

高密度ポラリトン凝縮系の強結合状態によるレーザー発振：(2) 理論

Lasing in highly-excited exciton polaritons under strong-coupling condition: theory

東大ナノ量子機構¹, 阪大理², 国立情報学研³, 東大⁴, スタンフォード大⁵, 分子研⁶○ 上出健仁^{1,2}, 山口真², 堀切智之^{3,4,5}, 松尾康弘^{3,4}, 鹿野豊⁶, 小川哲生², 山本喜久^{3,4,5}NanoQuine Univ. Tokyo¹, Osaka Univ.², NII³, Univ. Tokyo⁴, Stanford Univ.⁵, IMS⁶ ○K.Kamide^{1,2}, M. Yamaguchi², T. Horikiri^{3,4,5}, Y. Matsuo^{3,4}, Y. Shikano⁶, T. Ogawa², Y.Yamamoto^{3,4,5} E-mail: kamide@iis.u-tokyo.ac.jp

量子井戸を含む DBR 微小共振器系では、励起子と共振器モードが強結合した励起子ポラリトンが、光や電流により注入可能 (ポンプ強度 = P) な準粒子となる。励起子ポラリトンがボース粒子であることを反映し、多数の励起子ポラリトンを共振器系に高密度注入すると、ある閾値密度以上 ($P > P_{th}^{BEC}$) でボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) することが多くの研究で実証されてきた。

$P > P_{th}^{BEC}$ ではポラリトン BEC が生じ共振器を通して外部へコヒーレントな光発振が起こる。この点において、ポラリトン BEC はレーザー発振に類似しているが、BEC に必要な条件は注入された多数のポラリトンが誘導散乱により下枝ポラリトン (LP) の最低エネルギー状態 ($k = 0, E = E_{LP}$) に落ち込むという熱平衡化条件であり、レーザー発振のような反転分布条件を必要としない。一方、この共振器系は VCSEL レーザー系そのものであり、ポラリトン凝縮の閾値よりも遥かに高い閾値ポンプ密度 $P_{th}^{LASER} (\gg P_{th}^{BEC})$ で通常のレーザー発振が生じる。

同一の系で起こる「BEC」と「レーザー発振」という二つの異なる物理現象は、しばしば励起子 (電子・正孔対) と光子の結合の強さにより、「(BEC=強結合) v.s. (レーザー=弱結合)」のように区別されてきた。レーザー発振が生じる際には電子正孔対は完全にプラズマ化し振動子強度が著しく減少するため弱結合にならざるを得ないと信じられてきたからである。しかし、最近の我々の理論研究 [1,2] により、ポラリトンの BEC 状態は、電子・正孔対が光と強結合状態を保ちながら高密度極限のレーザー発振状態へと徐々に移行し得ることが明らかになった。温度や共振器 Q 値、共振器離調によりさまざまな状況設定が考えられるが [3], 特に「低温+高 Q 値」の場合に、そのような強結合下でのレーザー発振が起こることが理論的に予想される。(我々はこれを「BCS-coupled lasing」と呼ぶ。)

近年、光パルス励起を用いた我々の実験 [4] で、 P_{th}^{BEC} の 2 桁以上高い密度を持つ励起子ポラリトン凝縮体を実現した。そこで得られた凝縮体からの発光スペクトルの特徴は、(i) 発光ピークを中心エネルギー E_M はポンプ強度の増加と共に下枝ポラリトン準位から共振器準位へとシフトする ($E_M : E_{LP} \rightarrow E_C$), (ii) 中心ピークより高エネルギー側に明瞭なサイドピーク ($E_S > E_M$) が観測され、ピーク間隔 ($\Delta E \equiv E_S - E_M$) はポンプ強度の 1/2 乗に概ね比例し増加する、というものである。発光強度の励起強度依存性や上記 (i) と (ii) の特徴は、我々の理論で得られる BEC からレーザーへの連続的移行と、二極限の中間領域で発現する「BCS-coupled lasing」の機構により説明することができる。従って、我々の観測結果は、強結合状態を保ったままレーザー発振が生じる「BCS-coupled lasing」が実現していることを、強く示唆するものである。

本講演では、一連の研究により得られた、高密度励起子ポラリトン系における強結合状態からのレーザー発振に関して、理論を中心に説明する。

[1] M. Yamaguchi *et al.*, New J. Phys. **14**, 065001 (2012). [2] M. Yamaguchi *et al.*, arXiv:1301.4838 (2013). [3] T. Horikiri *et al.*, arXiv:1211.1753 (2012). [4] T. Horikiri, M. Yamaguchi, K. Kamide, Y. Matsuo, T. Byrnes, N. Ishida, A. Löffler, S. Hofling, Y. Shikano, T. Ogawa, A. Forchel, and Y. Yamamoto, in preparation.