

戦略的創造研究推進事業
ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ
研究領域「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・
システムの創製」

研究課題「量子細線レーザーの作製と
デバイス特性の解明」

研究終了報告書

研究期間：平成14年11月～平成20年3月

研究代表者： 秋山 英文
(東京大学物性研究所 准教授)

1 研究実施の概要

本研究で目標としたことは、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我々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高性能を実証すること、そして、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を理解し発振の起源や性能限界を知るためには、「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-正孔系および多電子系の電子間相互作用と電子状態の低次元性などに着目した高度な理論的研究を実験結果とつき合わせながら行うことが極めて重要であると考え、実験と理論の2つの研究チームからなる研究体制を構築した。研究の基礎部分においては、ナノ細線構造の制御を進めてさらに強い量子閉じ込めと電子相関を実現することまでを狙い、ラッティンジャー流体、電荷-スピン分離、ウィグナー格子、多励起子ストリング状態、パリエルス不安定性など 1 次元系特有の物理効果や、これらの新しい物理機構を用いた光学現象を制御しながら引き出し新しい量子細線構造非線形光学素子の創製を実験的・理論的に追求する方針で臨んだ。また、量子細線レーザーの精密な物理計測を行うための顕微分光計測手法の開発も特に必要で、しかも、開発する計測手法は量子細線レーザーに限らずナノ構造一般に適用可能であるため、開発した手法・装置はシステム・製品として普遍性をもった形にまで高め応用を広げてゆくことも目指し、秋山チームには企業(アト株式会社)からの参加者も含めた。

研究対象の試料作製には我々が開発した成長中断アニール手法(100 μm 以上の広い領域にわたって 1 原子層レベルの凸凹も無いほどの超平坦な界面の作製法)を MBE へき開再成長法に組み合わせて用いた。これにより、発光線幅が 1meV 以下で従来よりも約一桁以上シャープな高品質の試料が得られ、1 次元電子相関効果の定量的研究の対象になった。それぞれの試料は、有限要素法計算に基づくナノ構造設計、結晶成長、プロセス、さらに評価を繰り返しながら作成した。結晶成長は、すでに信頼しうる協力関係が築かれている米国ベル研究所のファイファー博士らの結晶成長グループの協力を得て、秋山らがそこに実際に滞在してレーザーウエハーの作製をおこなった。結晶成長後の、半導体レーザーの電極プロセスや、レーザーバーへき開、ダイボンディングなどの加工は、秋山チーム内の大学院生と研究員とで全て行えるように、加工装置の整備や加工方法の開発を行った。作製された試料に対して、様々なレーザーデバイス評価と、顕微分光・画像計測や利得特性の測定などを行いながら、以下で述べるとおり、実験研究と理論的考察を並行して進めた。

スタート時に立案した上記の研究目標・構想に加えて、中間評価の際に領域総括およびアドバイザー委員から助言をいただいて、3年目からは、東工大荒井教授のチームで研究している 1.5 μm 通信波長帯のエッチング再成長量子細線および量子細線レーザーについても、低温 PL 評価、物理計測、特性評価などを担当項目として共同研究を開始した。

電流注入 T 型 GaAs 量子細線レーザーについては、2つのタイプ、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。ここでアーム井戸とは T 字の横棒に相当する井戸、ステム井戸は縦棒に相当する井戸のことである。その結果、20 本の T 型細線からなる平行 p-n 層を有するアーム・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。この 0.27mA のしきい値電流は、1 本あたりに直すと 14 μA となる。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 μA であり上記の値にとっても近いことが解る。今回得られた結果は、低温においてではあるが当初の理論予測を原理的に検証したと言える結果である。他にも、発光および発振スペクトル、IV 特性、IL 特性、しきい値電流と外部量子効率、それらの温度依存性など、詳細な物理計測が達成できた。一方、

15本のT型細線からなる垂直p-n層を有するアーム・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。

電流注入型のレーザーは、外部電場の効果や、p型とn型のキャリアのアンバランスによって生じる電荷の効果など、複雑な効果の影響が存在するため、レーザー発振機構や高密度電子正孔系の基礎物性を調べるには困難が伴う。そのため、ノンドープのレーザー構造試料に対する光励起による実験が重要となる。

ノンドープ光励起量子細線レーザーとしては、14nm×6nm寸法の量子細線をそれぞれ、1本、3本、20本、100本有する量子細線レーザーを作製し、評価・物理計測を進めた。光励起量子細線レーザーの低温顕微PL・PLスキャン・PLE評価から、線幅1.3meV以下、ストークスシフト0.3meV以下の量子細線が20μm以上連続に続くような高品質量子細線が得られていることが確かめられた。さらに、低温PLE測定において、1991年に小川らが理論的に予言した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。さらに、励起強度依存PL測定から、キャリア濃度とスペクトル形状の関係をj得て、1次元における励起子、励起子分子、電子正孔プラズマのクロスオーバーが明らかになった。

光励起レーザー発振特性に関しては、細線での発振しきい値が井戸よりも低いこと、シフトが小さいこと、単一モードで発振しやすいことなどが明らかにされた。顕微画像計測により、発光及び発振光の近視野像が得られた。レーザーの動作温度は、1本のレーザーで最高60K、20本のレーザーで最高120Kであった。

導波路発光に対してハッキ・パオリ・キャシディーの解析方法を用いることにより、量子細線の吸収および利得スペクトルを取得することに成功した。利得スペクトルの温度変化も得られている。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。光-光スイッチングに有用な1次元励起子吸収の大きな非線形性や、様々な手法を用いてなされた理論計算と比較可能な利得発生領域での光学利得吸収スペクトルが得られた。

ゲート付ドープ量子細線については、ゲート電圧の印加により1次元電子ガス濃度を0から $6 \times 10^5/\text{cm}$ 程度まで大きく変化させ、発光と吸収の両方のスペクトルを取得することに成功した。低濃度領域での1次元荷電励起子の挙動が明らかになり、高濃度領域では1次元電子状態密度を明確に反映したスペクトル形状、多体効果の寄与が意外に小さいこと、バースタイン・モス・シフトの様子が明らかになった。さらに、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。

これらの実験結果については、後述する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の比較検討により微視的理解が達成されつつある。レーザーの透明キャリア密度の計算に関しては、ハートリー・フォックレベルの理論計算結果は自由粒子モデル計算の結果と大きく異なることは無かったが、レーザー中のピーク利得値のキャリア密度依存性に関しては両者は大きな違いを示した。クーロン相互作用が存在すると、しきい値近くでは、ピーク利得のいわゆるクーロン増強効果が現れるが、キャリア密度を上げてゆくと利得スペクトル形状の変化に伴ってピーク利得の抑制効果が出現することが解った。この一次系の特徴とも言うべき効果(利得のbowing効果)は、実験でも確かめることが出来た。

光スイッチ・変調デバイス応用の基礎実験として、またナノサイエンスのマイルストーン実験として、単一量子細線の光透過吸収実験に成功した。即ち、単一量子細線レーザー素子の光導波路の一端に外部から光を結合して、他端から出てくる透過光のスペクトルを測定し、単一量子細線の吸収スペクトルを取得することができた。この実験により、単一細線による吸収の絶対値が得られ、励起子吸収ピークでは80/cmという大きな値であることがわかった。また、20本の量子細線レーザー素子を用いた場合には、室温でも励起子吸収ピークが明確に表れることが確かめられた。

これらのほか、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、AFM、PL

イメージ、PL スペクトル、PL スキャンなどによる詳細な実験と、第一原理計算による理論研究が行われ、アニール条件の許容幅、平坦化範囲、平坦化メカニズムなどが明らかになった。本研究の手法の一つとして開発を進めた顕微発光分光計測系および発光絶対光量計測法は、量子細線試料だけでなく、半導体から生体分子にまでおよぶ広いナノ構造試料の評価計測手法として、極めて有効であることがわかった。実際に、同手法を用いて、半導体新材料、有機 EL 素子試料、生物化学発光試料の実験も進められた。

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では、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。さらに、InGaAsP 系単一量子細線レーザーの利得や吸収、内部ロスの評価のための、長波長帯測定技術の向上も達成され、測定感度や測定波長範囲の著しい改善がなされた。

