

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

半導体レーザー中の強い光・物質相互作用による発光観測

横浜国立大学大学院工学研究院の堀切智之准教授と米国スタンフォード大学の山本喜久名誉教授（現内閣府ImPACTプログラムマネージャー）らは、微小半導体レーザーからの発光スペクトルにおいて新たなピーク構造を観測し、最新理論との比較によって、従来の半導体レーザーでは消失することが定説であった光-励起子間の強結合効果が高密度下においても強く働いている可能性を見いだしました。

物理学では光共振器内で原子と光子が発光・吸収を繰り返す強結合という現象が知られています。この現象は、半導体レーザーと同じ構造を持つデバイスにおいても励起子（電子-正孔束縛対）と光子の間に生じ、励起子ポラリトンと呼ばれる複合粒子を形成します。この粒子は、多数励起されるとポラリトン凝縮と呼ばれる巨視的量子現象を起こし、さらに高い密度に到達すると、ポラリトンそのものが崩壊し従来型の半導体レーザーに転移するというのがこれまでの定説でした。今回、同じ系の高密度領域において、ポラリトン凝縮や半導体レーザーのいずれにおいても見られたことのない新たな発光スペクトルが観測されました。この結果は、高密度励起下においてもポラリトンが崩壊しない事を示唆するもので、光の存在による電子-正孔多体系の新たな物理解釈を切り開く可能性があります。

本成果は、大阪大学小川哲生グループの山口真博士、上出健仁博士、ニューヨーク大学上海校のティム・バーンズ助教授、自然科学研究機構分子科学研究所の鹿野豊特任准教授、情報・システム研究機構国立情報学研究所、ドイツ・ウルツブルク大学らとの国際共同研究により得られたもので、2016年5月19日発行のネイチャー・パブリッシング・グループの学術誌「Scientific Reports」に掲載されました。

〈掲載論文〉

【題名】 High-energy side-peak emission of exciton-polariton condensates in high density regimes （高密度領域における励起子ポラリトン凝縮の高エネルギーサイドピーク発光）

【著者】 Tomoyuki Horikiri, Makoto Yamaguchi, Kenji Kamide, Yasuhiro Matsuo, Tim Byrnes, Natsuko Ishida, Andreas Löffler, Sven Höfling, Yutaka Shikano, Tetsuo Ogawa, Alfred Forchel and Yoshihisa Yamamoto

（堀切智之、山口真、上出健仁、松尾康弘、ティム・バーンズ、石田夏子、アンドレアス・ロフラー、スヴェン・ホフリング、鹿野豊、小川哲生、アルフレッド・フォーチェル、山本喜久）

【掲載誌】 Scientific Reports

本件に関するお問い合わせ先

横浜国立大学 工学研究院 准教授 堀切智之

Tel:045-339-3356

E-mail:horikiri@ynu.ac.jp

半導体レーザー中の強い光・物質相互作用による発光観測

＜今回の成果＞

研究グループは、半導体レーザー[注1]と同じ構造をもつ半導体微小共振器[注2]において励起子ポラリトン系を用意し、励起子ポラリトンのボース・アインシュタイン凝縮(BEC)に相当する状態を作り出しました。そしてその凝縮体が形成される閾値密度よりも100倍以上の高密度まで励起に用いたレーザーのパワーを増加させることで達成しました。その結果、20倍程度から徐々に、凝縮体の発光ピークに加えてその高エネルギー側に新たな発光ピークが現れることを世界で初めて観測しました(図1)。一方で、モット密度[注3]と呼ばれる高密度凝縮体状態に到達するとポラリトンそのものが崩壊し、従来型の半導体レーザーに転移することがこれまで信じられてきましたが、その定説に従えば、ピークは1つしか現れないことになってしまいます。

高エネルギー側に現れた新しいピークと凝縮体発光ピークとのエネルギー差は電子-正孔間の束縛エネルギーに相当することが理論により示されていることから、今回の観測は、高励起密度領域においても電子-正孔間束縛効果が強く働いている強く示唆するものです。本研究では著者らが自ら提案した理論予測とともに、実験結果を説明する可能性のある他の理論との比較・検討も行いました。その結果、今回新しく発見された発光ピークが、励起子と光の強結合の存在を示すモロー3重項[注4]の振る舞いに、励起子の多体効果および共振器からのエネルギー散逸(共振器ロス)に起因した非平衡性を考慮することにより、定性的に説明できることが分かりました。

しかしながら、定量性に関しては、我々の理論によっても観測された発光ピークとは大きく異なる結果しか得られておらず、複雑な半導体中多体系の理解には、更なる研究の発展が必要であることを示しています。つまり本実験研究結果の完全な理解への道は、半導体内の物理はもとより、アルバート・アインシュタイン、サティエンドラ・ボースが予言したBEC、超伝導の起源を説明するために構築されたBCS理論を統括した多体系量子力学に対する基礎学理の確立を促す事へと繋がります。

また応用面に注目すると、励起子ポラリトン凝縮(またはポラリトンレーザー)は従来よりも低消費電力で動作する可能性から低電力消費社会への寄与を期待されています。本研究では主発光となる波長に加え、新たな波長においても強い発光動作が観測され、その波長は励起密度に強く依存して変化すること

