

「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、超平坦界面をもち、1本の細線の断面寸法が14nm×6nmである、20周期T型GaAs細線レーザー試料に対し、PL励起強度依存性測定、利得の測定、時間分解発光寿命計測などを試み、理論との比較などを行った。さらに、細線の断面寸法は同じで、周期だけを1周期に減らした単一細線レーザー試料、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、同種の計測と、発光励起スペクトル測定を行った。

レーザー試料の測定からは、キャリア濃度の増加とともに励起子が、励起子分子や電子正孔プラズマ状態へ移り変わってゆく際のスペクトル変化に関して、従来の励起子モット転移の考え方とは異なるような特徴が見出された。すなわち、スクリーニングにより励起子束縛エネルギーが減少してプラズマ状態が形成されるのではなく、散乱により励起子状態や連続状態の準位の幅が広がり混ざり合ってプラズマ状態が形成される様子が観測された。また、このプラズマ状態の中では励起子分子的な相関が強く残っていることも理論との比較検討で明らかになった。ドーピングした試料の発光励起スペクトル測定からも、プラズマ状態形成の過程をしめす量子細線で初めての測定データが得られつつある。

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、光学計測については、従来技術に加えて、数mmの距離をサブ μm ステップ刻みで自動直線走査計測を行う顕微PL計測、励起と検出の光軸と偏光をともに直交配置に選んだ高SN顕微PLE計測、低温顕微透過計測、3方向顕微光学系の組合せによる吸収・利得計測、シャックリー法・ハッキ・パオリ法・キャシディ法などを用いたレーザーの利得吸収スペクトル測定、時間相関光子計数法を用いた時間分解発光寿命計測、広範囲顕微画像計測、絶対光量評価計測などが可能になった。スキャンピエゾ素子の改良に

より数百 μm の広範囲に対する AFM 計測が可能になり、試料設計数値計算も細線試料の基底状態だけでなく励起状態に対する計算が可能となった。

MBEへき開再成長および成長中断アニール法を用いて、超平坦界面をもち、1本の細線の断面寸法が $14\text{nm} \times 6\text{nm}$ である、20周期T型GaAs細線レーザー試料に対し、上記の光学計測を行い、理論との比較などを行った。さらに、細線の断面寸法は同じで、周期だけを1周期に減らした単一細線レーザー試料、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、同種の計測を行った。

PL励起強度依存性測定利得測定からは、キャリア濃度の増加とともに励起子が、励起子分子や電子正孔プラズマ状態へ移り変わってゆく際のスペクトル変化に関して、従来の励起子モット転移の考え方とは異なるような特徴が見出された。すなわち、スクリーニングにより励起子束縛エネルギーが減少してプラズマ状態が形成されるのではなく、散乱により励起子状態や連続状態の準位の幅が広がり混ざり合っただけでプラズマ状態が形成される様子が観測された。また、このプラズマ状態の中では励起子分子的な相関が強く残っていることも理論との比較検討で明らかになった。ドーピングした試料の発光励起スペクトル測定からも、プラズマ状態形成の過程をしめす量子細線で初めての測定データが得られつつある。

理論研究としては、擬1次元高密度電子-正孔系の電子状態を、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」を用いて解析した。その結果、1次元電子-正孔系の特徴として、粒子数密度を増加していった際に3次元系では従来存在すると信じられてきた「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、多数の励起子分子がクーロン相関を持ちながら液体状態になっていることが明らかになった。

また、1次元性の特徴を明らかにするためには、2次元以上の高次元系との比較が重要である。高次元での電子-正孔系の量子状態も満足のいく理解は得られていないので、1次元系の解明と併せて、高次元系の研究も進めている。これまでに、高次元系からのアプローチである動的平均場近似法を用いた研究の部分的成果が得られた。2サイト動的平均場理論という手法を用いて、高次元極限での電子-正孔系の「相図」を描くことに成功した。これによって、励起子Mott転移が、電子-電子斥力（正孔-正孔斥力）と電子-正孔引力の大きさにどのように依存するか、さらに粒子数密度依存性、電子と正孔の有効質量依存性などが明らかになってきた。

今後、上記の1次元電子正孔プラズマの形成メカニズムは、レーザー発振のゲインメカニズム理解の鍵になると思われる。次年度以降は、あらたなFET型量子細線や、100周期程度の多周期量子細線レーザー、電流注入型の量子細線レーザーの作製のための試料構造の設計・テスト試料の作製、などを行う。

今年度のチーム活動状況としては、研究チーム全体としての協力体制を確立する為に、5月に1泊2日のプロジェクト研究会を物性研究所で開催したほか、秋山チームと小川チーム間で研究者を送り合っただけで（或いは呼び出して）行った研究打合せを4回行い、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2回のJST会議の機会も利用してバーチャルラボ他チームとの議論を行った。これらの結果、秋

山・小川チームで初めて共著で論文投稿をするに至った。この他、本プロジェクトチームで不足している数値計算法・実験技術・知識を補う為に、英国ケンブリッジ大シマンツカ博士を約1ヶ月間、米国ルーセントベル研M. J. マシューズ博士を約1週間ほど招聘し、セミナーと共同研究活動を行った。これらの結果、シマンツカ博士との共著論文が完成し学術雑誌掲載された。

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（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

著書名	発表論文タイトル	掲載誌名	巻号頁	発行年
M. Yoshita, Y. Hayamizu, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West	Fabrication and microscopic characterization of a single quantum wire laser with high uniformity	Physica E	230-235	2004-2
J. W. Oh, M. Yoshita, H. Itoh, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West	Carrier Diffusion on Atomically Flat (110) GaAs Quantum Wells	Physica E	Vol. 21 689-691	2004-1

Y. Takahashi, S. Watanabe, M. Yoshita, H. Itoh, Y. Hayamizu, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West	Imaging of emission patterns in a T-shaped quantum wire laser	Appl. Phys. Lett.	Vol. 83 4089-4091	2003-10
H. Itoh, Y. Hayamizu, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, M. H. Szymanska, and P. B. Littlewood	Polarization-dependent photoluminescence-excitation spectra of one-dimensional exciton and continuum states in T-shaped quantum wires	Appl. Phys. Lett.	Vol. 83 2043-2045	2003-9
M. Yoshita, J. W. Oh, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West	Control of MBE surface step-edge kinetics to make an atomically smooth quantum well	J. Cryst. Growth	Vol. 251 62-67	2003-6
A. Ishii, T. Aisaka, J-W Oh, M. Yoshita, H. Akiyama	Low and anisotropic barrier energy for adatom migration on a GaAs (110) surface studied by first-principles calculations	Appl. Phys. Lett.	Vol. 83 4187-4189	2003-12
小川哲生 石川陽	Theory of phase-separation dynamics in high density electron-hole systems	Journal of Luminescence		2003

(2) 特許出願
無し