理論的研究は、秋山チームの実験と協調・連携しながら、2 つの方向性・目標をもって推進してきた。(A)一方は、物理学の基礎理学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。(B)他方は、応用に展開可能な工学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(A)の研究では、レーザー反転分布状態である「電子-正孔系」で生じる諸現象に、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、高度にソフィスティケートされた理論的手法を導入し、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)を用いて研究を進めた。既知の現象や効果であっても、そのような現象・効果がなぜ生じるのか、その発生過程にもっとも大きな寄与をしている素過程は何か、電子相関やクーロン相互作用がどの程度効いているのか、という観点から、定性的理解を進めるための研究である。と同時に、電子相関効果を正しく取り入れる、あるいは、増強することによって、新たに発現する現象を発見するための探索的な研究でもある。他方、後者(B)の研究では、秋山チームの実験の実験対象系が T 型 GaAs 量子細線であることを考慮し、その形状が「擬」1 次元系であることを取り入れるだけでなく、できる限り実験状況を定量的に再現する理論を構築し、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。この方法では、定量的に正しい考察が可能で、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を行いながら、利得発生条件や利得の性質を理解した。

研究(A)として、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-正孔系を考察した。現状では、DDMRG の数値計算は完全には完了していない。特に、光学応答(吸収利得スペクトルや発光スペクトル)の計算は難しく、数値計算手法上でのブレイクスルーが必要であることが分かってきた。

上記のボゾン化法は高密度側で正しい理論であったが、逆に、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、ボゾン化法と双対関係であると同時に、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ことに対しての、逆側からの接近手法である。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た。

研究(B)としては、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、定量的比較に耐えうる、非常に多くの計算データが得られた。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 次元系の利得形成の特徴, クーロン相互作用の利得形成に対する影響が, 初めて定量的に解明された。さらに, 同レベルの理論手法を用いて, 電子ドープした量子細線の光学応答も数値的に研究し, トリオン(荷電励起子)束縛状態を取り入れた従来の理論と, 本理論結果を総合することによって, 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, 統一的に理解することができた。

なお, 擬 1 次元電子-正孔系の低次元性の特徴は, 高次元電子-正孔系の特徴と比較することによってよりいっそう際だって理解できる。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, 反転分布状態の粒子数密度を変えたときに生じると予想されている金属-絶縁体転移(励起子モット転移)を精査した。さらに, 吸収と発光スペクトルの計算結果も得た。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, 励起子ボーズ-アインシュタイン凝縮と電子-正孔 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によって考察し, より実験との比較が進められるような方向に拡張しつつある。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

「半導体を量子細線や量子箱など低次元構造にすると、状態密度が先鋭化し、レーザーなどのデバイス特性が向上する」という予測は、ナノテクノロジーにおける最も代表的な研究指針となっている。実際、電子状態が3次元であるダブルヘテロ構造レーザーに比べて、電子状態が2次元である量子井戸レーザーが優れた性質を示すことは事実で、産業的にも、半導体レーザーに高性能が要求される場合には量子井戸レーザーが用いられている。そこで、さらに電子状態を低次元化した1次元量子細線レーザーや0次元量子ドットレーザーへの興味・期待が学術的にも産業的にも高まった。1982年、荒川・榊は、量子細線や量子箱構造を活性層に用いた半導体レーザーの提案解析を行い、それらが温度依存性の抑制などレーザー性能の向上に有効であることを示した。1985, 1986年浅田・宮本・末松は、量子細線および量子箱半導体レーザーの利得をダブルヘテロレーザーや量子井戸レーザーと比較して解析し、しきい値電流の低減に有効であることを示した。

その後、量子細線レーザーの実験研究が世界中で展開された。しかし、長年の努力と科学的進歩にも関わらず、当初の理論的予測を検証した実験は達成されてこなかった。これは、量子細線構造は作製上の技術的困難が大きいと、細くて、均一性が高く、欠陥やダメージの少ない試料が得られなかったからであった。シングルモードの細い量子細線試料を作成することはとても難しく、それを無理に作ろうとしても、欠陥やダメージのために発光効率が著しく低下したり、構造ゆらぎのために電子状態は先鋭化するどころかむしろブロードになってしまい、低次元化のご利益を引き出すことは困難であった。様々なタイプの量子細線構造が考案、研究されてきたが、T型量子細線は、横方向閉じ込めは弱い構造の制御性がよく低温の基礎研究には最適な系である。特に、米国ベル研究所のファイファー博士らと共同で我々が1999-2000年に開発した成長中断アニール法によるGaAs(110)界面の均一化が達成されてからは、T型量子細線の品質が飛躍的に向上し高品質量子細線レーザーの研究が可能になった。実際、発光(PL)線幅が従来に比べて約一桁シャープな量子細線構造が作製できるようになった。

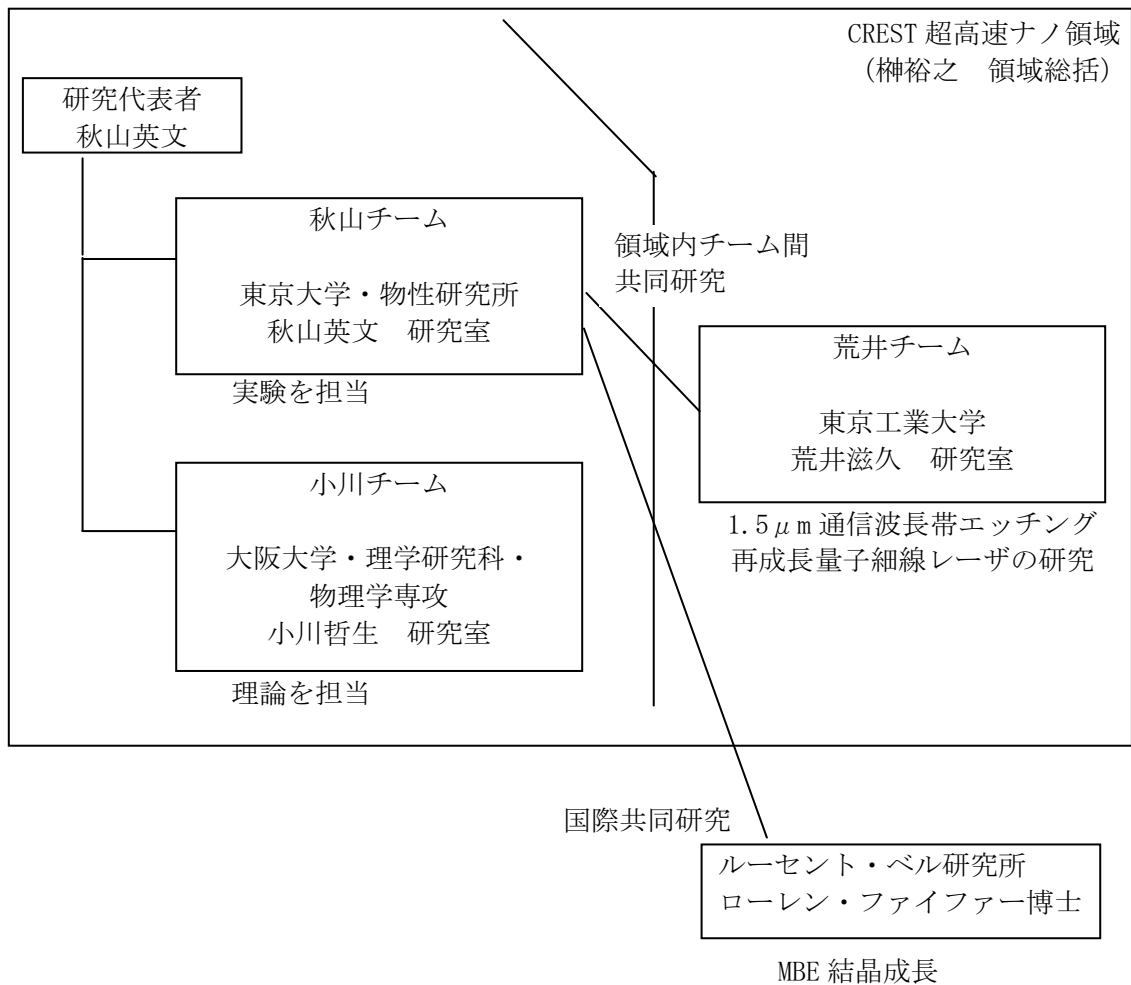
そこで、本研究では、冒頭の研究指針に対して直接的な実験的検証を行うことを目的に、構造均一性の極めて高いへき開再成長T型GaAs量子細線レーザーを作製し、レーザー発振を実現しその特性を評価すること、予想されているレーザー発振しきい値電流の低減を検証すること、量子細線およびそこに形成された高密度電子正孔系の1次元系特有の新奇な物性を見出すこと、などを実験上の具体的な目標に設定した。

