

Degenerate parametric oscillation in membrane cavity optomechanics

Carlos Sánchez-Muñoz¹, Mónica Benito², and Carlos Navarrete-Benlloch³

¹ *Dep. de Física Teórica de la Materia Condensada, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, Spain.*

² *Instituto de Ciencia de Materiales, CSIC, Cantoblanco, 28049 Madrid, Spain.*

³ *Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-str. 1, 85748 Garching, Germany.*

Resumen: Modern quantum technologies offer a window into physical models that seemed untestable not long ago. We show that optomechanical cavities are currently operated in a regime in which one of such elusive models, the degenerate parametric oscillator, can be implemented via proper multi-chromatic drivings. Holding the paradigm of a dissipative quantum phase transition whose associated spontaneously broken symmetry is discrete, this is among the most relevant fundamental models in the field of open system dynamics.

Together with lasing, degenerate parametric oscillation has possibly the best-studied quantum optical dissipative model. The main motivation for studying such a model came from nonlinear optics, in particular from the possibility of implementing it in optical parametric oscillators [1]: cavities containing a second order nonlinear crystal that, when pumped with a laser at frequency ω_p , are capable of generating a field at the subharmonic frequency $\omega_p/2$ through parametric down-conversion. Defining the annihilation operator a for photons in the subharmonic mode, the model is formulated as the following evolution equation for its state ρ :

$$\dot{\rho} = [\sigma(a^{\dagger 2} - a^2), \rho] + \gamma(2a\rho a^{\dagger} - a^{\dagger}a\rho - \rho a^{\dagger}a) + \Gamma(2a^2\rho a^{\dagger 2} - a^{\dagger 2}a^2\rho - \rho a^{\dagger 2}a^2), \quad (1)$$

where the first and last terms describe, respectively, coherent exchange and irreversible loss of photon pairs into the pumping laser, while the second one accounts for damping through the mirrors.

Unfortunately, in optical implementations the $\omega_p/2$ degenerate down-conversion has to compete with non-degenerate processes in which the photon pairs are generated at frequencies ω_1 and ω_2 such that $\omega_p = \omega_1 + \omega_2$ (energy conservation), and it is simple to show that phase-matching (momentum conservation) always gives preference to one of these processes above the phase transition. In other words, despite the great deal of work invested on this system, degenerate optical parametric oscillation does not exist in reality.

In this work we prove that modern quantum technologies in which a mechanical degree of freedom is dispersively coupled to the light field of a cavity, allow for a realistic implementation of this long-awaited model. We focus on a system consisting of an oscillating dielectric membrane embedded in an optical cavity, see Fig. 1, and show how the conditions under which these setups are currently operated [2,3], together with the proper multi-chromatic driving, make the experimental analysis of degenerate parametric oscillation accessible with present technology.

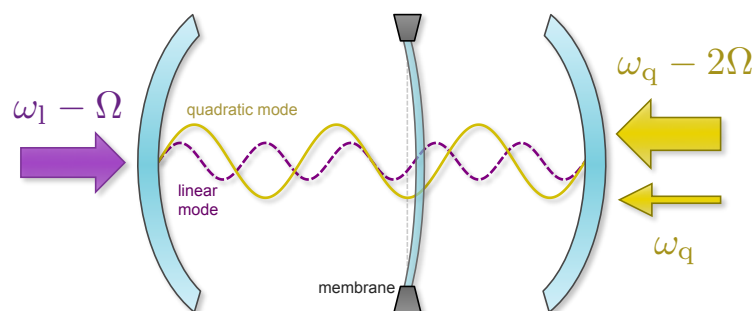


Fig. 1.- Setup proposed for the observation of degenerate parametric oscillation in a mechanical degree of freedom. The membrane is dispersively coupled to two driven cavity modes. One of them, denoted by ‘linear’ because its frequency depends linearly on the membrane’s displacement (ω_l is its bare value), tries to cool down the membrane’s fundamental mode (with oscillation frequency Ω) close to its quantum mechanical ground state, hence controlling the rate γ in Eq. (1). The other mode, denoted by ‘quadratic’ because in this case its frequency varies quadratically with the membrane’s displacement, contains two tones, one at the resonant frequency ω_q and another at the two-phonon sideband $\omega_q - 2\Omega$. The combination of these two tones induces the coherent and incoherent two-phonon processes needed for degenerate parametric oscillation, and, through their power, they allow for an independent tuning of Γ and σ in Eq. (1).

Referencias

- [1] P. Meystre and D. F. Walls (eds.), *Nonclassical Effects in Quantum Optics* (American Institute of Physics, 1991).
- [2] J. D. Thompson et al., “Strong dispersive coupling of a cavity to a micromechanical membrane”, *Nature* **452**, 72 (2008).
- [3] M. Karuza et al., “Tunable linear and quadratic coupling for a membrane within a cavity”, *J. Opt.* **15**, 025704 (2013).

