高βフォトニック結晶レーザーの閾値近傍における光子統計

Photon statistics of high-beta photonic crystal lasers in a threshold region

NTT ナノフォトニクスセンタ [1], NTT 物性基礎研 [2], NTT 先端集積デバイス研 [3]
武村尚友 [1,2], 滝口雅人 [1,2], 倉持栄一 [1,2], 新家昭彦 [1,2], 佐藤具就 [3], 武田浩司 [3],
松尾慎治 [3], 納富雅也 [1,2]

NTT NPC[1], NTT BRL[2], NTT Device Technology Laboratories[3], N. Takemura[1,2], M. Takiguchi[1,2],
E. Kuramochi[1,2], A. Shinya[1,2], T. Sato[3], K. Takeda[3], S. Matsuo[3], M. Notomi[1,2]

E-mail: takemura.naotomo@lab.ntt.co.jp

近年、フォトニック結晶構造(PhC)とゲイン媒質と強く結合させることにより自然放出結合定数βを１に近づけることが可能となり、ポンプ光―光出力カーブにキンクが見られない「無閾値」レーザーが実現された[1,2]。我々の InP-PhC 共振器内に量子井戸を埋め込んだレーザーでは、室温でβ~0.05 、低温でβ~0.5 以上が達成されている（図 1(a,b)）。レーザーの閾値付近では２次の光子相関関数 $g^{(2)}(\tau)$は緩和振動に起因する減衰振動を示すことが知られているが[3,4]、この振動の物理的な詳細には未解明なものが残っており、特にβとの関連は議論されてこなかった。本研究では、我々はβが高いナノ共振器レーザーの閾値近傍での $g^{(2)}(\tau)$の振動を測定し、βの効果を考慮に入れた量子力学的なレーザーモデルを用いて理論解析を行った。実験では 3 層量子井戸（InGaAsP/InGaAs）埋め込み型の L3 共振器 PhC レーザーを CW 光で光励起し、超伝導単一光子検出器と Hanbury Brown-Twiss 干渉計を組み合わせて２次の光子相関関数 $g^{(2)}(\tau)$を測定した。室温および低温（4K）での発振閾値付近（図 1(a,b)矢印）での２次の光子相関関数の遅延時間依存性は図 1 (c,d)の通りであり、$g^{(2)}(\tau)$の遅延時間依存性には数 GHz の減衰振動が現れる。この $g^{(2)}(\tau)$の減衰振動の振動周波数 f_rは室温で 2GHz 程度、低温で 4GHz 程度となった。また $g^{(2)}(\tau)$の減衰時間 τ_rは室温で 200ps 程度、低温で 50ps 程度となった。

これらの $g^{(2)}(\tau)$の振る舞いを理解するためにゲイン媒質のダイポールを断熱消去したマスター方程式[4,5]を用いた数値計算を行った（図 1(e,f)）。観測された $g^{(2)}(\tau)$の減衰振動は共振器からの光子の減衰、自然放出、誘導放出、ポンプノイズなどの内在的な量子揺らぎによって駆動された緩和振動を相関関数として観測したものとして解釈できることが明らかになった。$g^{(2)}(\tau)$の減衰時間 τ_rは生じた揺らぎが崩壊するまでの時間として解釈できる。βを高くするとシステムサイズが小さくなるため相転移的な振る舞いを示さなくなり[5]、$g^{(2)}(\tau)$の減衰時間 τ_r をポンプ光の関数として見たときに閾値近傍での増大を示さなくなることを数値計算結果は示唆している。これは高βレーザーではゆらぎの臨界減速(Critical slowing down)が抑制されていると解釈できる。

低温と室温ではβ以外のパラメータも変化するので、βによって特徴づけられる物理を抽出するには注意が必要である。実験と理論の詳細な比較は当日議論する。

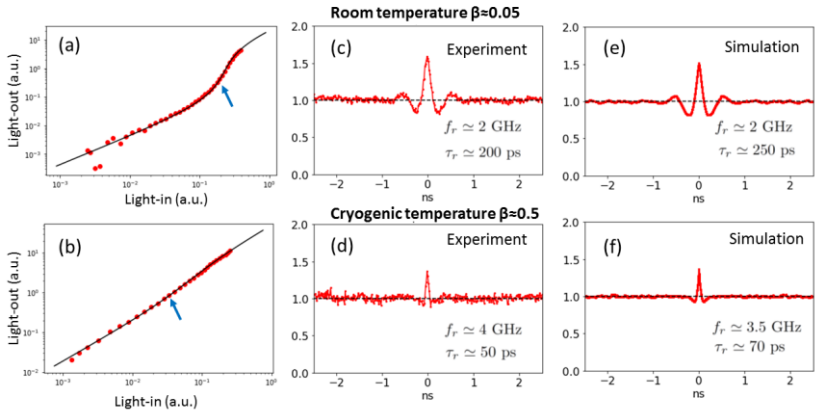

図 1：室温(a)および低温(b)で測定したポンプ光―光出力カーブ。矢印は二次の光子相関関数を測定したポンプ光強度を表す。室温(c)および低温(d) で測定した二次の光子相関関数。 二次の光子相関関数の数値計算（室温(e)および低温(f)）。

[参考文献] [1] M. Takiguchi, et al., Opt. Express **24**, 3441 (2016). [2] Y. Ota, et al., Opt. Express **25**, 19981 (2017).
[3] N. Takemura, et al., Phys. Rev. A **85**, 053811 (2012). [4] A. Lebreton, et al., New J. Phys. **15**, 033039 (2013).
[5] P. R. Rice and H. J. Carmichael, Phys. Rev. A. **50**, 4318 (1994).

© 2018年 応用物理学会