が分かりました。つまり、従来外部共振器などを付加的に用い波長制御を行っていた波長可変レーザーに変わり、光源の小型チップのみで制御できる波長可変光源への実用化が期待できる点でも大きな成果です。

<研究背景>

1960年代前半に発振に成功したレーザーは位相や波長のそろった光を取り出す発光素子で、現在製品加工を始めとしたもの作り技術、情報通信技術、医療技術など広範囲の実社会での応用へ至っています。特に半導体レーザーは、光通信用光源やブルーレイディスクを始めとした光ディスク情報読み取り・書き込み用光源として使用されるなど、そのコンパクトさや安価性、また広範な波長を用意できる性質から身近な機器に使用されています。今日に至るまで半導体レーザーの分野において日本の研究者は世界を牽引してきました。半導体レーザーの基本的構造は渡辺寧氏と西澤潤一氏により1957年にすでに特許化されており、末松安晴氏による長距離通信用の分布帰還型レーザー、伊賀健一氏による垂直共振器面発光レーザー、荒川泰彦氏、榊裕之氏による量子ドットレーザー、さらに、2015年のノーベル賞で記憶に新しい赤崎勇氏・天野浩氏・中村修二氏らが実現に導いた青色レーザーなどにおいて大きな貢献がなされてきました。

一方、その半導体レーザーと同じ構造を用いて、基礎物理学研究も進んできました。半導体中に生じる負の電荷を持つ電子と正の電荷を持つ正孔が原子のように束縛された状態にある励起子の素過程の理解は、光合成タンパク質の理解にも繋がっています。更に、光と励起子の間でエネルギーのやり取りが効率的に繰り返し行われる状況を一つの粒子として見なし、励起子ポラリトンと呼んでいます。この物理系を用いて、同一の量子準位（エネルギーや運動量などの物理量が同じ）に多数の粒子が凝縮するBECという物理現象が盛んに研究されてきました。

この励起子ポラリトンの構成要素である励起子（電子-正孔対）は、原子を構成する原子核と電子のように対として半導体内において一定の寿命の間安定に存在するのですが、励起子の密度があまり大きくなると電子と正孔の間に他の電子または正孔が紛れ込むことが頻繁に起こり、結果として励起子間の引力が徐々に弱まり励起子という束縛された粒子としては存在できなくなるという状況があります。これはジョン・バーディーン、レオン・クーパー、ジョン・

ロバート・シュリーファーにより超伝導が弱い引力で結びついた電子によって生じるという結果を導いたBCS理論というものへの類推から、BEC-BCSクロスオーバーと呼ばれるもので、原子物理の分野で盛んに研究されてきました。

このBEC-BCSクロスオーバーは、励起子の密度が小さく電子-正孔間の束縛が強いBEC状態から密度が大きくなるに従って束縛が弱くなるBCS状態、そしてさらなる密度増加と共に束縛は消失するというのが、原子物理や励起子のみを用いたシステムで研究されてきた概念でした。理論研究の進展により、近年、励起子と光子からなる励起子ポラリトンの多体系においては従来のものと異なる結果が導かれると示唆されるようになりました。光が存在しなければ、密度が大きくなるに従って単に電子-正孔間の束縛引力が弱くなる一方であったのが、光が電子-正孔対の束縛ポテンシャルを形成し、その結果束縛エネルギーが大きくなるというのが、現在の理論では示されています。

しかしながら、そのような理論予測とは裏腹に、これまでの実験報告では、励起子ポラリトン密度を大きくすると、励起子が崩壊することにより電子-正孔プラズマへと化し、それによる従来型半導体レーザー発光へ移行することを支持する結果しか観測されることがありませんでした。一方、今回の測定において研究グループは、ドイツ・ウルツブルク大学で作成された非常に高品質なサンプルを用いて実験が行われたため、理論の予測に従う今回の結果が得られたものと考えられます。

〈謝辞〉

本研究は、最先端研究開発支援プログラム (FIRST)、科学研究費補助金、東レ科学振興会、KDDI財団、中部電気利用基礎研究振興財団などの支援によって行われました。

