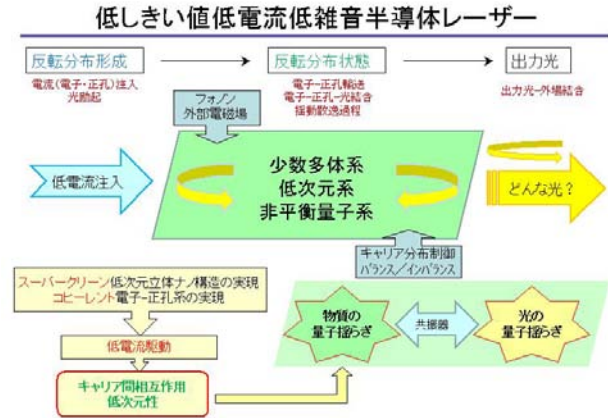


## 半導体レーザーの動的電子相関理論

小川 哲生 (阪大理)

【目的】半導体中の光学過程や輸送過程における動的電子相関効果を取り入れた応答理論を構築し、それを半導体レーザーに適用することによって、従来の現象論や自由電子近似に代わる新しい半導体レーザー理論体系を整備する。この理論によって、動的電子相関効果と低次元性とが織りなして創り出す新しいレーザー機能を予言・設計し、特に A02 班が実験的に研究するレーザーの動作解析や物理計測と比較する。学理として、励起状態にある非平衡多粒子系の量子応答理論の定式化と深化に寄与し、電子-正孔-フォノン系と電子-正孔-フォノン-光子系での量子コヒーレンス形成の類似と相違を明らかにし、動的電子相関を用いて物質コヒーレンスと光コヒーレンスを制御・設計するための指導原理を確立する。具体的には、低しきい値で低電流駆動する低次元半導体レーザーの量子力学的性質を、反転分布状態（電子-正孔系）の動的電子相関効果を含めて解明する。そのために、(A) 準静的性質：準熱平衡状態にある反転分布での動的電子相関効果を微視的に考究して、反転分布の量子・熱揺らぎ特性や光学利得発生機構を明らかにし、(B) 動的性質：光励起法および電流注入法によって生成される非平衡定常状態にある反転分布とそこでの量子多体相関の形成・崩壊のダイナミクスを追跡し、(C) 光の性質：反転分布と混成した共振器光子場および外部出力光子場の量子コヒーレンスと揺らぎ・雑音特性を解明する、という 3 項目の研究目標を定める。これらを統合して、反転分布状態の動的電子相関効果を取り入れ、低次元半導体レーザーを量子統計力学的かつ定量的に記述するような、一電子近似を超えた理論を、実験結果と照らし合わせながら構築する。JST-CREST において、半導体量子細線での光学利得形成における動的電子相関効果の重要性について、A02 班の秋山グループの実験と付き合わせながら理論計算を進めてきた実績がある。それを量的にも質的にもさらに拡張する。



### 【計画】

#### (1) 光学利得発生機構と利得スペクトル形状の解明と数値計算

遮蔽ハートリーフォック近似での光学利得形成理論を一步越えて、自己無撞着T行列近似および動的平均場近似での吸収・利得スペクトルの数値計算を行う。自己エネルギーの虚部の情報から、吸収・利得スペクトルの「幅」や「形状」の起源を解明し、フォノンなどの熱浴による緩和と動的電子相関による「緩和」のダイナミクスの差異を明らかにする。これによって、利得スペクトル形状の起源を解明する。本年度は、擬1次元系と3次元系の数値計算を進める。A02班のT型量子細線レーザーの実験との比較も行う。

## (2) 量子化された光子場と結合した半導体Maxwell-Bloch方程式理論の構築

従来のレーザー理論は、二準位原子との結合を仮定したMaxwell-Bloch方程式をその基礎においている。本年度は、これを2つの方向に拡張する。一つは結合している光子場を量子化すること。他方は物質系を二準位系の集合体から動的電子相関効果が重要な電子正孔系とすること。後者のためには、その第一歩として、遮蔽ハートリーフォック近似を用いる。

## (3) 励起子凝縮、ポラリトン凝縮、レーザー発振のクロスオーバーの解明

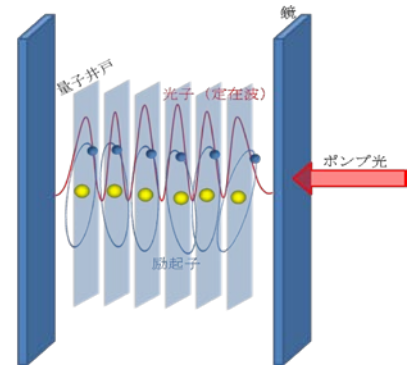
**背景:**近年、半導体微小共振器における励起子ポラリトン凝縮とそのコヒーレント発光が確認された。このポラリトン凝縮では通常のレーザー転移と同様に発光強度が急激に増加するポンプ強度閾値が存在する一方で、光子同時相関関数  $g^{(2)}(0)$  が熱輻射( $g^{(2)}(0)=2$ )からコヒーレント光 ( $g^{(2)}(0)=1$ )へ減少するような閾値が観測されていない。この光子統計における揺らぎが「物質+光」系特有の量子揺らぎに起因している可能性がある。

**目的:**半導体微小共振器における励起子ポラリトン凝縮からの発光やその性質、ポラリトン凝縮とレーザー発振状態との関係を明らかにすることである。そのための第一ステップとして閉じた(散逸の無い)電子正孔-光子系における「基底状態」を理解する。

**理論手法:**共振器に閉じ込められた光子とクーロン相互作用する電子正孔系との双極子結合系を平均場近似により解析した。光子場の平均場と Comte-Nozieres [Comte and Nozieres, J. Phys. (Paris) **43**, 1069 (1982)]が励起子に対し用いた変分波動関数を採用し、励起密度一定・エネルギー最小の条件から、励起密度やデチューニング  $\delta$  バンド端から測った光子準位、バンド幅の関数として「基底状態」を決定した。

**結果:**「基底状態」における一励起当たりのエネルギー  $\varepsilon = E_{\text{tot}}/N_{\text{ex}}$  を励起密度の関数として得た。ただし、考察している系において保存される総励起数  $N_{\text{ex}}$  は“光子数+電子正孔系の励起数”で与えられる。励起密度の増加(平均粒子間隔  $R_s$  の減少)に従い、 $\varepsilon$  は単一励起子準位( $-\varepsilon_0$ )から光子準位より小さなある値まで移り変わる。低密度では励起子 BEC-BCS クロスオーバーの理論に従い、密度が増加し  $\varepsilon$  が光子準位に近づくと励起子系とは異なるポラリトン系固有のものに変化し光子準位に近づく。つまり、ポラリトン凝縮の性質が低密度から高密度にかけてワニエ励起子からフレンケル励起子を経由して光子のものへとクロスオーバーしてゆく。実際、得られた分極場の波動関数に関してもこのようなクロスオーバーが確認された。

**考察と展望**—発光の性質がデチューニングの選び方に強く依存することが予想される。そこで、現在までに得られたポラリトン凝縮の「基底状態」とその発光の閾値や統計的性質との関連を明らかにするのが今後の課題である。さらに、光が散逸する開放共振器系でのポラリトン凝縮系を定式化し、ポンピングと散逸とが物質系と光子系のコヒーレンス形成に与える影響も明らかにする。



## 参考文献

- [1] P. Huai, H. Akiyama, Y. Tomio, and T. Ogawa, Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) L1071.
- [2] K. Kamide and T. Ogawa, J. Phys.: Conf. Ser. (in print).