また、一方で、1980年代の提案に対しては、理論面での問題も指摘されてきた。即ち、量子細線の光学応答の最近の基礎物理理論によると、1次元系では電子間の相互作用が非常に強く効くために、光吸収や利得などは初期の提案で仮定した1次元状態密度上の電子と正孔の熱分布のような描像では正しく記述されないと考えられるようになってきた。よって、電子間の多体クーロン相互作用を適切に取り入れて、電子と正孔のとりうる多様な状態を記述し、レーザーの利得特性を定量的に計算する必要がある。

そこで、小川哲生大阪大学教授をリーダーとする理論研究担当チームを設け、擬1次元空間に閉じこめられた電子-正孔-電磁場結合系の量子ダイナミクスと電磁場応答を、微視的立場から理論的に明らかにする目標を立てた。具体的には、(擬)1次元量子細線系の高密度電子励起状態を研究対象とし、電子正孔系の(擬)1次元性と電子相関効果とを正しく考慮しながら、(擬)1次元高密度電子-正孔状態の非平衡相の詳細やその時空間ダイナミクス、その線形・非線形光学応答、フォノン場との相互作用を精査することにした。1次元電子系の励起状態における量子秩序や量子揺らぎが、電子相関や1次元性とどのような関係にあるか、それらが利得形成やレーザー光の量子コヒーレンスにどのような影響を及ぼすかまで明らかにしようと考えた。これらの結果を基に、実験結果の解釈や理解をすすめ、同時に、量子細線レーザーの動作原理を理解し、(擬)1次元系に特有な物理機構による新光学現象の予測、レーザー発振性能改善の方法や新しい機構や原理による量子細線光デバイスの提案を行うことを目指した。

上記の研究スタート時に立案した研究目標や計画はそのまま変更はなく進められたが、中間評価の際に領域総括およびアドバイザー委員から助言をいただいて、3年目からは我々の T 型量子細線レーザーにくわえて、材料や手法は大きく異なるが基礎物理に関しては共通性が高いと思われる東工大荒井教授のチームの $1.5\mu\text{m}$ 通信波長帯のエッチング再成長量子細線および量子細線レーザーについても、我々のチームが低温 PL 評価、物理計測、特性評価などを担当し共同研究を開始することになった。

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3. 1 量子細線レーザーの作製とデバイス特性計測（東京大学 秋山グループ）

(1)研究実施内容及び成果

(A) 電流注入量子細線レーザーの作製とその特性

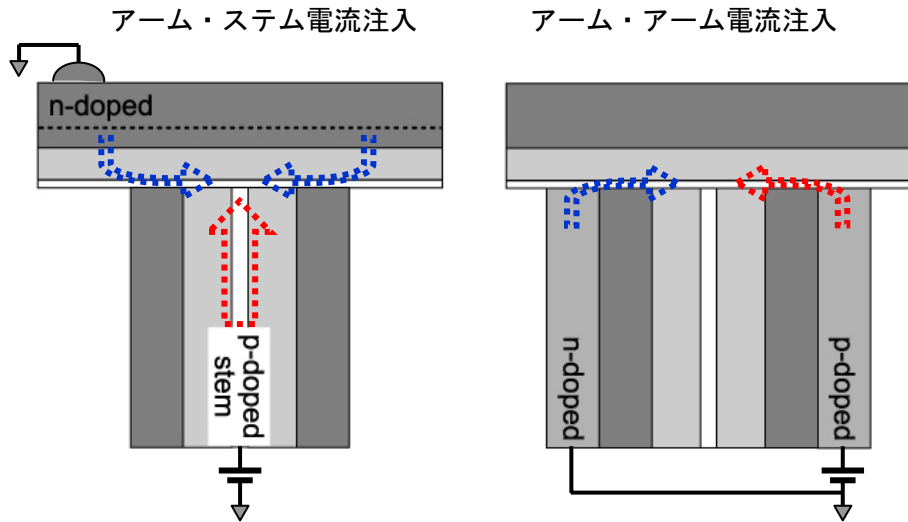


図1 (左)垂直及び(右)平行配置のp-n層を有する電流注入T型量子細線レーザー

電流注入T型GaAs量子細線レーザーの作製は、2002年秋に本CREST研究プロジェクトにおいて全く新規に開始したチャレンジであり2005年秋の中間評価の時点では発振に至っていなかったが、プロジェクト開始から3年半後の2006年春に発振に成功した。

電流注入のスキームについては、図1に示す2つのタイプ、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)のレーザー試料を作製してきたがほぼ同時期に発振が達成された。ここでアーム井戸とはT字の横棒に相当する井戸、ステム井戸は縦棒に相当する井戸のことである。共振器長は $500\mu\text{m}$ で、共振器端面には SiO_2 と金を蒸着して高反射ミラーを形成した。デバイスの示した性能は、以下に述べるとおりととても良好なものであった。

20本のT型細線からなる平行p-n層を有するアーム・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、図2に示すように、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、高反射コート

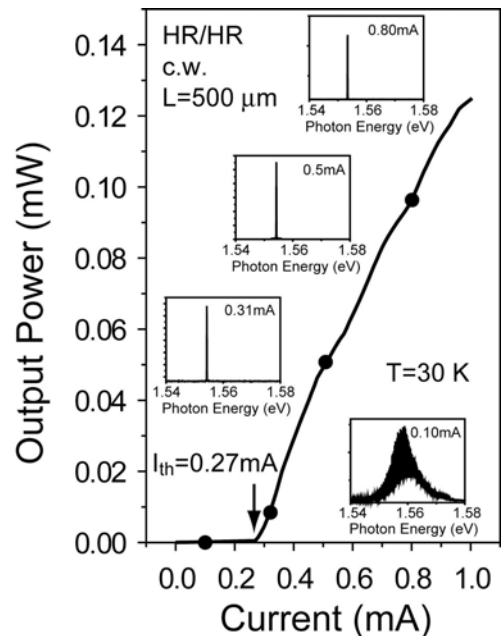


図2 アーム・アーム電流注入T型量子細線レーザーの低しきい値発振：IL特性と発振スペクトル

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。この0.27mAのしきい値電流は、1本あたりに直すと14 μ Aとなる。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、1988年のAPLに示されたYarivの理論予測を適用すると約10 μ Aであり上記の値にとっても近いことが解る。今回得られた結果は、低温においてはあるが当初の理論予測を原理的に検証したと言える結果である。他にも、発光および発振スペクトル、IV特性、IL特性、しきい値電流と外部量子効率、それらの温度依存性など、詳細な物理計測が達成できた。

15本のT型細線からなる垂直p-n層を有するアーム・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。

表1 電流注入レーザーの性能

電流注入	Arm-Stem型 (垂直p-nドープ層)	Arm-Arm型 (平行p-nドープ層)
発振温度	5-110K	30-70K
閾値電流	2.1mA @100K	0.27mA @30K
微分量子効率	0.9% @100K	12% @30K

表1にまとめたこれらの結果は、従来の類似研究と比較しても優れている。

GaAs系短波長材料では、1989年に当時米国BellcoreのKaponらがV型量子細線と呼ばれる構造を用いて最初の電流注入細線レーザーを報告したが、これは細線の断面サイズが9nm x 80-100nmと大きく、電子の運動が完全な1次元にはなっていないマルチサブバンド細線レーザーであり、レーザー発振はその励起サブバンド状態でしか起こらず、室温電流注入発振はしたものの発振しきい値電流も50mAと大きかった。1994年、米国IBMのTiwariらは、3層10nm x 35nm寸法のMBE成長V型InGaAs量子細線レーザーを作製し、室温で0.19mAの低しきい値電流を報告した。ただし、この細線も断面サイズが大きくマルチサブバンド細線レーザーに留まっていた。

同年、1994年にWegscheiderらは、7nm x 7nmのT型量子細線15本からなる電流注入レーザーを作製し、基底シングルサブバンドからの発振を低温で観測した。ただし、レーザー発振の縦モードは、マルチモード発振だった。ILカーブの外挿により得られたマルチモードのしきい値電流は4Kにおいて0.4-0.7mA程度であった。