〈添付資料〉

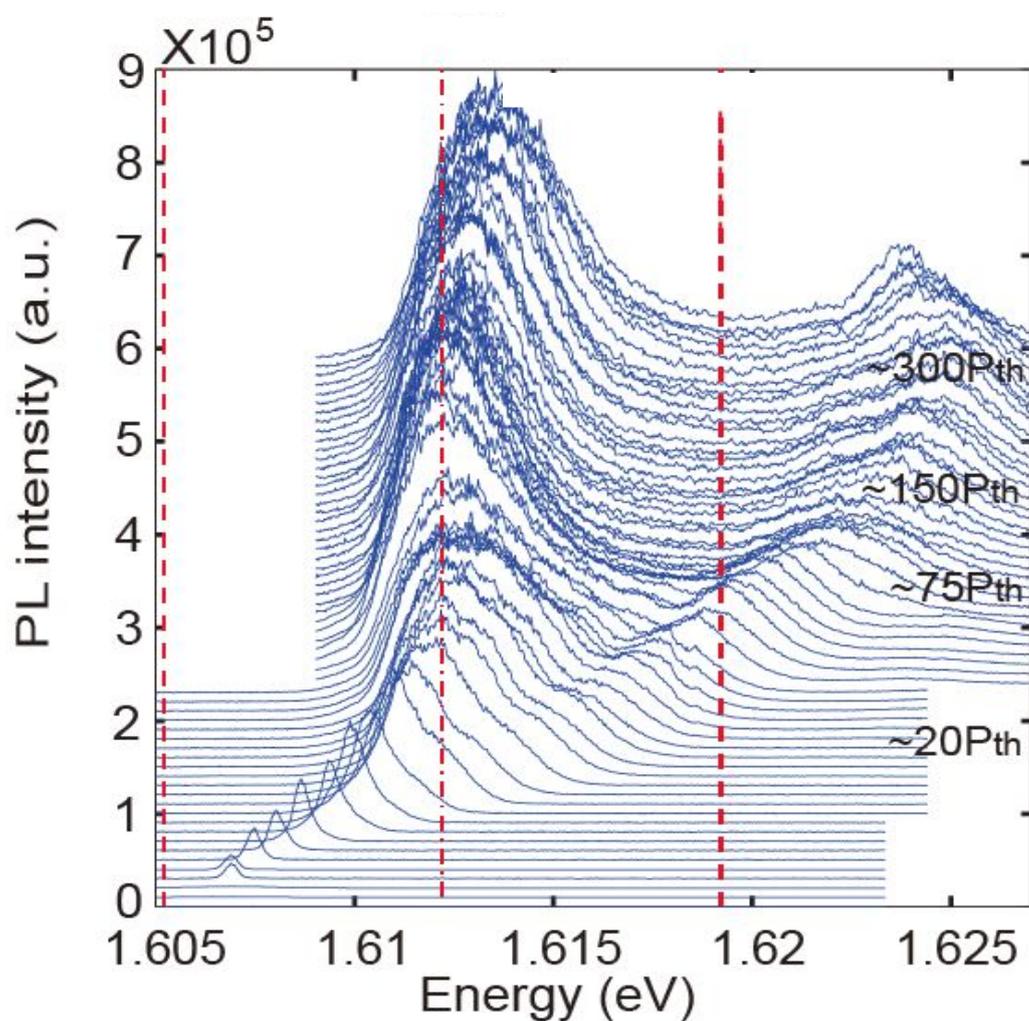


図1：発光強度およびエネルギー（波長）の励起レーザーパワー依存性。
図中のPthは凝縮体に相転移するレーザーパワーを示している。20Pth程度から
高エネルギー側に新たなピークが現れており、励起レーザーパワーが大きくな
るにつれて、高エネルギー側にシフトしている事が分かる。

<用語解説>

[注1] レーザー

光を閉じ込める光共振器（二対の鏡）の中で、励起された利得媒質からの光の誘導放出を増幅し、位相のそろった光（コヒーレント光）を取り出す装置。利得媒質として半導体を用いた半導体レーザーは、電気から光へのエネルギー変換効率が高く波長選択性も広いため広く利用されることとなりました。

[注2] 半導体微小共振器

屈折率の異なる半導体の積層構造を鏡として用い、特定の波長をもつ光のみを閉じ込め大きな電場振幅をもつように設計されたもの。光の閉じ込めサイズ（共振器長と呼ばれる）は光の波長である1マイクロメートルの程度です。この微小共振器内部に別の半導体媒質を挿入し、そこでの励起子と閉じ込め光子が等しいエネルギーを持ち共鳴する場合に、コヒーレントなエネルギーのやり取りが生じるため新たな複合粒子が形成されます。このように励起子と光子が強く結合してできた複合粒子は、励起子ポラリトンと呼ばれています。

[注3] モット密度

半導体内に多数の励起子（電子-正孔束縛対）が生成され高密度になると励起子同士が空間的に重なり始め互いに影響し始めます。励起子密度が励起子ボア半径（今回用いられたガリウムヒ素では13ナノメートル程度）の3乗の逆数と同程度かそれより高くなるとそのような効果が見られることとなります。この密度はモット密度と呼ばれており、モット密度以上に高密度励起された半導体キャリアは、互いの遮蔽効果などにより電子と正孔を束縛状態としてつなぎとめる力が弱められ、自由キャリアのように振る舞うと考えられています。そのような多数の電子-正孔系は電子・正孔プラズマと呼ばれています。

[注4] モロー3重項

一つの原子（基底状態と励起状態からなる2準位系）がその遷移エネルギーに共鳴するレーザー光を照射されるときに、原子により散乱された光は周波数的に分離した3つのスペクトル成分を持つことが知られています。量子光学によれば、散乱スペクトルにおける3つの成分は、レーザー光によりエネルギーシフトを受け分離した着衣状態間の発光遷移として理解することができ、これをモロー3重項と呼びます。今回の実験においても、電子・正孔系が共振器内に形成されたコヒーレント光（凝縮成分）により駆動されていると考えれば、類似の現象が見られることは決して不自然ではありません。