

## 研究課題別事後評価結果

### 1. 研究課題名：量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明

### 2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

秋山 英文 (東京大学物性研究所 准教授)

主たる共同研究者

小川 哲生 (大阪大学大学院理学研究科 教授)

### 3. 研究内容及び成果

本研究の目標は、界面揺らぎの少ない均一なへき開再成長 T 型量子細線レーザーを研究代表者らが開発した成長中断アニール法を用いて作製し、低発振閾値電流や高微分利得など、超高速・超省電力に直接結びつく優れた性能を実証するとともに、1次元電子系に特有の物性やデバイス特性の解明・理解をすることである。実際の量子細線レーザーの性能決定要因を解明し、発振の起源や性能限界を知るには、「結合状態密度の次元依存性」だけの単純な考察では不十分であり、電子-正孔系や多電子系の電子間相互作用と電子状態の低次元性に着目した高度な理論を構築し、これと実験結果とつき合わせながら行うことが必須であると考え、実験と理論の2チームからなる体制で研究を推進した。

(秋山グループ)

20本の細線からなる電流注入 T 型 GaAs 量子細線レーザーにおいて、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た。発振しきい値電流が 30K で 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。12%という比較的高い微分量子効率も得られた。0.27mA のしきい値電流は 1本あたり 14  $\mu$ A に相当する。0.5mm の細線の長さ、30K の温度、約 0.4ns のキャリア寿命に対して Yariv の理論予測を適用すると約 10  $\mu$ A となり、低温ながら当初の理論予測が原理的に検証できた。

ドープしていない量子細線を光励起してレーザー発振させた実験では、多体的効果を中心に多くの基礎的な物理の解明が進んだ。低温での蛍光励起スペクトル(PLE)測定において、1次元系特有のゾンマーフェルト因子を実証する 1次元連続状態の吸収スペクトルを得た。励起強度に依存する蛍光(PL)測定から、キャリア濃度に応じた 1次元励起子、励起子分子、電子正孔プラズマ状態の間のクロスオーバー現象を明らかにした。導波路発光のハッキ・パオリ・キャシディー解析より、量子細線の励起強度に依存する吸収利得スペクトルやその温度変化を取得した。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を明らかにした。1次元励起子吸収の大きな非線形性を得た。量子細線の光透過吸収実験に成功し、励起子吸収ピークで 80/cm の大きな吸収係数を得た。また、室温でも励起子吸収ピークが明確に表れることを確かめた。

ゲート付ドープ T 型単一量子細線を用いた実験では、ゲート電圧の印加により 1次元電子ガス濃度を大きく変化させ発光と吸収のスペクトルを取得した。1次元状態密度を反映したスペクトル形状や、高濃度領域では多体効果の寄与が意外に小さいことなどが明らかになった。また、荷電励起子(トリオン)とバンド間遷移との間のクロスオーバー現象を観測した。

試料の高品質化の鍵となる成長中断アニール法と平坦化に関しても、条件の許容幅、平坦化範囲、メカニズムが明らかになった。東工大荒井チームのエッチング埋め込み再成長 InGaAsP 系単一量子細線の低温顕微 PL 計測に成功し、PL 線幅や強度の決定要因などを明らかにした。

(小川グループ)

低次元半導体を対象とした新効果・新パラダイムの探索のため、純粋 1次元高密度電子-正孔系の絶対零度

における電子状態を、「ボゾン化法」と「繰り込み群法」を用いた解析によって解明した。この手法は、絶対零度の高密度領域ではほぼ厳密に正しいため、これ以降に行った種々の近似理論や数値計算の「基準結果」となった。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。そこで、厳密数値対角化法と動的密度行列繰り込み群法(DDMRG)も用いて、有限温度で任意密度の1次元電子-正孔系を考察した。ボゾン化法は高密度側で正しい理論であるのに対応し、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も構築した。この理論を用いて、弱励起領域の励起子気体相の特徴を解明する数値計算を行った。レーザー反転分布状態が励起子気体なのか電子-正孔プラズマ状態なのかは、利得波長や利得形成の機構に大きな違いを生み出すことを示している。

素子応用を志向し、半現象論的・半微視的近似理論を用いたレーザー過程の定量的考察も行った。特に、高密度側(電子-正孔プラズマ状態を仮定している)からの接近理論である電子-正孔ハートリー-フォック近似計算を行い、擬1次元高密度電子系での有限温度の効果や(光照射による)束縛状態との関連に加え、吸収及び発光スペクトルの粒子濃度依存性を数値的に明らかにした。擬1次元系での利得形成の特徴、クーロン相互作用が利得形成に及ぼす影響も初めて定量的に解明した。また、同レベルの理論手法を用いて、電子をドーブにより導入した量子細線の光学応答も数値的に研究し、トリオン束縛状態を取り入れた従来理論と本理論との対比を行った。特に、ドーピング量を0から連続的に増大させた場合の光学スペクトルの特徴的变化を統一的に解明することができた。さらに、高次元系からのアプローチである動的平均場近似法を2バンドハバード模型に適用し、高次元(3次元系)での電子-正孔系の量子状態の解明を進めた。これを用いて、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、反転分布状態の粒子数密度を変えたときの金属-絶縁体転移(励起子モット転移)を精査した。また、自己無撞着T行列近似を併用して、低温における電子-正孔「対凝縮」状態を解明し、励起子のボーズ-アインシュタイン凝縮と電子-正孔のBCS類似状態との関係や違いを明らかにした。クーロン相互作用の長距離性も、拡張動的平均場理論を用い、実験との比較を系統的に行える方向に拡張している。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