一方、InGaAsP/InP系長波長材料では、2005年、東工大の八木らが9nm x 24nm寸法のInGaAsP/InP量子細線を電子ビームリソグラフィ・反応性イオンエッチング・MOCVD成長を用いたエッチング再成長法で作製し、1.5 μ m通信波長帯において室温連続発振しきい値2.7mA、180Kしきい値1.2mAなどを達成した。

今回我々が得たレーザーは、14nm x 6nmの寸法で基底シングルサブバンドからの発振でかつシングルモード発振を示しており、0.27mAの低しきい値電流を示すものであった。また、定量的な評価により、高微分量子効率も検証でき、かつ、温度依存性も初めて評価できた。

今後は、ドーピングを最適化してゆき、かつ、細線の本数を20本や15本から数本〜1本へと減らしてゆくことによって、

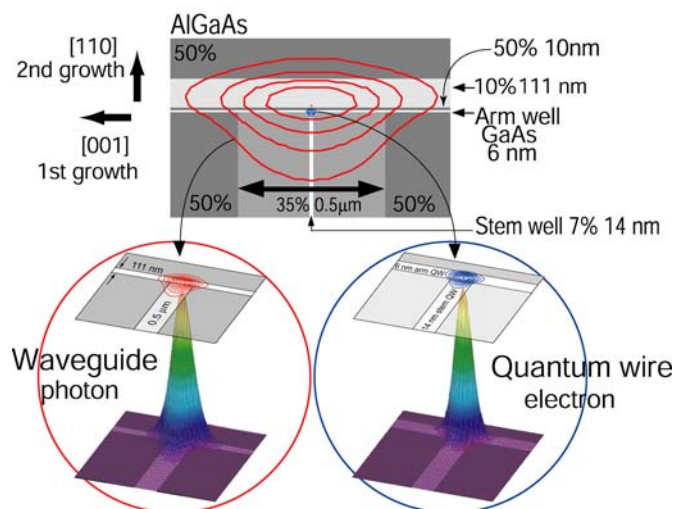


図3 単一量子細線レーザーの構造

より低いしきい値電流と高い微分量子効率でのレーザー発振を目指したい。

(B) 量子細線レーザーの物理と光励起による分光計測実験

電流注入型の量子細線レーザーは、外部電場の効果や、p 型と n 型のキャリアのアンバランスによって生じる電荷の効果など、複雑な効果の影響が存在するため、レーザー発振機構や高密度電子正孔系の基礎物性を調べるには困難が伴う。そのため、ノンドープの量子細線レーザー構造試料を作製して、光励起による分光実験を行うことが重要となる。

ノンドープ光励起量子細線レーザーとしては、14nm×6nm 寸法の量子細線をそれぞれ、1 本、3 本、20 本、100 本有する量子細線レーザーを系統的に作製し、評価・物理計測を進めた。図3は、量子細線 1 本からなる単一量子細線レーザーの構造である。光導波路や電子状態に関する有限要素法数値計算を行って、光閉じ込め係数などを見積もりながら設計を行った。

光励起量子細線レーザーの低温顕微 PL・PL スキャン・PLE 評価から、線幅 1.3meV 以下、ストークスシフト 0.3meV 以下の量子細線が 20 μ m 以上連続に続くような高品質量子細線が得られていることが確かめられた。さらに、図4に結果をしめす低温 PLE 測定において、1991 年に小川らが理論的に予言した 1 次元系特有の励起子構造と 1 次元連続状態ゾンマーフェルト因子を実証する吸収スペクトルを得た。一方、T 型量子細線中のクーロン相互作用を含めた電子状態の数値計算をケンブリッジ大学のシマンツカ博士の協力を得て実行し、励起状態の PLE ピークの帰属を正確に行うことが出来た。

光励起レーザー発振特性に関しては、細線での発振しきい値が井戸よりも低いこと、シフトが小さいこと、単一モードで発振しやすいことなどが明らかにされた。これらは電流注入型量子細線レーザーの結果とコンシステントである。顕微画像計測により、発光及び発振光の近視野像が得られた。レーザーの

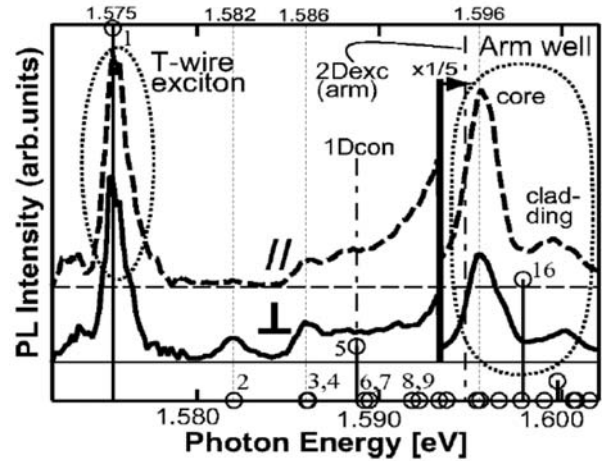


図4 T 型量子細線の PLE スペクトル。一次元励起子構造を示している。

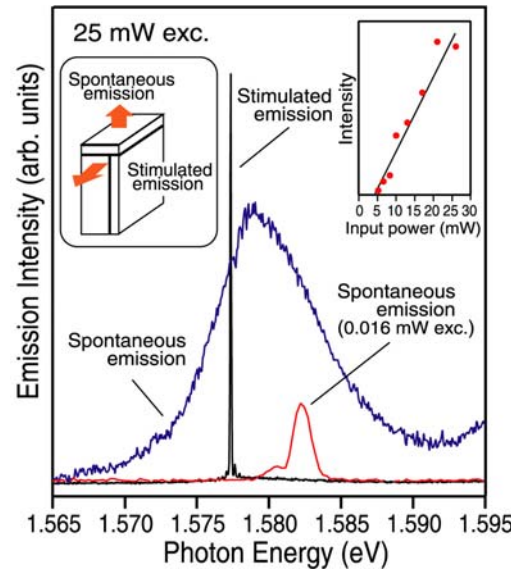


図5 単一量子細線レーザーの発振と同時計測した PL のスペクトル

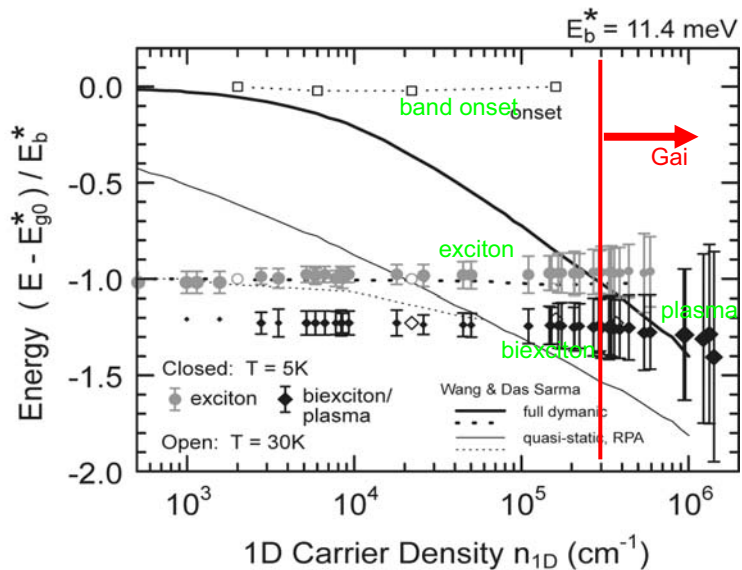


図6 スペクトルピーク位置の電子正孔密度依存性

動作温度は、単一量子細線レーザーで最高 60K、20 本の量子細線レーザーで最高 120K であった。

導波路方向に出射するレーザー発振光のスペクトルと、導波路と垂直方向に放射される PL のスペクトルを同時計測し比較することができた(図5)。これにより、レーザー発振の起源は、かつていくつかのグループが主張した自由励起子や束縛励起子によるものではないことが明らかになった。

量子細線レーザー発振の起源については、1993 年に米国 Bell 研の Wegscheider らが、「レーザー発振の起源が励起子によるものだ」との主張をし、それに対して「励起子はボゾンであり、常に、利得を上まわる吸収が存在し、レーザー発振起源にはなり得ない」などの反論が寄せられ、それ以降、大きな課題として注目されてきた。本研究の結果は、試料の高品質化を行ってスペクトルをシャープにすることにより、それらの論争に決着をつけるものとなった。

