

# 励起子ポラリトン系のBEC-BCS-LASER クロスオーバー理論

山口 真 (大阪大学大学院理学研究科)

小川 哲生 (大阪大学大学院理学研究科)

半導体に適当な波長のレーザー光(励起光)を照射すると、価電子帯の電子は伝導帯に励起され(図L1)、励起電子とその抜け孔である正孔は、Coulomb力により励起子と呼ばれる束縛状態を形成する。この励起子は光を放出して再結合し、その光が再び励起子を生成する。このような過程で形成される励起子と光子の複合準粒子は励起子ポラリトンと呼ばれる。GaAsやCdTeなどの材料系の結晶成長技術の進展により図L2のように鏡に相当する2つの層(微小共振器)の間に半導体量子井戸をサンドイッチした系が作られ、そこでの励起子ポラリトンの振る舞いが注目されている。この系では、半導体の励起子のエネルギーに相当する光は鏡の間に閉じ込められ、いわゆるキャビティ(共振器)状態になっている。(山本喜久ら:日本物理学会誌第67巻第2号「解説」参照。)この系に励起光を照射すると励起子ポラリトンの密度が増えていくが、その過程で励起子ポラリトンを構成する電子、正孔、光子は、お互いの相互作用に起因して様々な興味深い特徴を示す。

まず、密度が増えてくると熱平衡統計力学に基づいて励起子ポラリトンのBose-Einstein凝縮(BEC)が起こる。この変化により、観測される発光強度は大きく増大する。この点は第1閾値と呼ばれる。さらに密度を上げていくと、再度、光強度が急激に増加する領域—第2閾値—が存在する。従来、この第2閾値は、励起子ポラリトンの構成粒子である励起子が電子と正孔に解離することで、非平衡状態である半導体レーザーへ移行する現象と解釈されてきた。しかしながら、励起子の解離によって非平衡性を生じるといふ論理には必然性がない。このため、第2閾値の起源としては、冷却原子系でも話題になっているように、熱平衡状態を維持したまま電子や正孔のFermi

粒子性が高密度領域で顕在化し、これらが“Cooper対”を組んで凝縮している可能性、つまり、Bardeen-Cooper-Schrieffer(BCS)状態のような秩序相が生じている可能性も指摘されてきた(図L3)。

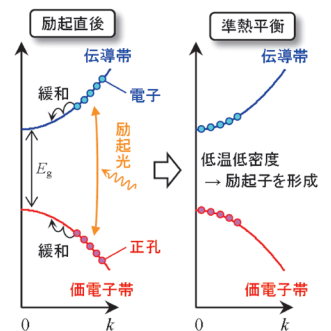
これまで第2閾値について多くの実験的な検証が行われてきたが、その起源については統一的な見解は得られていなかった。その理由の一つには、電子や正孔の束縛対の形成や解離といった物理を含み、かつ、熱平衡領域から非平衡領域にまでわたるBECやBCS状態、半導体レーザーを統一的に記述できる理論が存在しなかったことが挙げられる。そこで我々は最近、系を準熱平衡とみなせる状況ではBCS理論に、非平衡性が重要となる状況ではMaxwell-Semiconductor-Bloch方程式(半導体レーザーを記述できる方程式)に帰着する理論を提案した。

この枠組みに基づいて解析を行うと、BECからBCS状態や半導体レーザー発振にいたる諸状態を一つの枠組みで記述でき、これらの関係性を明らかにすることができる。その結果、現在知られている実験では、確かに励起子ポラリトンBECは非平衡領域である半導体レーザーへ連続的に移行し、これにより第2閾値が生じていることが分かった。さらにその場合には、第2閾値においては励起子の解離が生じるわけではなく、束縛対の形成機構が変化していることが明らかになった。

これらの結果は、今回提案した統一的な理論の重要性を示しているだけでなく、今後、密接な関連をもつ高温超伝導や冷却原子系などの研究分野に新たな知見を与える可能性も秘めている。また、熱平衡領域とそれから遠い非平衡領域をつなぐという意味において、非平衡統計力学などへの領域を超えた波及効果も期待される。

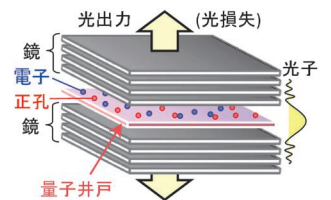
—Keywords—

**半導体の励起と熱化:**  
励起光により生成された電子と正孔は速やかにバンド内緩和し、それぞれのバンド内では見かけ上、熱平衡状態ができる。この状態が低温低密度であれば、電子と正孔は励起子を形成する。

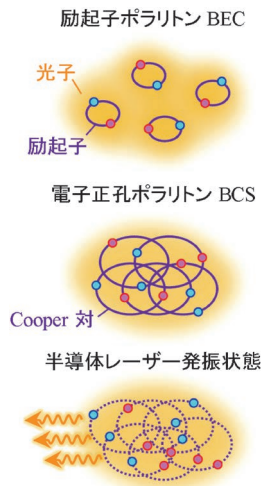


図L1 励起と熱化の概念図。

**励起子ポラリトン系:**  
2つの鏡の間に閉じ込められた光子と量子井戸中に閉じ込められた電子、正孔により励起子ポラリトンが形成される。



図L2 励起子ポラリトン系。



図L3 秩序相の概念図。