

「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」

平成 14 年度採択研究代表者

秋山 英文

(東京大学物性研究所 助教授)

「量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明」

1. 研究実施の概要

MBE とへき開再成長法による構造均一性の極めて高い半導体量子細線を用いて、量子細線レーザーを作製し、低発振閾値や高微分利得などの実証を行うことを目指している。電流注入レーザーの作製評価、光励起をもちいた詳細なレーザー発振特性・発光利得吸収スペクトルなどの評価計測を行うとともに、キャリア間相互作用を取り入れた量子細線レーザーの発振理論および反転分布状態の量子力学的性質を研究してきた。最終 19 年度は、理論および利得吸収スペクトル測定実験の完成と対比、物理機構の解明、量子細線レーザーの低しきい値化を進める。

2. 研究実施内容

2つのタイプの電流注入 T 型 GaAs 量子細線レーザー、すなわち電子を T 型量子細線のアーム井戸から正孔をステム井戸から注入する従来のスキーム(アーム・ステム電流注入)と、アーム井戸の両側から電子と正孔をそれぞれ注入する新しいスキーム(アーム・アーム電流注入)のレーザー試料の評価を行った。アーム・アーム電流注入型の電流注入レーザーでは、30-70K にわたる温度領域で良好なシングルモード発振が得られ、30K において発振しきい値電流が 0.27mA と小さく、低温ではあるがこれまで報告された T 型量子細線の結果よりも低しきい値を得た。また、SiO₂と金を蒸着して得た高反射コートにもかかわらず、12%という比較的高い微分量子効率も得られ、内部ロスが非常に小さいことが示唆された。アーム・ステム電流注入レーザーは、5-110K までの広い温度範囲で良好なシングルモード発振が得られた。これは T 型量子細線としては最高温度での発振である。一方、しきい値電流は 100K で最低となり、その値は 2.1mA とやや高かった。さらに、電流注入の様子が顕微 EL イメージング計測により明らかになった。19 年度は μ A レベルの超低しきい値レーザー発振を目指す。

T 型量子細線レーザーの発振機構や 1 次元多体電子正孔系の基礎物理を理解する目的で進めてきた光励起 T 型量子細線レーザーの低温物理計測では、透明キャリア密度の近傍では、励起子分子と励起子の分布反転による利得が発生していることがわかり、利得の発生が必ずしも励起子モット転移と同じではないことが明らかになった。T 型ドーパ量子細線の光学応答計測では、一次元状態密度の観測、フェルミ端付近のクーロンエンハンスメントの欠如の観測、トリオンバンド間

遷移クロスオーバーの観測、KMS 関係式に基づく電子温度の評価などが達成された。18 年度に小川チームにおいて進められたクーロン相互作用をハートリー・フォックレベルで取り入れた理論計算の結果と、これらの実験結果の比較検討を進め、最終 19 年度には微視的理解を達成させる。

東工大の荒井チームの作製する長波長帯量子細線の評価計測を行う共同研究を開始した。とくに、ドライエッチング埋め込み再成長によって作製された InGaAsP 系単一量子細線の低温顕微 PL 計測に成功し、PL 線幅や PL 強度の評価が達成された。19 年度は、単一量子細線レーザーの利得や吸収、内部ロスの評価を進め、量子細線レーザーの低しきい値化につなげる。

18年度の理論的研究は、2つの方向性・目標をもって推進してきた。一方は、物理学の基礎的立場から低次元半導体を見直し、新しい理論手法を導入・開発しながら、従来の光物性物理学では見過ごされてきた重要な現象や新効果・新パラダイム発見の可能性を探索する方向性である。他方は、応用に展開可能な理論的研究を心がけながら、複雑な現象を整理することができる半現象論的・半微視的な近似理論を駆使し、レーザー過程の定量的な考察と理解を目指す方向性である。前者の研究では、レーザー反転分布状態である「電子-正孔系」における諸現象に、電子相関やクーロン相互作用がいかなる効果を及ぼしいかなる重要性を担っているかを明らかにするために、ソフィスティケートされた理論的手法を導入して研究を進めて、実際の系をさらにモデル化した理論模型(たとえば2バンドハバード模型)を用いた。後者の研究では、実際の対象系がT型量子細線であることを考慮し、「擬」1次元系であることを取り入れ、半導体を記述するのに従来用いられてきた弱相関連続モデル(有効質量近似モデル)で研究を進めてきた。これにより、バンド構造やキャリアの有効質量などの実験との定量的比較が可能になり、レーザー発振条件やさらにレーザー光の性質を理解する研究を進めた。