さらに、詳細な励起強度依存 PL 測定を行い、キャリア密度を正確に見積もりつつスペクトル形状の変化を追跡することが出来た。密度の増加に伴い、1 次元自由励起子の PL ピークの 3meV 低エネルギー側に励起子分子の PL ピークが 2 乗則にしたがって超線型に増加し、それがブロードに変化しながら電子正孔プラズマへとクロスオーバーしてゆく様子が明らかになった。このクロスオーバーの際に一次元連続状態のバンド端はシフトを見せない。この実験結果は、バンドギャップリノーマリゼーションによりレッドシフトするバンド端と励起子のエネルギー準位がクロスするときに励起子モット転移が起きるとする従来理論のピクチャーが正しくないことを示すものだった(図6)。

発振しきい値以下での導波路発光のファブリー・ペロープリンジに対してハッキ・パオリ・キャシディーの解析方法を用いることにより、量子細線の吸収利得スペクトルを PL と同時に取得することにも成功した(図7)。その結果、レーザー発振に寄与する利得の起源は、発振しきい値の近傍では励起子分子と励起子の間の反転分布によっており、電子正孔密度の増大と共に電子正孔プラズマによるものへと連続的に変化してゆくことがわかった。本実験のように PL スペクトルと吸収利得スペクトルを同時に低励起から高密度励起領域まで計測することは、これまで 2 次元量子井戸や 3 次元バルク系でも困難で例が無く、励起子モット転移(クロスオーバー)に関する基礎データが、1 次元量子細線で初めて得られたことは驚きである。また、この実験によ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も明らかになった。クロスオーバーの初期段階において、1 次元励起子の非常に敏感な吸収飽和、すなわち大きな非線形性が見られた。これは光-光スイッチング応用に有用な性能である。吸収スペクトルの変化においても一次元連続状態のバンド端はシフトを見せず、励起子吸収ピークと一次元連続状態の間が埋まってゆく様子が観測された。

(C) 単一量子細線レーザー素子を用いた光透過実験

単一量子細線の光透過吸収実験に成功した。単一量子細線レーザー素子の光導波路の一端に外部から光を結合して、他端から出てくる透過光のスペクトルを測定し、単一量子細線の吸収ス

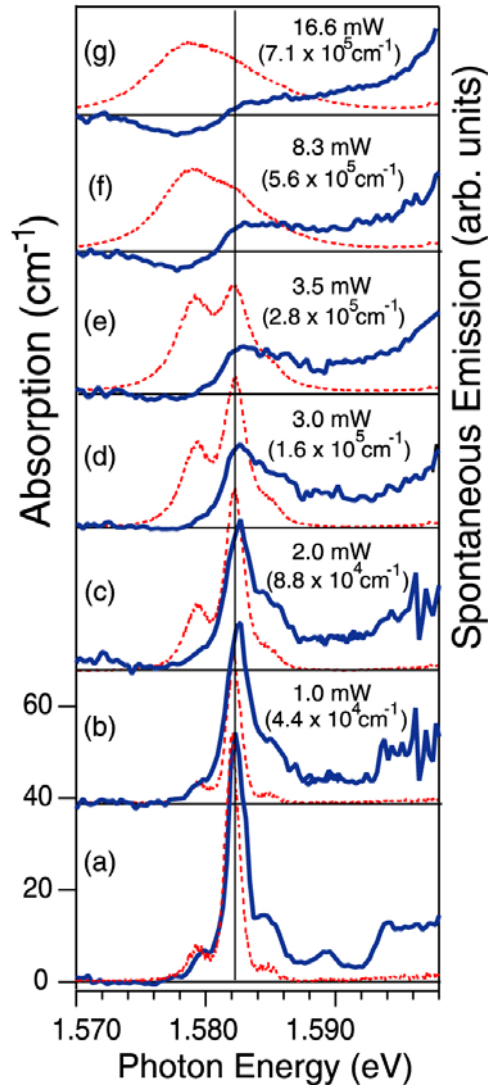


図7 単一量子細線の PL および吸収利得スペクトルの密度(励起強度)依存性

ペクトルを取得することができた(図8)。この実験により、単一細線による吸収の絶対値が得られ、励起子吸収ピークでは $80/\text{cm}$ という大きな値であることがわかった。この値は、入射光の 98% が細線一本により吸収され、抜け出てくるのはたった 2% でしかないほど、量子細線の励起子吸収が強いことを示すものである。

また、20 本の量子細線レーザー素子を用いた場合には、室温でも一次元励起子吸収ピークが明確に表れることが確かめられた。

さらに、側面からの光励起により量子細線中に濃度をコントロールしつつ電子正孔キャリアを生成させることで、吸収飽和および利得を発生させ、出射光の強度を変化させる実験にも成功した。

これらの実験は、ナノサイエンスのマイルストーン的な実験として意義付けられる。また、それだけでなく、光スイッチ・変調デバイスのように外部から導波路に結合した光の出力を制御するタイプのデバイスに量子細線を応用する基礎実験としての意義もある。

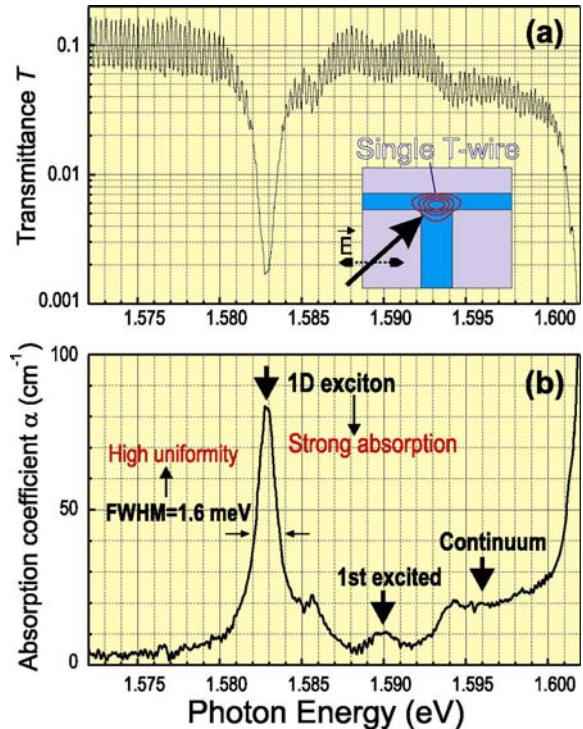


図8 単一量子細線の光透過実験により得た透過および吸収スペクトル。

(D) ハートリー・フォック近似理論による量子細線レーザーの利得特性解析および実験との比較

上記の量子細線レーザーに関する実験結果については、後述する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の比較検討が可能になった。これにより微視的理解が達成されつつある。具体的なレーザー構造を想定して、T型や矩形型の量子細線構造と具体的な光閉じ込め係数を与えれば、モード利得吸収の絶対値やスペクトルができ、ピーク利得が定量的に評価できるようにプログラムを開発し、秋山チームの個々の大学院生やスタッフが計算を実行できるようにリナックス・ワークステーション計算環境を整備した。具体的な計算手法としても、感受率逆行列計算法および有効ハミルトニアン行列対角化法という二つの方法で計算を行い、ダンピングの取り入れ方に関するスペクトル表示形式や非スペクトル表示形式など、実際上問題となる手法の吟味も行い処方箋を得た。あわせて、発光スペクトルの計算に関しても、これまで計算結果の食い違いや負値が表れることが問題となっていた KMS(久保・マーティン・シュヴィンガー) 関係式に基づく計算法と半導体ルミネッセンス方程式を用いた計算法に加え、常に妥当な

