

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740277

研究課題名(和文) 高励起領域における励起子ポラリトンボース・アインシュタイン凝縮の研究

研究課題名(英文) Study on high excitation density exciton-polariton Bose Einstein condensation

研究代表者

堀切 智之(Horikiri, Tomoyuki)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40530275

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：励起子ポラリトン凝縮の高励起領域における研究を行った。凝縮閾値の2桁上での振舞いをフォトルミネッセンス時間分解分光により観測し、低励起時の下方ポラリトンエネルギーから高励起になるに従いブルーシフトを起こし共振器エネルギーに近づく事および新しい発光ピークが高エネルギー側に現れる事を観測した。発光の時間ダイナミクスを計算で再現するとともに、高エネルギー側にサイドバンドが現れる一方低エネルギー側に現れない理由を理論的に検討した。その結果、系の非平衡性によりサイドバンドの明るさにアンバランスが現れる事を議論し、高エネルギーピークは電子-正孔間束縛が依然存在する事の示唆と結論した。

研究成果の概要(英文)：In this study, high density exciton-polariton condensation was investigated. Photoluminescence (PL) by time-resolved spectroscopy in the regime far above condensation threshold (~100 times) was observed. PL showing lower polariton energy at low densities gradually shifted toward higher energy closing to a cavity photon energy as density goes up, and a new higher energy PL peak appeared. The PL dynamics was investigated by theoretical calculations. In addition, we studied the reason of the nonexistence of a lower energy peak which had been expected while there exists a higher energy peak and found that nonequilibrium feature of the exciton-polariton system leads to the observed unbalance in the relative brightness of sidebands. The experimental and theoretical investigations led us to a conclusion that electron-hole binding in the high density regime still seems to exist.

研究分野：量子情報

キーワード：量子光学 励起子ポラリトン ボース・アインシュタイン凝縮 半導体マイクロ共振器

1. 研究開始当初の背景

励起子ポラリトン凝縮は、その閾値を迎える励起密度近傍での研究が盛んに行われていた。一方より高励起では、励起子ポラリトンが存在しないとの見解が一般的で、半導体レーザー動作に移行するとみなされていた。

2. 研究の目的

本研究では、高励起領域に励起子ポラリトン系を励起することで、新しい知見が得られると考えた。励起子単体の場合、スクリーニングがおき励起子の乖離が起きるが、励起子ポラリトンは光の存在によって必ずしもそうではない可能性が存在したからである。

3. 研究の方法

(1)ガリウムヒ素量子井戸層をアルミニウムヒ素、アルミニウムガリウムヒ素層を重ねたブラッグ反射器からなるマイクロ共振器内に埋め込んだ試料を使用した。量子井戸を高平均パワーパルスレーザーで励起するとき発生する電子-正孔対が崩壊し光として外部にでてくるフォトルミネッセンス (PL) を時間分解分光することで系の時間発展ダイナミクスを観測する。

(2)高励起領域で電子-正孔間の束縛が消失しない場合、どのような系の振る舞いが得られるのかフォトルミネッセンス計算をする。

4. 研究成果

(1) ガリウムヒ素量子井戸励起子の束縛エネルギーはおよそ 10meV であるため、室温を含む高温では電子-正孔対の束縛が破れてしまうので、液体ヘリウムクライオスタットにて 10K 以下まで冷却して実験を行う。試料からのフォトルミネッセンスは、クライオスタット外部光学系で集光され、分光器通過後ストリークカメラにて検出される。ストリークカメラのピコ秒時間分解能によって、高励起密度の時間を切り出して観測する事ができる。

閾値より遙かに励起密度が高い領域まで到達すると、面発光レーザー動作に移行するというのがこれまでのポラリトン研究の定説であった。本研究においてはメインの PL スペクトルが共振器エネルギーに接近する通常レーザー動作と類似の特徴を示す一方、もうひとつサイドバンドとして新しい PL ピークがより高エネルギーに現れることを観測した (図 1)。図 1 は閾値の 75 倍励起領域におけるフォトルミネッセンスの時間分解分光結果で、赤点線左 (右) が低励起での下方ポラリトン LP (上方ポラリトン UP) 基底状態エネルギーに対応する。また一点鎖線は共振器エネルギーである。白点線はフォトルミネッセンス最大強度を与える時刻でそこで、2 つのピークが見えている。