Medida de Desplazamiento Nanométrico en Microcantilevers utilizando Interferometría Realimentada Diferencial

Francisco J. Azcona, Ajit Jha, Carlos Yañez, Santiago Royo

Centro de Desarrollo de Sensores, Instrumentación y Sistemas (CD6) – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Rambla St. Nebridi 10, E-08222, Terrassa, España

Resumen: En este trabajo exploramos la factibilidad del uso de la interferometría realimentada diferencial en la medición de desplazamientos de magnitud nanométrica en cantilevers micrométricos. Los resultados obtenidos muestran que para desplazamientos en baja frecuencia es posible capturar el movimiento del cantiléver con resoluciones en el orden de $\lambda/200$. Debido a su costo y facilidad de implementación la técnica podría utilizarse para el desarrollo de biosensores.

La interferometría realimentada, mejor conocida por su acrónimo en inglés *SMI* (Self-Mixing Interferometry) [1] es una potente herramienta auto-alineada de bajo coste, que permite la medición de cambios en el camino óptico de un láser con precisión micrométrica. En el caso de la medición de desplazamiento, diversos métodos han sido propuestos con el fin de mejorar la resolución de la técnica, siendo indispensable que el movimiento total detectado fuese de una amplitud mayor a $\lambda/2$ [2,3]. Nuestro grupo ha propuesto la técnica denominada interferometría diferencial realimentada (*DSMI*) [4] en la cual, a través de la comparación de dos señales de SMI con una modulación de referencia conocida es posible extraer desplazamientos con resoluciones prácticas en el orden de $\lambda/200$.

Un área de interés para la implementación de esta técnica es la estimación de fuerzas de área en la micro escala a través del desplazamiento o vibración de un transductor mecánico previamente caracterizado. Consideramos que un sistema basado en DSMI es una alternativa a los sistemas utilizados para este tipo de medidas.

Con el fin de probar la efectividad de DSMI en la medición de movimientos de micro-cantilévers, se construyó el sistema de pruebas mostrado en Fig. 1. El sensor está constituido por un diodo láser, por lo cual es necesario capturar un conjunto de datos previos que servirán como señal de referencia para el grupo de mediciones.

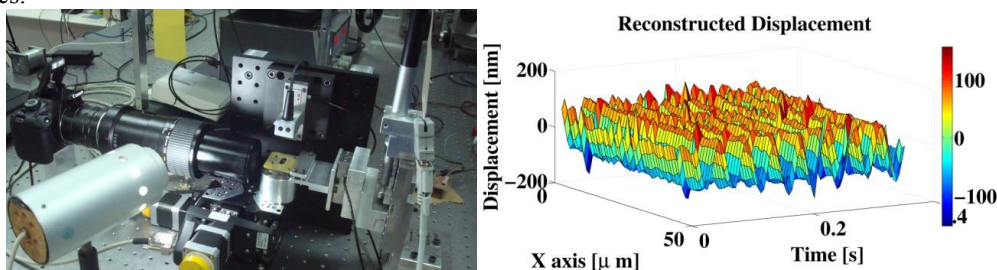


Figura 1.- A la izquierda sistema de pruebas de movimiento de cantiléver utilizando DSMI. A la derecha detección de desplazamiento sinusoidal de amplitud 200nm a 20Hz .

Como se puede observar en Fig.1, el sistema es capaz de recuperar correctamente el desplazamiento del cantiléver en la mayor parte de las muestras tomadas. Las señales recolectadas presentan un error de reconstrucción en el orden de 3nm , cumpliendo por tanto con los límites prácticos de la técnica DSMI. Para otros valores de amplitud y frecuencia se obtuvieron valores similares de error en la medición, así como de reconstrucción del desplazamiento. El tiempo de procesamiento debe ser mejorado con el fin de utilizar la medición en aplicaciones convencionales.

Referencias

- [1] S. Donati, "Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements," *Laser Photonics Rev* **6**, pp.1-25 (2011).
- [2] O. D. Bernal, U. Zabit, T. Bosch, "Study of laser feedback phase under self-mixing leading to improved phase unwrapping for vibration sensing," *IEEE Sens. J.* **13**, pp. 4962 – 4971 (2013).
- [3] L. Wei, J. Xi, Y. Yu, J. Chicharo, "Phase unwrapping of self-mixing signals observed in optical feedback interferometry for displacement measurement," en *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications, 2006 ISPACS '06*, pp. 780 – 783 (2006).
- [4] F. J. Azcona, R. Atashkooei, S. Royo, "Differential optical feedback interferometry for the measurement of nanometric displacements," *OPA* **47**, pp. 19-25 (2014).