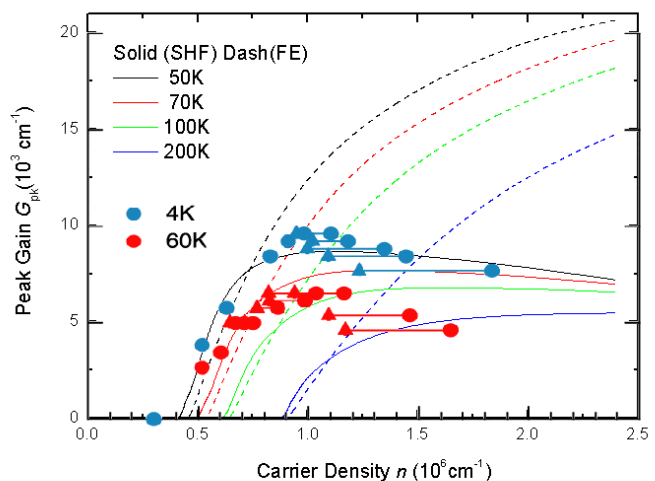


図9 量子細線レーザーのピーク利得の電子正孔密度依存性をハートリー・フォック近似理論(実践)と自由粒子近似理論(点線)で計算し比較した。点は実験データ。

結果が得られる非平衡グリーン関数定式化に基づく計算法が得られた。

レーザー中のピーク利得値のキャリア密度依存性に関して、ハートリー・フォックレベルの理論計算結果は、自由粒子モデル計算の結果とくらべ、大きな違いを示した(図9の実線と点線)。多体クーロン相互作用が存在すると、透明キャリア密度の近くでは、ピーク利得のいわゆるクーロン増強効果が現れるが、キャリア密度を上げてゆくと利得スペクトル形状の変化に伴ってピーク利得の抑制効果(利得のbowing効果)が出現することが解った。これは2次元量子井戸レーザーや3次元ダブルヘテロレーザーにはなく、一次元系量子細線レーザーの特徴とも言うべき効果である。ピーク利得が抑制されることは好まざる効果のようであるが、キャリア密度の変化に対して利得の値があまり変わらない(安定している)ということが利点になるような応用がないか検討を進めたい。

図9の点は T 型量子細線レーザーを用いて実際に測定した値をプロットしたものであり、ハートリー・フォック近似理論計算の結果と定量的に良い一致を示している。利得抑制効果は、実験的にも確かめることが出来た。なお、レーザーの透明キャリア密度に関しては、ハートリー・フォックレベルの理論計算結果が自由粒子モデル計算の結果と大きく異なることは無く、実験値ともよく一致した。

電子と正孔の濃度のアンバランスが、利得スペクトルや利得ピーク値に与える影響も、理論と実験の両面から調べている。余剰キャリアの存在は、透明キャリア密度は下げるが、一方で利得スペクトルをブロードにしてピーク値を低下させる傾向があることも明らかになってきている。

(E) ゲート付き FET 型変調ドープ単一量子細線デバイスの作製と計測

単一 T 型量子細線のバリア領域にシリコンドナーを変調ドープし、さらにゲート電極を設けることにより、FET 型のデバイスを作製した。そして、ゲート電圧の印加により 1 次元電子ガス濃度を 0 から $6 \times 10^5/\text{cm}$ 程度まで大きく変化させ、発光と吸収の両方のスペクトルを取得することに成功した。図10は電子密度を $6 \times 10^5/\text{cm}$ で一定に保ち温度を 5K から 50K まで変えたとき、図11は温度を 5K で一定に保ち電子濃度を 0 から $6 \times 10^5/\text{cm}$ まで変化させたときの、PL と PLE スペクトル実験結果および計算結果である。

これらの結果から、低濃度領域での 1 次元荷電励起子の挙動が明らかになり、トリオンバンド間遷移クロスオーバーの観測ができた。高濃度領域では 1 次元電子状態密度を明確に反映

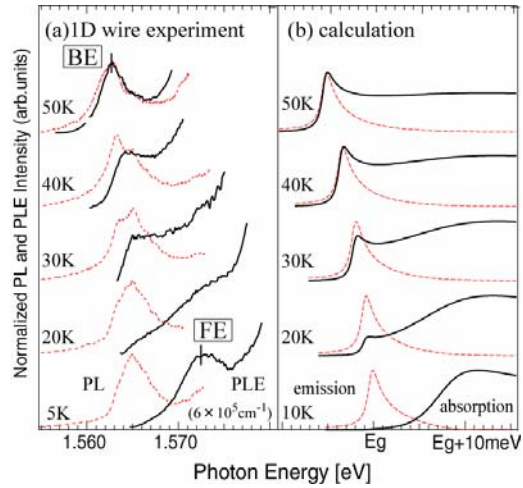


図 10 キャリア密度一定で温度を変えた時の、ドープ単一量子細線の PL および PLE スペクトル(左側)と自由電子近似計算(右側)。

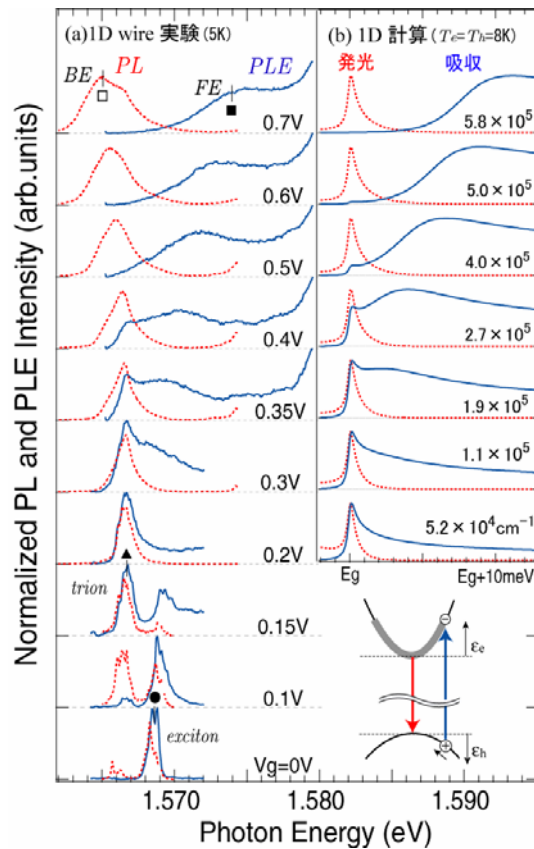


図 11 温度一定でキャリア密度を変えた時の、ドープ単一量子細線の PL および PLE スペクトル(左側)と自由電子近似計算(右側)。

したスペクトル形状、多体効果の寄与が意外に小さいこと、バースタイン・モス・シフトの様子が明らかにになった。

多体効果の寄与が意外に小さく、1次元電子状態密度を明確に反映したスペクトル形状については、上述のハートリー・フォックレベルの近似で多体クーロン相互作用をとりこんだ理論計算でも再現することが出来た。

さらに、KMS(久保・マーティン・シュヴィンガー)関係式に基づく電子温度の評価などが実験的に達成された。この方法は、発光スペクトルと吸収スペクトルを精度よく測定しさえすれば、モデルに拠らずに両者の比較からキャリア温度を読み取ることができる方法であり、半導体光デバイスの研究に極めて有効で強力な手法であることが解った。

自由励起子やトリオンやバンド間遷移など電子濃度に敏感に変化する光学スペクトルの特徴を応用して、低濃度ドープ量子井戸のオーミックコンタクト電極周りの電子濃度マッピング実験なども達成された。伝導デバイスや電流注入デバイスにおいて常に重要である、オーミックコンタクトの光学的評価手法として有効な方法である。

このFET型のドープ量子細線デバイスそのものはレーザーではないが、電子濃度を連続的にコントロールして光学応答を精密に測定することができ、レーザーにおいて重要な量子細線の光学応答とくにキャリアフィリング効果や多体効果の影響を詳しく調べることができた。またさらに、光変調や光スイッチ動作を行うFET型デバイスの基礎実験としての意義も大きい。

(F) T型量子細線構造の高品質化

上記のように量子細線や細線レーザーの精密な物理計測が可能になったのは、T型量子細線の著しい高品質化が実現できたためである。T型量子細線は、分子線エピタキシー(MBE)法を2回使ってへき開再成長法により作製される。すなわち、通常のMBE法によりGaAs(001)基板上に基板温度約600度で薄膜構造を第一成長し、その結晶を真空中でへき開して、露出した(110)断面に2回目のMBE成長を行う。ところが、(110)断面上のMBE成長は、約490度という低い成長温度や高い砒素圧が要求され、結果として得られる薄膜の表面モフォロジーが悪く、それがかつてのT型量子細線の品質を制限していた。我々は、その凸凹の多い(110)表面が、600度で10分間の成長中断アニールを施すと著しく平坦化されることを1999年に発見し、以降それを用いて試料を