これが低励起密度における上方ポラリトンとは異なる証拠に励起レーザーパワーを増加させるに従い、高エネルギーピークのブルーシフトを観測した。このブルーシフト

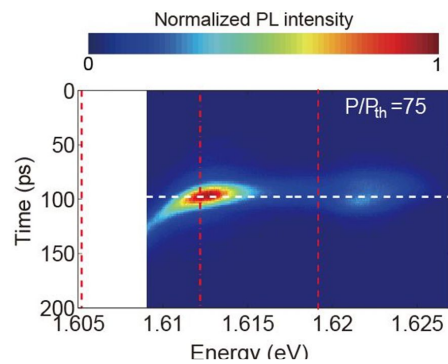


図 1: フォトルミネッセンス時間分解分光

は通常の高励起領域でのバンドギャップレッドシフトと反対の特徴であり、ポンプレーザー中心部の空間フィルタリングによる周囲の低励起領域の影響を除去したことも合わせて、高励起領域において電子-正孔-光系の強結合が依然として存在していることの現れであると考えている。

(2) 理論計算との比較検討により、高励起で Mollow triplet 様のスペクトルが見えるべきであること、しかしながら半導体中多体効果により高エネルギーサイドバンド側のみの PL 増強がされ低エネルギーサイドバンド側は弱いままであり実験的に観測されない可能性があることを導いた。また高励起領域でのメイン PL ピークエネルギーは共振器エネルギーにあり、励起密度が減少するに従い連続的に LP 基底状態へとエネルギーシフトが起きることを理論的に確認した。これらは図 1 に見えるパルス励起直後の強い PL ピークと、時間が経つとレッドシフトが起きていることに対応していると考え (外部に光が逃げることによる励起密度の減少)、パルス励起による計算をしたところ、時間的な population の減少とそれに従う PL エネルギーシフトを得ることができた (図 2)。

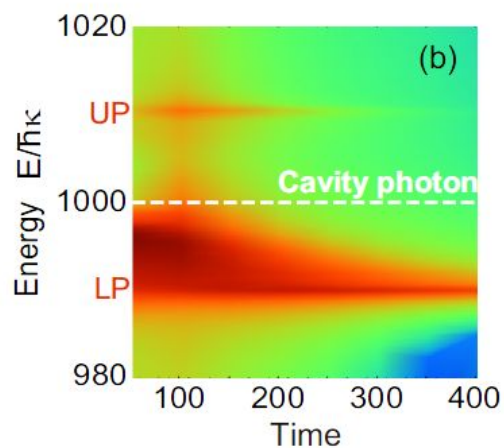


図 2: パルス励起されたフォトルミネッセンススペクトルの時間依存性計算結果

これらの結果から、励起子ポラリトンは閾値より2桁高励起領域まで励起されても必ずしも強結合状態を失うのではなく、レーザー動作への移行に代わる高励起領域での特徴が示唆される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4件)

N. Ishida, T. Byrnes, T. Horikiri, F. Nori, and Y. Yamamoto, "Photoluminescence of high-density exciton-polariton condensates", Phys. Rev. B, 90, 241304(R), (2014). 査読有。

Tomoyuki Horikiri, Yasuhiro Matsuo, Yutaka Shikano, Andreas Löffler, Sven Höfiling, Alfred Forchel, and Yoshihisa Yamamoto. Temperature Dependence of Highly Excited Exciton Polaritons in Semiconductor Microcavities. Journal of the Physical Society of Japan 82, 084709 (2013). 査読有。

半導体マイクロ共振器における励起子ポラリトン凝縮の研究：高励起領域における半導体レーザーとの違い、堀切智之、雑誌 OplusE 誌、2013年9月号。 査読無。

Tim Byrnes, Tomoyuki Horikiri, Natsuko Ishida, Michael Fraser, and Yoshihisa Yamamoto. Negative Bogoliubov dispersion in exciton-polariton condensates. Phys. Rev. B. 85, 075130 (2012). 査読有。