本研究は、へき開面上へ再成長するという独特な量子細線の形成手法を高度化し、界面揺らぎの少ない均一なT型量子細線レーザーを作製して評価する実験的研究と、電子-正孔系や多電子系の電子間相互作用と電子状態の低次元性を同時に取り入れた高度な理論的研究とを補完的に進めた。これにより、1次元電子系に特有の光物性とデバイス特性の解明と制御の基盤を築いた。

これらの成果は、投稿論文が英文68件/和文0件、口頭発表が国際会議14件/国内会議80件、ポスター発表が国際会議35件/国内会議39件として纏められ、国内外に積極的な発信を行った。なお、招待講演は国際会議8件/国内会議8件である。一方特許は、共同研究企業との連名の関連出願が3件であり、十分に多いとはいえないが、物理機構の解明に中心をおいた基礎的研究であることを考えると、妥当な状況である。

中間評価の段階では実現できていなかったが、T型細線レーザーの電流注入による単一モード発振に成功した。当初計画では、室温での発振も目標としたが、キャリアの閉じ込めの弱さのために高温発振には至らなかった。実用デバイスの実現という観点では不十分な面を含むが、プロセスの改善と素子構造上の工夫により、電流注入によるT型量子細線レーザーを実現し、その特性解明の研究により、計画を上回る成果を達成し、量子細線レーザーの学術基盤の確立に大きな貢献をなした。顕微光学測定手法の開発もほぼ予定通りに進んだ。一次元電子・正孔系におけるキャリア相関など、多体を考慮した理論は、実験との対比を可能とし、一連の新知見を与えている。これらの成果は細線レーザーの実用化に必須の基礎的知見を与えるものであり、大きな成果である。

#### 4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

高品質の量子細線に対し光物性の系統的測定を進めるとともに、1次元系の光物性の基礎理論を確立して、両者の徹底的な対比を行い、量子細線レーザーの物理基盤を構築した点は高く評価できる。特に、本プロジェクトで開発したプロセスにより極めて高い均一性を持つ一連の量子細線構造の作製が可能とし、独自に開発した計測技術をこれに適用して、量子細線構造の吸収・利得・発光特性を系統的に明らかにした。こうした実験結果を、キャリア間のクーロン相互作用を考慮に入れた理論解析と詳細に比較し、レーザー発振に至るメカニズムを解明するとともに、素子設計の指針を与えており、光物性の研究としても、レーザー素子の研究としても、大きなインパクトを持つ成果と言える。研究成果の今後のさらなる展開としてここで得られたレーザーの基礎科学に関する新しい視点や計測技術は、各種のナノ細線の光デバイス応用の今後の発展の基盤となるものであり、超高速・超省電力性を持つデバイスの研究開発や実用化に大きく寄与すると思われる。本研究の対象としたT型量子細線は寸法揺らぎが小さく物性計測に最適であるが、閉じ込めが弱いため、室温動作が難しい欠点を持つ。従って、現実的なデバイス応用という点では、他の細線と比較して劣るが、それを十分にカバーするだけの物性科学と素子物理面での貢献があったと言える。

#### 4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

実験中心の秋山グループと理論中心の小川グループが、密接な連携関係を保ち、研究を大きく前進させた。また、研究の全期間を通してベル研究所との共同研究を進め、試料作成の負担と研究費を軽減し研究を効率的に進めた。さらに、研究期間の後半には、異なる作成手法で量子細線を作成し、実用化に重点をおいて研究を進めている荒井チームとの共同研究を行い、相互に有益な知見を得たことも高く評価できる。

受賞については、(1) 小川哲生、丸文研究奨励賞(丸文研究交流財団)、研究課題「低次元物質の光励起状態と光学応答に関する理論的研究」(2004年3月)、(2) 池田真吾、田島裕之、松田真生、安東頼子、秋山英文、2005年日本化学会論文賞(BCSJ Award)、“The External Quantum Efficiency and Electroluminescence Spectra of BIODE (Biomolecular Light-emitting Diode) Fabricated from Horse-heart Cytochrome c”, Bull. Chem. Soc. Jpn., 78, 1608-1611 (2005).、(3) Yoriko ANDO、Marlene DeLuca Prize for Young Scientists, for the oral presentation of “Quantitative luminescence yield spectra of firefly bioluminescence”, in 14th International Symposium on Bioluminescence and Chemiluminescence, 15-19 Oct 2006, at San Diego, 2006.10.19. が挙げられる。