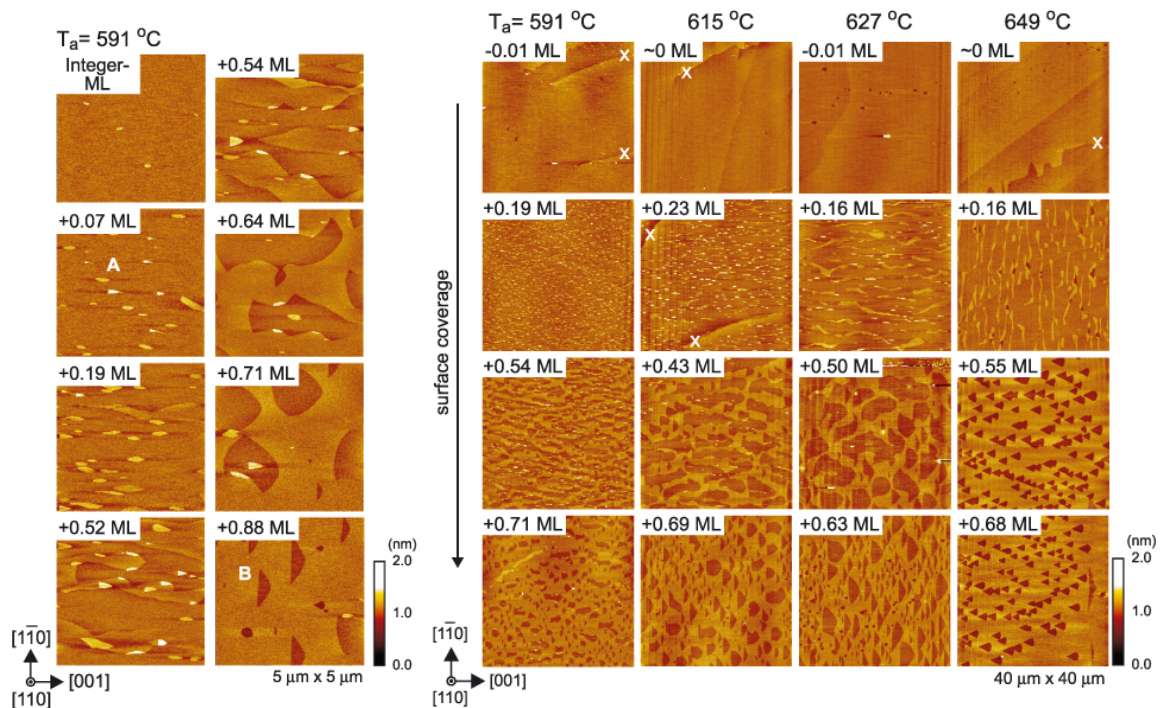


図 1 2 様々な温度で成長中断アニールしたへき開再成長 GaAs(110)表面の GaAs 積層量依存性

作製してきた。我々は、この成長中断アニールによる GaAs(110)面の平坦化が極めて重要であると認識し、本 CREST プロジェクトでもこの研究をさらに継続発展させた。

図12左はへき開再成長 GaAs(110)薄膜の GaAs 積層量を整数原子層から連続的にずらしていったときの、591℃での成長中断アニール後の表面モフォロジーを $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 領域についてAFM計測した結果である。我々が「ボート」と呼ぶ2-3MLの凸状の島Aと「フィッシュ」と呼ぶ1MLの凹状のピットBなどが系統的に観測されている。図12右は、成長中断アニールの温度を約590℃から650℃にまで大きく変えたときの、成長中断アニール後の表面モフォロジーを $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ の広領域についてAFM計測した結果である。高温ほど凹凸のスケールが広がるが、650度まで上げてしまうと新たな2-3MLの深さの三角形のピットが形成されるようになることがわかった。これらの結果から、成長中断アニールの最適温度として630℃を得た。

このようにして得たへき開再成長 GaAs(110)薄膜の成長中断アニール表面を、AlGaAsバリアでカバーして得られる量子井戸構造のPLイメージ測定を行って、AFMで見たパターンと同様のPLイメージパターンを確認した。この結果は、AlGaAsバリアでカバーをした際に、成長中断アニール後の表面モフォロジーが保存されていることを保証してくれる。また、これらの研究により、表面平坦化のドライビングフォース、原子ステップパターンの形成モデル、ヘテロ界面の凹凸が無くなった量子井戸構造のPL線幅の原因などが示唆された。また、同様のAFM計測で得た特徴的なステップエッジ構造の形状解析と統計処理により、その原子ステップパターン形成モデルの妥当性を検証することができた。

我々はさらに上記の超平坦 GaAs(110)表面の形成メカニズムを理解する為に、GaAs(110)表面上でのGa原子とAs原子の表面ポテンシャルの第一原理計算の共同研究も行った。(110)表面では、(001)表面に比べてポテンシャルバリアが低くて原子拡散が容易になっていることや、Gaの運動が面内で異方的になっていることなど、我々の実験結果や原子ステップパターン形成モデルを支持する計算結果を得た。

(G) へき開再成長試料プロセス技術の開発

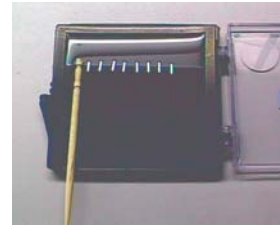
結晶成長は、すでに信頼できる協力関係が築かれている米国ベル研究所のファイファー博士らの結晶成長グループの協力を得ておこなった。図13左上に示す第一MBE成長が終わった2インチウェハーをへき開再成長に向けて切断・研磨する作業に関しては、秋山らがベル研に滞在して試行錯誤しつつ行った。また、上記のアニール条件を含め、レーザーウェハーの作製のための各種条件の最適化も、秋山らがベル研でノマリスキー顕



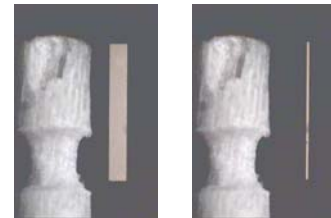
第一MBE成長後の基板



へき開再成長(第二MBE成長)の前(左)と後(右)



へき開再成長後のT型量子細線試料を8つに切断



切断後のT型量子細線試料

図13 光励起用のへき開再成長レーザー試料のプロセスの各段階。(電流注入用試料では電極形成やボンディングなどが追加される)



図14 へき開再成長(110)面のノマリスキー顕微鏡写真。上から、へき開が成功、失敗、大失敗した例。

微鏡評価(図14)を繰り返しながら行った。

へき開再成長後のレーザーウエハーピースに対しての、半導体レーザー電極プロセスや、レーザーバーへき開、ダイボンディングなどの加工は、日本国内で秋山チーム内の大学院生と研究員とで全て行えるように、加工装置の整備や加工方法の開発を行った。図13左下に示すように、T型量子細線レーザーは、へき開再成長の結果として得られる $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 程度の小さなピースのエッジに形成されるので、特殊な点が多く、通常の半導体レーザー作製に用いる典型的なフォトリソグラフィが使えず、市販品や他所で開発されたレシピをそのまま使うことはできない。そのため、特に電流注入レーザーのプロセスに関しては、専用の技術を研究室内で大学院生が主になって開発した。

(H) 顕微光学測定システムの開発

T型量子細線レーザーをはじめとして、量子細線レーザーはいずれの場合も特殊な薄膜成長技術やプロセス技術を用いて作製される。それらの試料評価には、専用の顕微分光評価測定システムを開発することがきわめて重要である。本研究ではその手法開発にも特に力をいれた。

図15は、冒頭で述べた平行 p-n ドープ層をもつアーム・アーム電流注入型のT型量子細線レーザーの試料断面構造と低温顕微 PL 分光スペクトル計測の測定結果の例を示す。試料の各場所に応じて各 PL ピークの有無が変わっており、PL ピークと電子状態の同定が正確になされている。測定温度は 5–300K まで可変で、空間分解能は $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 、スペクトル分解能は約 0.1meV であり、さらに細線に沿ったスキャン測定も可能で、電子状態の同定だけでなく、PL 線幅や均一性などから試料の界面ラフネスの評価がなされる。この測定システムを用いて、細線試料の品質を詳細に評価し、試料の評価・選別を行ったり、試料作製にフィードバックをかけて品質の向上を図ったことは本研究の本質的に重要な部分である。また、この測定によって電子状態の正確な同定・評価を行っておくことは、利得やレーザーの特性を理解する上で必須であり、その意味でも本研究の本質的に重要な部分であった。

既に上で述べた、量子細線の高ダイナミックレンジ PLE 計測、顕微導波路透過計測、導波路放出光のハッキ・パオリ・キャンディー解析による利得スペクトル計測および PL の同時計測なども全て本 CREST プロジェクトで開発・もしくは改良を行った顕微光学計測システムを用いて初

