

「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へき開再成長および成長中断アニール法を用いて、超平坦界面をもつT型量子細線およびT型量子細線レーザーを作製しその性質を研究した。細線の断面寸法が14nm×6nmである単一あるいは20周期の量子細線レーザー構造に対して、顕微透過実験による吸収スペクトル測定、キャシディ法による吸収利得測定、時間分解発光寿命計測などを行い、理論との比較検討を行った。さらに、n型に変調ドーピングを行ったドーピング単一量子細線構造にゲートを付けてキャリア濃度を制御するFET型の構造についても、発光および発光励起スペクトル測定を行い、1次元量子細線中の多体効果について研究を進め、これも理論との比較検討を行った。また、超平坦GaAs(110)表面の形成過程を詳しく理解して試料作製に生かすために、アニール条件などを変化させた試料を作製し、広い試料範囲に渡ってAFMおよび顕微PL画像・スペクトルの測定を行い、さらに第一原理計算による理論計算も展開して比較し、原子ステップパターン形成モデルを得た。

新しい試料作製とその評価も進めた。電流注入量子細線レーザー発振にむけて、pn接合を形成し電極形成プロセスを進めることにより、発光ダイオード(LED)動作を確認するところまで到達した。これに関して、電極蒸着やエッチング、段差測定、アニーリングなどプロセス装置の導入・改良や技術の向上も進めた。また、常温レーザー発振に向けて、細線の周期を100周期や3周期に変えた細線レーザー試料や、GaAs細線の寸法を5nm×5nmにまで細くしてAlAsで囲んだ閉じ込めの強い単一量子細線、ドーピングの設計を変えたFET型量子細線試料の作製も行った。現在、それらの評価が進行中である。

2. 研究実施内容

本研究は、高品質の量子細線レーザーを作製し、低発振閾値電流や高微分利得などの超高速・超省電力に直接結びつく高性能化の実証を行い、量子細線レーザー発振の起源・特性および擬1次元系高密度電子・正孔状態での多体電子相関とそれが引き起こす光学過程の新効果・新現象を、実験と理論の両面から明らかにすることを目的としている。

今年度は、電流注入量子細線レーザー発振にむけて、pn接合を形成し電極形成プロセスを進めることにより、量子細線の発光ダイオード(LED)動作を確認するところまで到達し

た。これに先立って、金属電極蒸着、エッチング、段差測定、アニーリングなどの試料プロセスを行うためのプロセス装置の購入・開発・改良とプロセス技術の向上と、IV評価、IL評価、電流電圧端子付クライオスタットヘッドなど電流注入デバイスの評価システムの開発も進めた。さらに、ベル研(クロフォードヒル)の1.5 μ m帯光通信デバイス研究グループに、研究代表者の秋山と大学院生が1-4週間滞在し、結晶成長・プロセス・評価を習った。

一方、量子細線の常温レーザー発振に向けて、細線の周期を100周期や3周期に変えた細線レーザー試料を新たに作製した。来年度、細線の本数に対する温度特性の変化を調べることで、より高温でのレーザー発振のための指針を得ようと企んでいる。GaAs細線の寸法を5nm \times 5nmにまで細くしてAlAsで囲むことで閉じ込めを強めながらもPL線幅がシャープとなる様な単一量子細線、ドーピングの設計を変えたFET型量子細線試料の作製も行った。現在、それらの評価が進行中である。

また、超平坦GaAs(110)表面の形成過程を詳しく理解して試料作製に生かすために、MBE成長やアニールの条件などを変化させた薄膜試料を作製し、広い試料範囲に渡ってAFMおよび顕微PL画像・スペクトルの測定を行い、さらに第一原理計算による理論計算も展開して比較し、原子ステップパターン形成モデルを得た。

今年度は、断面寸法が14nm \times 6nmである単一および20周期の光励起量子細線レーザーの物理計測において、幾つかの重要な成果が得られた。

まず、断面寸法が14nm \times 6nmで長さが0.5mmであるたった1本の量子細線による光吸収を低温で測定することに成功した。実験は、単一量子細線レーザー構造に対し、顕微導波路透過実験、すなわち、量子細線レーザー試料の一端から、顕微光学系を用いて外部光を結合効率24%で結合し、反対側の端面からの出射光を検出した。その結果、励起子吸収ピークでは、98%の光が吸収されてしまうほど強い光学遷移が起きていることが確かめられた。また、同様の測定を20周期量子細線レーザーに対して行うことにより、世界ではじめて、室温一次元励起子吸収の観測に成功した。

