

高 Q フォトニック結晶微小共振器において発現する確率的自発励振の光子相関測定

Photon correlation measurements of stochastic limit cycles emerging from high-Q

nonlinear silicon photonic crystal microcavities

NTT ナノフォトニクスセンタ¹, NTT 物性基礎研²武村尚友^{1,2}, 滝口雅人^{1,2}, 角倉久史^{1,2}, 倉持栄一^{1,2}, 新家昭彦^{1,2}, 納富雅也^{1,2}NTT NPC¹, NTT BRL², N. Takemura^{1,2}, M. Takiguchi^{1,2}, H. Sumikura^{1,2}, E. Kuramochi^{1,2},A. Shinya^{1,2}, M. Notomi^{1,2}

E-mail: naotomo.takemura.ws@hco.ntt.co.jp

自発励振 (リミットサイクル) はポンピング (エネルギー注入) と散逸を伴う非線形系にのみ見られる振動現象であり、外部から摂動を受けても元の軌道に戻っていくという性質を持つ。自然界において自発励振は普遍的にみられる現象であるが、特に生物系において細胞リズムや概日リズムなどの生物リズムのモデルとして自発励振は重要な役割を担う。さらに、生物リズムは熱ゆらぎ等ノイズにより絶えず摂動を受けつつ動作する確率的自発励振 (Stochastic limit cycle) である。生物リズムはなぜノイズ下でも正確に動作するのか? という問題は生物物理において盛んに論じられており、その一つの回答はポンピングによる安定化である。我々はナノフォトニクス系と光子相関測定を用いて光領域の確率的自発励振の正確さを評価し、ポンピングによる励振の安定化を実証した。自発励振のような力学系の研究にナノフォトニクス系を用いることはパラメータの制御性の高さと光測定の容易さ・多様性という二点で有利である。実験では Q 値 35 万の高 Q シリコンフォトニック結晶微小共振器 [図 1(a)] に入力導波路からレーザー光を入力し、出力導波路から光出力を観測した。光入力を共振器の長波長側に固定すると光出力は光入力に対して双安定性を示す [図 1(b)]。我々は遅延時間 τ に光子ペアを検出する確率 $P_2(\tau)$ を超伝導単一光子検出器と Hanbury Brown-Twiss 干渉計を用いた start-stop 法により測定し、 $P_2(\tau)$ のフィッティングから規格化された二次光子相関関数 $g^{(2)}(\tau)$ を再構成した。光入力が双安定領域よりも上の臨界強度 (P_c) を超えるとそれまでポワソン揺らぎ ($g^{(2)}(\tau)=1$) であった二次相関関数に 10MHz 程度の減衰振動が現れる [図 1(c)]。我々は様々な光入力強度で光子相関を測定し、 $g^{(2)}(\tau)$ の振動周波数 [図 1(d)] とコヒーレンス (減衰) 時間 [図 1(e)] の光入力強度依存性を調べた。特に、 $g^{(2)}(\tau)$ のコヒーレンス時間は光入力強度を上げることで、マイクロ秒オーダーまで伸びることを確認した。実時間測定でも光出力の周期的振動が観測されたことから、我々は $g^{(2)}(\tau)$ の減衰振動が Hopf 分岐に伴う自発励振に起因すると結論づけた。実験結果の解釈のために我々は電場、キャリア、熱効果を変数とする結合モード方程式の数値計算を行った。数値計算は実験結果を定性的に再現し、 $g^{(2)}(\tau)$ の振動周波数の振動周期は自発励振の振動周期に対応し、一方、有限のコヒーレンス (減衰) 時間はノイズを入れたときのみ現れることが数値計算により明らかになった。蔵本・Winfree による位相記述法では、自発励振においてノイズは一般化された位相の位相ノイズとして解釈できる。測定した $g^{(2)}(\tau)$ のコヒーレンス時間は自発励振の位相コヒーレンス時間として解釈可能であり、[図 1(e)] は光入力強度の増加に伴う自発励振の位相コヒーレンス時間の増大として解釈できる。自発励振の位相コヒーレンス時間とは振動の正確さを特徴づける量であることから、[図 1(e)] はポンピング (エネルギー注入) による自発励振の安定化に他ならないと考えられる。

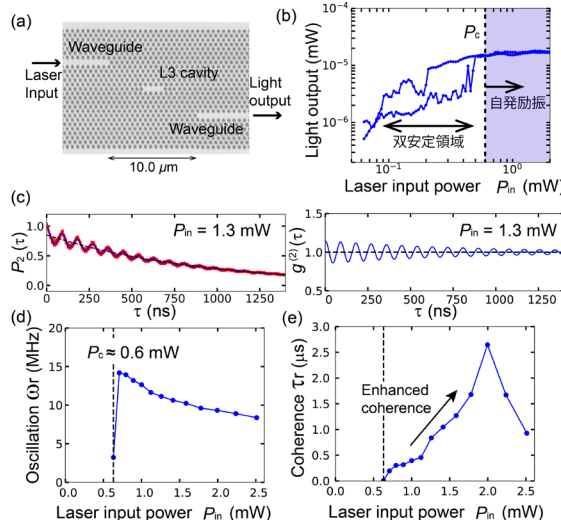


図 1:

- (a) 高 Q シリコンフォトニック結晶共振器。
- (b) 光入力-光出力カーブとヒステリシス。
- (c) 遅延 τ に光子ペアを検出する確率 $P_2(\tau)$ (実験データ) と $P_2(\tau)$ から再構成した規格化された二次の光子相関関数 $g^{(2)}(\tau)$ (フィッティング)。
- (d) $g^{(2)}(\tau)$ の振動周波数とコヒーレンス (減衰) 時間の光入力強度依存性。

[参考文献]

arXiv:2001.0283

Y. Cao, H. Wang, Q. Ouyang, and Y. Tu, Nature

Physics **11**, 772 (2015).