17年度までに、純粋1次元高密度電子-正孔系の絶対零度における電子状態は、「ボゾン化法」と「繰り込み群法」を用いた解析によってほぼ解明された。しかし、これらは適用できる温度が絶対零度に限られ、低密度極限へ連続的につなぐことができない手法であるため、厳密数値対角化法と動的密度行列繰り込み群法(DDMRG)を用いて、有限温度で任意密度の1次元電子-正孔系を考察しつつある。プログラムはまだ未完成であるが、完成に近づいている。

並行して、18年度、低密度領域すなわち励起子気体相での光学応答を計算できる新しい理論を構築した。これは、従来から用いられてきた「半導体ブロッホ方程式」型の電子-正孔ハートリー・フォック理論が高密度領域からの接近手法であったのに対して、まったく逆の低密度領域側からの接近手法である。この理論を用いて、レーザー発振に至るまでの弱励起領域の励起子気体相の特徴の解明する数値計算をスタートさせた。近似の次数を系統的に上げることが可能で、それによって、非線形光学応答や励起子分子効果も考察できるようにしたい。

他方、高密度側からの接近理論である電子-正孔ハートリー・フォック近似計算も行い、非常に多くの計算データが蓄積された。この理論によって、擬1次元高密度電子系での有限温度の効果と(光照射によって生じた)束縛状態との関連、および吸収及び発光スペクトルの粒子濃度依存性が系統的に数値的に明らかになった。

擬 1 次元電子-正孔系の低次元性の特徴は、高次元電子-正孔系の特徴を比較することによ

てよりいっそう際だってくる。そこで、高次元系からのアプローチである動的平均場近似法を2バンドハバード模型に適用することにより、高次元(3次元系)での電子-正孔系の量子状態の理解を進めてきた。動的平均場理論と厳密対角化法とを併用し、高次元極限での電子-正孔系の「相図」を、任意の粒子密度で描くことに成功し、吸収と発光スペクトルの計算結果も得ることができた。また、自己無撞着T行列近似を用いて電子-正孔「対凝縮」の状態を解明したが、励起子モット転移と「対凝縮」との関連を明確にするために、動的平均場近似の拡張版を開発して量子凝縮とモット転移の両方を取り扱う考察が必要である。2次元電子-正孔系やクーロン相互作用の長距離性をも議論し、より実験との比較が進められるような展開も視野に入れ、セル型動的平均場理論などの量子クラスター理論へも手を広げる。

3. 研究実施体制

(1)「秋山」グループ(実験グループ)

①研究者名

秋山 英文(東大物性研 助教授)

②研究項目

- ・光励起量子細線レーザーの作成とその特性
- ・電流注入量子細線レーザーの作成とその特性
- ・ゲート付き変調ドープ量子細線・光スイッチ
- ・顕微光学測定システムの開発

(2)「小川」グループ(理論グループ)

①研究者名

小川 哲生(大阪大学 教授)

②研究項目

- ・擬1次元高密度電子-正孔系の量子状態と光学過程の理論的研究

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- T. Unuma, K. Kobayashi, A. Yamamoto, M. Yoshita, K. Hirakawa, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, Y. Iye, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama
"Collective and single-particle intersubband excitations in narrow quantum wells selected by infrared absorption and resonant Raman scattering" Phys. Rev. B 74, 195306 (2006).
- Masahiro Yoshita, Yuhei Hayamizu, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West
"Exciton-plasma crossover with electron-hole density in T-shaped quantum wires studied by means of the photoluminescence spectrograph method" Phys. Rev. B 74, 165332 (2006).
- H. Tajima, K. Shimatani, T. Komino, S. Ikeda, M. Matsuda, Y. Ando, H. Akiyama

