi = 20MHz$، $\gamma_m = 10^{-5}$ ، $g = 0.1\omega_m$ و برای کمیتهای دیگر داریم:

$$G_1 = 0.005\omega_m , G_2 = 0.0005\omega_m , k_1 = \omega_m , k_2 = 0.5\omega_m$$



شکل ۲: طیف نویز کوانتومی نیروی اپتیکی برحسب تابعی از فرکانس ω / ω_m

همچنین فرض شده است که $\Delta_1 = \Delta_3 = -\omega_m$ و $\Delta_2 = \omega_m$. در این شرایط سردسازی رخ داده و کمینه تعداد فونون ها برابر است با $n_{f,min} = 0.15$. در شکل(۳) تعداد فونون ها بر حسب Δ_1 / ω_m و در شرایط حفره بد یعنی $k_1 > 1.2\omega_m$ رسم شده است.



شکل ۳:در این شکل تعداد فونون ها بر حسب Δ_1/ω_m نشان داده شده است در این شرایط سردسازی رخ می‌دهد.

همانطور که در شکل نشان داده شده است سردسازی رخ میدهد و این موضوع از لحاظ شرایط آزمایشگاهی بسیار ارزشمند است .علاوه بر این در رسم نتایج ضریب اتصال اپتومکانیکی ضعیف در نظر گرفته شده است که به شرایط واقعی و آزمایشگاهی نزدیک باشد .چرا که ایجاد شرایط ضریب اتصال قوی بین فونون و فوتون در حفره اپتومکانیکی بسیار مشکل است .براساس شکل (۳) به نظر میرسد ترکیب دو روش پاریتی-زمان و تداخل ویرانگر برای حذف اثرات گرمایشی در سیستم پیشنهادی شکل (۱) شرایطی را فراهم میکند که بتوان در حالت حفره بد و در شرایط ضعیف بودن اتصال بین فوتون و فونون در سیستم اپتومکانیکی، سردسازی مکانیکی را شاهد بود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم پیشنهادی شامل اتصال حفره اتلافی اپتومکانیکی با یک حفره بهره دار است تا از این طریق بتوان از پدیده تقارن پاریتی-زمان استفاده کرد. سردسازی از طریق جایگزیدگی و انباشت انرژی در حفره بهره و همچنین تنظیم تداخل ویرانگر روی فرآیند گرم-سازی انجام می‌شود. بسامد مدها، ضریب اتلاف در مدهای نوری و مد مکانیکی، ضریب اتصال بین حفره‌ها و ضریب اتصال بین مد مکانیکی و مد اپتیکی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که سیستم در نزدیکی نقطه استثنایی در پدیده تقارن پاریتی-زمان قرار بگیرد. کار بر روی هامیلتونی با استفاده از معادلات لانجوین و رسم نمودار تعدادفونون ها نشان داد دسترسی به سردسازی با وجود اتلاف معمول حفره ها و اتصال ضعیف بین مد مکانیکی و نوری قابل دستیابی است.

مرجع‌ها

[۱] Y.L. Liu and Y.X.Liu. "Energy-localization-enhanced ground-state cooling of a mechanical resonator from room temperature in optomechanics using a gain cavity." Physical Review A Vol.۹۶, No. ٦, pp. ۰۲۳۸۱۲, ۲۰۱۷.

[۲] W. J. Gu, and G. X. Li. "Quantum interference effects on ground-state optomechanical cooling." Physical Review A, Vol. ۸۷, No. ۲ pp. ۰۲۵۸۰۴, ۲۰۱۳.

[۳] H. Xu, Luyao Jiang, A. A. Clerk, and J. G. E. Harris. "Nonreciprocal control and cooling of phonon modes in an optomechanical system." Nature Vol.٥٦٨, No.٧٧٥٠, pp.٦٥-٦٩ ,٢٠١٩.

[٤] Lai, Deng-Gao, Jin-Feng Huang, Xian-Li Yin, Bang-Pin Hou, Wenlin Li, David Vitali, Franco Nori, and Jie-Qiao Liao. "Nonreciprocal ground-

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

state cooling of multiple mechanical resonators." Physical Review A Vol.۱۰۲, No. ۱ , pp.۰۱۱۵۰۲, ۲۰۲۰.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]