[学会発表](計 12件)

上出健仁, 山口真, 堀切智之, 松尾康弘, 鹿野豊, 小川哲生, 山本喜久 "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" 第74回応用物理学会秋季学術講演会 同志社大学、京都 (9月16日, 2013) 講演番号: 16p-A14-5

堀切智之, 山口真, 上出健仁, 松尾康弘, Andreas Loeffler, Sven Hoefling, 鹿野豊, 小川哲生, Alfred Forchel, 山本喜久. 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(1):実験. 第74回応用物理学会秋季学術講演会 同志社大学、京都 (9月16日, 2013) 講演番号: 16p-A14-4

Tomoyuki Horikiri, Makoto Yamaguchi, Kenji Kamide, Yutaka Shikano, Yasuhiro Matsuo, Tim Byrnes, Natsuko Ishida, Andreas Loeffler, Sven

Hofling, Tetsuo Ogawa, Alfred Forchel, Yoshihisa Yamamoto. New lasing from exciton-polariton condensates in high excitation regime. 学会: Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2013, June 30-July 4, 2013. DOI:10.1109/CLEOPR.2013.6600082, INSPEC Accession Number: 13777713

堀切智之, 励起子ポラリトン凝縮と lasing. 第10回 AMO 討論会 電気通信大学、東京 2013年6月15日

松尾康弘, 堀切智之, 楠戸健一郎, 鹿野豊, Andreas Loeffler, Sven Hoefling, Alfred Forchel, 山本喜久. ストリークカメラによる励起子ポラリトン凝縮体の二次コヒーレンスの測定. 日本物理学会第68回(2013年)年次大会 講演番号:28pEH-3、広島大学、3月28日

日本物理学会第68回(2013年)年次大会. 堀切智之, 松尾康弘, 鹿野豊, Andreas Loeffler, Sven Hoefling, Alfred Forchel, 山本喜久. 励起子ポラリトン凝縮体とレーザー発振の温度依存性. 講演番号:28pEH-4、広島大学、3月28日.

日本物理学会第68回(2013年)年次大会. 堀切智之, Tim Byrnes, 楠戸健一郎, 石田夏子, 松尾康弘, 鹿野豊, Andreas Loeffler, Sven Hoefling, Alfred Forchel, 山本喜久 "高励起ポラリトン凝縮における負の分散観測" 講演番号:29aEG-9、広島大学、3月29日

Tomoyuki Horikiri, Makoto Yamaguchi, Kenji Kamide, Yutaka Shikano, Tim Byrnes, Kenichiro Kusudo, Natsuko Ishida, Yasuhiro Matsuo, Andreas Löffler, Sven Höfiling, Tetsuo Ogawa, Alfred Forchel, and Yoshihisa Yamamoto. Photoluminescence of exciton-polariton condensates in high excitation regime, Stanford, California, USA, 2012年8月

International Conference on Atomic Physics

N. Ishida, T. Byrnes, T. Horikiri, and Y. Yamamoto. Photoluminescence of exciton polariton condensates at high densities, Palaiseau, France, 2012年7月

Tomoyuki Horikiri, Tim Byrnes,
Natsuko Ishida, Andreas Löffler,
Sven Höfling, Alfred Forchel,
Yoshihisa Yamamoto. 論文名: Direct
photoluminescence observation of the
negative Bogoliubov branch in an
exciton-polariton condensate. 学会
名: Conference on Lasers and
Electro-Optics (CLEO), 2012, May 6,
2012. ISBN: 978-1-4673-1839-6,
INSPEC Accession Number: 13060099.

Natsuko Ishida, Tomoyuki Horikiri,
Tim Byrnes, and Yoshihisa Yamamoto,
論文名: Photoluminescence
characteristics of highly excited
exciton-polariton condensates, 学会
名: Global COE International
Symposium on Secure-Life
Electronics 2012, 2.36 (2012).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀切 智之 (Horikiri Tomoyuki)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 40530275

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: