

「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を研究してきた。今後は、理論の完成を目指しそれを応用するとともに、試料の高品質化、高温動作化を行い、物理機構の解明を進める。

2. 研究実施内容

電流注入 T 型 GaAs 量子細線レーザーの作製のため、昨年に引き続き、海外研究協力者のベル研・ファイファー博士の分子線エピタキシー (MBE) 結晶成長装置の基礎試料評価、P 型カーボンドーピングの条件出し、(110)面上の MBE 成長アニール条件のチューニングを進め、研究室内で、エッチング、段差測定、金属電極蒸着、アニール、ダイボンディングなどのプロセスが全て行えるよう研究環境整備を進め、絶縁膜の形成プロセスを除きそれらが完了した。絶縁膜の形成は、装置がないので米国・ベル研究所へ出張して行うこととした。大学院学生・研究員にも、プロセス・評価技術を習得してもらい、細線へ効率よくキャリアを注入するためのドーピングの最適化やオーミックコンタクトの取り方を改善しながら、チームをあげて電流注入レーザー作製と評価に取り組んだ。試料構造としては、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 2通りの試料を試みた。その結果、今年度2月に初めて、アーム・アーム電流注入型の試料から、電流注入レーザー発振を観測した。発振は、良好なシングルモード発振であり、発振しきい値電流も 0.3mA と小さく、低温ではあるがこれまで報告された他の量子細線の結果と比べて最も低しきい値となっている。その後、IV 評価、IL 評価にくわえ、様々な光学計測も行い、発振しきい値はまだ大幅に改善の余地があることが示されている。今後、詳細な物理計測、論文発表とともに、試料をさらに改良してゆくことが重要である。

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やドープT型量子細線の物理計測は、今年度も、著しい進展があり、キャリア濃度に依存した利得吸収発光スペクトルの変化に関する非常に多くの新しい実験データを取得できた。T型量子細線レーザーを利用した導波路透過実験により、単一量子細線の光吸収スペクトルを取得することに成功し、励起子共鳴できわめて強い吸収が観測できたほか、一次元室温励起子吸収も観測できた。

17年度後半に、東工大の荒井チームが作製している長波長帯量子細線及び量子細線レーザーの評価計測を行う共同研究を開始した。荒井チームの試料は、界面ラフネスなど均一性に関しては改善の余地があるものの、すでに室温連続レーザー発振を達成し、実用に最も近い注目度の高い量子細線レーザーであり、評価計測の重要性が極めて高まっている。我々の得意とする顕微分光評価の手法を1.5 μm 通信波長帯に拡張しT型量子細線と同様な評価計測を展開すれば、また、小川チームの理論の対象としても含めることにより、当初計画していた以上の実りある成果が期待できる。秋山チームでは、1.5 μm 帯の光源や検出系などの設備がまだ十分ではないので、18年度予算をそこに投入しつつ、重点的に研究を進める。1.5 μm 帯の発光強度の定量評価システムを立上げ、量子閉じ込め効果の評価、偏光依存性の評価を行い、利得吸収スペクトルの取得を目指す。

平成17年度の理論的研究は、大阪大学でのJST研究員2名を中心として、2つの大きな研究テーマを掲げて研究を推進した。理論的研究成果の一つ目は、平成16年度から引き続いて推進しているテーマで、3次元電子-正孔状態の相図の解明と光学応答スペクトルの計算である。これは、半導体レーザー発振を生じる物質系の量子状態の解明であり、「レーザー反転分布状態」を量子力学的立場から微視的に理解することに相当する。方法論としては、動的平均場理論(DMFT)と数値厳密対角化法とを併用し、電子-正孔系の相図を描き、キャリア間相互作用に対してどのような依存性を示すかを明らかにした。その結果、金属相(電子-正孔プラズマ)と絶縁体相(励起子・励起子分子気体)の間の励起子 Mott 転移が1次相転移であることを発見し、その転移線を確定した。さらに有限温度での相図も得ることができた。平成18年度は、その相図の各点での吸収スペクトルと利得スペクトルを計算し、レーザー発振過程の理解へ近づく。また、極低温においては量子対凝縮相が存在するが、それが発現する臨界温度も、自己無撞着T行列近似(SCTMA)を用いて理論的に決定した。高密度(弱相関)のBCS領域と低密度(強相関)のBEC領域の2つの極限の移り変わり(クロスオーバー)を統一的立場から理解することができた。

理論的研究の二つ目は、秋山チームのT型量子細線に即した理論計算である。擬1次元電子-正孔系の光学応答(吸収スペクトル、発光スペクトル、利得スペクトル)を有限温度で計算し、秋山チームの実験結果と比較しながら、現象の起源と相互作用との関連を探る研究である。ハートリー-フォック近似を基に、粒子間のクーロン相互作用を2次まで取り入れる切断近似を行っている。これに関しても、任意のキャリア濃度と有効温度に対して、光学スペクトルが得られ、利得が発生する濃度(半導体レーザーでの「透明電流」に相当する)の温度や細線T形状との関連も明らかになった。実験結果との比較を行っている途中である。また、平成16年度から継続的に、純1次元電子-正孔状態の高密度極限からの理論的考察も継続している。ボゾン化法と繰り込み群法を用いて、

長距離クーロン相互作用と後方散乱効果を取り入れた考察を展開しつつある。平成 17 年度から開始した密度行列繰り込み群法(DMRG)による数値計算は、当初の想定よりも難しく進まず、平成 18 年度が正念場である。平成 18 年度も、レーザー発振の理解へとつながる「光学応答」の解明を中心に研究を進める。解析的結果を詳しく調べるために数値的手法も併用し、数値計算手法に長けた 2 名の研究員は、数値計算に従事してもらう。

3. 研究実施体制

「秋山」グループ（実験グループ）

①研究分担グループ長：秋山 英文（東京大学物性研究所、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ブ量子細線・光スイッチ
- 顕微光学測定システムの開発

「小川」グループ（理論グループ）

①研究分担グループ長：小川 哲生（大阪大学大学院理学研究科物理学専攻、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. 主な研究成果の発表

(1) 論文（原著論文）発表

- Yasushi Takahashi, Yuhei Hayamizu, Hirotake Itoh, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West,
"Room-temperature excitonic absorption in quantum wires"
Appl. Phys. Lett. 87, 223119 (2005)
- Yasushi Takahashi, Yuhei Hayamizu, Hirotake Itoh, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West,
"Strong photo-absorption by a single quantum wire in waveguide-transmission spectroscopy"
Appl. Phys. Lett. 86, 243101 (2005)
- Loren N. Pfeiffer, Kenneth W. West, Robert L. Willett, Hidefumi Akiyama, and Leonid P. Rokhinson,
"Nanostructures in GaAs Fabricated by Molecular Beam Epitaxy",
Bell Labs Technical Journal 10, 151-159 (2005).
- M. Yoshita, and H. Akiyama
"Improvement of interface quality in cleaved-edge-overgrowth GaAs quantum wires based

on micro-optical characterization”

Progress in Nano Electro-Optics IV, Characterization of Nano-Optical Materials and Optical Near-Field Interactions, edited by M. Ohtsu (Springer Series in Optical Sciences Vol. 109, Jan. 2005), pp. 43–82.

- H. Tajima, S. Ikeda, K. Shimatani, M. Matsuda, Y. Ando, J. Oh, and H. Akiyama,
“Light-emitting diodes fabricated from cytochrome c and myoglobin”,
Synthetic Metals 153, 29–32 (2005).
- S. Ikeda, H. Tajima, M. Matsuda, Y. Ando, and H. Akiyama,
“External quantum efficiency and electroluminescence spectra of BIODÉ (biomolecular light-emitting diode) fabricated from horse-heart cytochrome c”,
Bulletin of the Chemical Society of Japan 78, 1608–1611 (2005).
- K. Shimatani, H. Tajima, T. Komino, S. Ikeda, M. Matsuda, Y. Ando, and H. Akiyama,
“The electroluminescence spectrum of chlorophyll a”,
Chemistry Letters 34, 948–949 (2005).
- Yoriko Ando, Hidefumi Akiyama, Kazuki Niwa, Hidehiro Kubota, and Yoshihiro Ohmiya,
“Bioluminescence quantum-yield measurements with modern semiconductor photo-detectors”,
Recent Progress of Bio/Chemiluminescence and Fluorescence Analysis in Photosynthesis,
eds. by Naohisa Wada and Mamoru Mimuro, (Research Signpost, Kerala, India, 2005), pp. 79–100.
- 秋山英文, 安東頼子, 丹羽一樹, 近江谷克裕, 久保田英博,
“溶液発光の定量測定 –ホタルの発光量子収率–”,
分光研究 54, 309–310 (2005).
- K. Asano and T. Ogawa,
“Instability toward biexciton crystallization in one-dimensional electron-hole systems”
Journal of Luminescence 112, 200–203 (2005).
- Y. Tomio and T. Ogawa,
“Phase diagram for the exciton Mott transition in infinite-dimensional electron-hole systems”
Journal of Luminescence 112, 220–224 (2005).
- T. Ogawa, Y. Tomio, and K. Asano,
“Dynamical mean-field theory for the exciton Mott transition in electron-hole systems”
Journal of Physics: Conference Series 21, 112–117 (2005).