- "Light-emitting diodes fabricated from biomolecular compounds" *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects* 284, 61-65 (2006).
- H. Tajima, K. Shimatani, T. Komino, M. Matsuda, S. Ikeda, Y. Ando, H. Akiyama
"A voltage-induced transition of hemin in BIODI (biomolecular light-emitting diode)"
Bulletin of the Chemical Society of Japan 79 (4), 549-554 (2006).
 - Katsuhiro Takao, Kensuke Fujii, Hayato Miyagawa, Masaichiro Mizumaki, Osami Sakata, Noriaki Tsurumachi, Hiroshi Itoh, Naoto Sumida, Shunsuke Nakanishi, Hidefumi Akiyama and Shyun Koshiba
"Growth of GaNAs/GaAs Multiple Quantum Well by Molecular Beam Epitaxy Using Modulated N Radical Beam Source"
Jpn. J. Appl. Phys. 45, No. 4B, 3540-3543 (2006).
 - H. Yaguchi, T. Morioke, T. Aoki, H. Shimizu, Y. Hijikata, S. Yoshida, M. Yoshita, H. Akiyama, N. Usami, D. Aoki, K. Onabe
"Photo-induced improvement of radiative efficiency and structural changes in GaAsN alloys"
Phys. Stat. Sol. (c) 3, 1907-1910 (2006).
 - Y. Tomio and T. Ogawa
"Exciton Mott transition and pair condensation in electron-hole systems: Dynamical mean-field theory"
AIP Conference Proceedings 850, 1313-1314 (2006).
 - T. Ogawa
"Theory of photoinduced phase transitions: From semiclassical to quantum aspects"
Solid State Phenomena 112, 21-38 (2006).
 - T. Ogawa, A. Ishikawa and S. Saito
"Full quantum-mechanical treatment for spatiotemporal dynamics of electrons and holes in a quantum wire coupled to a thermal reservoir"
J. Lumin. 119, 188-192 (2006).
 - P. Huai and T. Ogawa
"Absorption and gain spectra of optically excited semiconductor quantum wires: Effects of Coulomb correlation and screening"
J. Lumin. 119, 468-472 (2006).
 - Y. Tomio, K. Honda and T. Ogawa
"Excitonic BCS-BEC crossover at finite temperature: Effects of repulsion and electron-hole mass difference"
Phys. Rev. B 73, 235108 (2006).
 - Y. Endo, K. Tanioka, Y. Hijikata, H. Yaguchi, S. Yoshida, M. Yoshita, H. Akiyama, W. Ono, F. Nakajima, R. Katayama, and K. Onabe

"Micro-photoluminescence study of nitrogen delta-doped GaAs grown by metalorganic vapor phase epitaxy" *Journal of Crystal Growth* 298, 73-75 (2007).

- K. Tanioka, Y. Endo, Y. Hijikata, H. Yaguchi, S. Yoshida, M. Yoshita, H. Akiyama and K. Onabe

"Micro-Raman study on the improvement of luminescence efficiency of GaAsN alloys"
Journal of Crystal Growth, 298, 131-134 (2007).

- Makoto Okano, Shu-man Liu, Toshiyuki Ihara, Hirotake Itoh, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Kenneth West, and Oana Malis

"Temperature-dependent current injection and lasing in T-shaped quantum wire laser diodes with perpendicular p- and n-doping layers" *Appl. Phys. Lett.* 90, 091108 (2007).

- Shu-man Liu, Masahiro Yoshita, Makoto Okano, Toshiyuki Ihara, Hirotake Itoh, Hidefumi Akiyama, Loren Pfeiffer, Ken West, and Kirk Baldwin

"Low-threshold Current-injection Single-mode Lasing in T-shaped GaAs/AlGaAs Quantum Wires" *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, L330-L332 (2007).