また、キャシディ法という巧緻な手法を用いることにより、量子細線レーザーがキャリア濃度の増大とともに吸収スペクトルが非線形に変化し、やがて利得へと変化してゆく様子を、観測することに成功した。また、n型変調ドーピングを施してさらにゲートを付けてキャリア濃度を制御できるようにしたFET型のドーピング単一量子細線構造について、散乱光や迷光を極力低減することにより発光励起スペクトル測定を綺麗に取得することが出来るようになった。これらの結果は、1次元量子細線中の多体効果についての極めて重要なデータであり、量子細線レーザーの発振機構を理解する上で貴重な情報となる。これらのデータについて、現在、理論グループと検討作業を進めている。

さて、本研究プロジェクトにおける理論研究のターゲット系は、プロジェクト発足当初より2つ存在する。一つは、擬1次元空間における高密度電子-正孔系、他方は、擬1次元空間における高密度電子系(金属あるいはドーピングされた半導体)である。いずれも、それらの電子基底状態のみならず、電子励起状態を理解しながら、線形・非線形光学応答現象を解明し予測しなければならない。その際に、「擬1次元系」であることの特徴を浮き彫りにするために、純粋な1次元系や2次元

系あるいは高次元系の研究も並行して進め、同時に純粋な1次元系の数学的理論をも併用して、解析を進めている。

今年度までに、擬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、高密度極限から接近する方法である「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。その結果、絶対零度の1次元電子-正孔系では「励起子Mott転移」と呼ばれる絶縁体→金属転移が生じないことが明らかになった。また、励起子分子の相関が重要であることも指摘された。しかし、温度が絶対零度に限られていることと低密度極限へ連続的につなぐことができない手法を用いていることが問題として残っている。

今年度のチーム活動状況としては、6月に1泊2日のプロジェクト研究会を大阪大学で開催し、セミナー兼勉強会を軽井沢と大阪大学とで2回行った。秋と春の日本物理学会へ参加して両チームの成果発表と議論を行い、加えて秋山・小川はJST-CREST会議の機会を利用してバーチャルラボ他チームとの議論を行った。この他、本プロジェクトチームで不足している実験技術や知識を補う為に、米国ルーセントベル研アレフ・チョールドウェー博士を1週間ほど招聘し、セミナーと研究討論を行った。来年度は、理論と実験の比較検討が一層重要になると思われるので、連携・協力活動をさらに強化する方針である。

3. 研究実施体制

秋山研究グループ（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 量子細線レーザーの作製とデバイス特性計測

小川研究グループ（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) 論文発表

- H. Akiyama, M. Yoshita, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "One-dimensional excitonic states and lasing in highly uniform quantum wires formed by cleaved-edge overgrowth with growth-interrupt anneal", J. Phys. Condensed Matter 16, S3549-S3566 (2004).
- J-W Oh, M. Yoshita, Y. Hayamizu, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Micro-photoluminescence characterization of local electronic states in a (110) GaAs quantum well fabricated by cleaved-edge overgrowth", J. Appl. Phys. 96, 6370-6374 (2004).
- Akira Ishii, T. Aisaka, J-W Oh, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and

- K. W. West, "Formation mechanisms of monolayer pits having characteristic step-edge shapes on annealed GaAs (110) surfaces",
Thin Solid Films 464-465, 38-41 (2004).
- T. Unuma, K. Kobayashi, A. Yamamoto, M. Yoshita, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, Y. Iye, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama,
"Intersubband electronic Raman scattering in narrow GaAs single quantum wells dominated by single-particle excitations",
Phys. Rev. B, 70, 153305 (2004).
- T. Ogawa and A. Ishikawa:
Theory of phase-separation dynamics in high-density electron-hole systems
Journal of Luminescence 108, 263-268 (2004).
*再掲載 (巻号頁確定のため)
- O. Sakai and T. Ogawa:
Study on the cooperative photoinduced low-spin to high-spin state conversion processes
Photoinduced Phase Transitions, ed. by K. Nasu, (World Scientific, Singapore, 2004), pp.117-159.
- Tetsuo Ogawa:
Quantum states and optical responses of low-dimensional electron-hole systems
Journal of Physics: Condensed Matter 16, S3567-S3595 (2004).