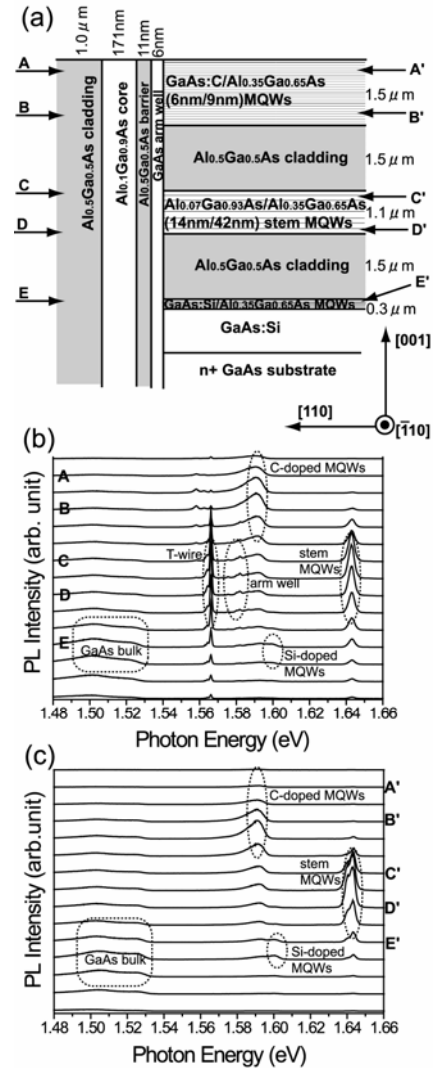


図15 平行 p-n ドープ層をもつ電流注入 T 型量子細線レーザーの構造と低温顕微 PL 分光スペクトル計測による電子状態の同定

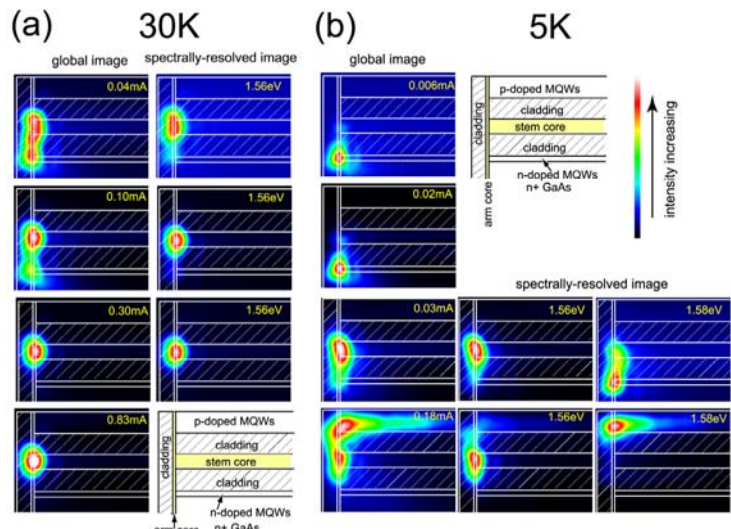


図16 電流注入による顕微 EL イメージ計測結果

めて計測できたものである。

電流注入型量子細線レーザーにおいては、p 層と n 層のドーピング位置および濃度をうまく最適化して、p-n 接合の中央にうまく量子細線を配置しキャリア注入を最適化することが大きな課題であった。室温で動作する量子井戸レーザーの場合は、SEM の中でダイオードに流れる電流を評価することでデバイス内の電場分布を計測する EBIC という手法があり、これを用いた評価により最適化を進めることができる。しかしながら、低温動作の T 型量子細線レーザーではこの手法が使えないため、我々は図16に示すような顕微 EL (電流注入発光) イメージ測定を行うことで、キャリア注入の様子を調べた。電流注入に伴って出てくる発光の空間分布とエネルギー、およびスペクトルを評価することで、キャリアが効率よく注入されているかあるいはリークが起きているかを評価した。

本 CREST プロジェクトでは、試料の品質評価の手法の一つとして発光の絶対光量を計測する手法の開発に取り組んだ。通常、レーザー発振の阻害要因となる非発光再結合の評価には、時間分解発光寿命計測か、似た試料の間の発光強度比較計測を用いなければならなかった。もし発光絶対光量計測が可能になればより直接的・定量的に試料品質ができるだろうというねらいであった。しかし、残念ながら量子細線試料の場合は、かなり複雑な横方向構造があるために発光の放射分布が大きく変化してしまうために発光絶対光量計測により試料品質を評価するところまで到達することは困難であることが解った。その一方で、半導体から離れて溶液試料に適用した場合や有機 EL 薄膜試料の場合は、屈折率分布がより単純であるために発光絶対光量計測が可能でかつ極めて重要・有用であることが解ってきた。特に、生物化学発光試料の発光絶対光量計測は、発光の量子収率の決定に不可欠であり、計測「標準」の分野でも重要な課題であることが解った。そこで、生物や化学の専門家と共同研究を開始し、有機 EL 素子試料、生物化学発光試料の研究も一部進めた。また、アトー(株)と共同で、溶液生物化学発光の発光絶対光量計測装置の開発も開始され、製品化に向けて現在進んでいるところである。

(I) 東工大荒井チームのドライエッチング埋め込み再成長法による $1.5\mu\text{m}$ 長波長帯 GaInAsP/InP 系単一量子細線の低温評価、およびレーザー評価システム開発

東工大の荒井チームの作製する $1.5\mu\text{m}$ 長波長帯量子細線の評価計測を行う共同研究では、図17に示すように、ドライエッチング・埋め込み再成長によって作製された幅 $W=6\text{--}39\text{nm}$ の InGaAsP/InP 系単一量子細線の低温顕微 PL 計測に成功した。関連文献を調べてみると、エッチングにより形成された単一細線の PL 評価は 70nm より太いものしか過去には例が無い。即ち、単一「量子」細線の評価例は過去に存在しない。これは、過去の細線ではエッチングによる界面ダメージの影響が大きすぎて PL 強度が著しく劣化してしまい観測にかからなかったものと推察される。図17の結果が測定できたこと自体、エッチング細線の試料品質が劇的に向上したことを示している。得られたデータの PL 線幅や PL 強度の定量的な解析を行うことにより、細線の損傷の程度や原因が荒井チームにフィードバックされ、さらなる品質向上が進められている。

さらに共同研究を進展させて、InGaAsP 系の単一量子細線レーザーや多重量子細線レーザーの開発および、利得スペクトル・吸収スペクトル・内部ロスなどの評価を行うプロジェクトが荒井チームとの間で進行中である。試料作製依頼に先立って、秋山チームでは、 $1.5\mu\text{m}$ 長波長帯の測定のために $0.8\mu\text{m}$ 短波長帯 T 型 GaAs 量子細線レーザーの評価のため開発したノウハウを組み込んだシステムを構築し、従来の典型的な評価装置に比べて測定感度や測定波長範囲の著しい改善を達成した。InGaAsP 系量子井戸レーザー試料を用いて、利得や内部ロス・利得の評価、室温パルス励起での評価、低温での評価など予備測定も進んでいる。

(J) 研究実施内容及び成果のまとめ

以上のとおり、(A)電流注入量子細線レーザーの作製とその特性、(B)量子細線レーザーの物理と光励起による分光計測実験、(C)単一量子細線レーザー素子を用いた光透過実験、(D)ハートリー・フォック近似理論による量子細線レーザーの利得特性解析および実験との比較、(E)ゲート付き FET 型変調ドープ単一量子細線デバイスの作製と計測、(F)T 型量子細線構造の高品質化、(G)

へき開再成長試料プロセス技術の開発, (H)顕微光学測定システムの開発, (I)東工大荒井チームのドライエッチング埋め込み再成長法による $1.5\ \mu\text{m}$ 長波長帯 GaInAsP/InP 系単一量子細線の低温評価, およびレーザー評価システム開発, について成果が得られた。

これらは, 当初計画の項目としてあげていた, 「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, 非線形全光スイッチとモードロック動作, 顕微光学測定システムの開発と製品化」のうち, モードロック動作を除いてほぼ全てカバーしている。さらに, $1.5\ \mu\text{m}$ 長波長量子細線レーザーなど当初計画外の成果も得ることが出来た。

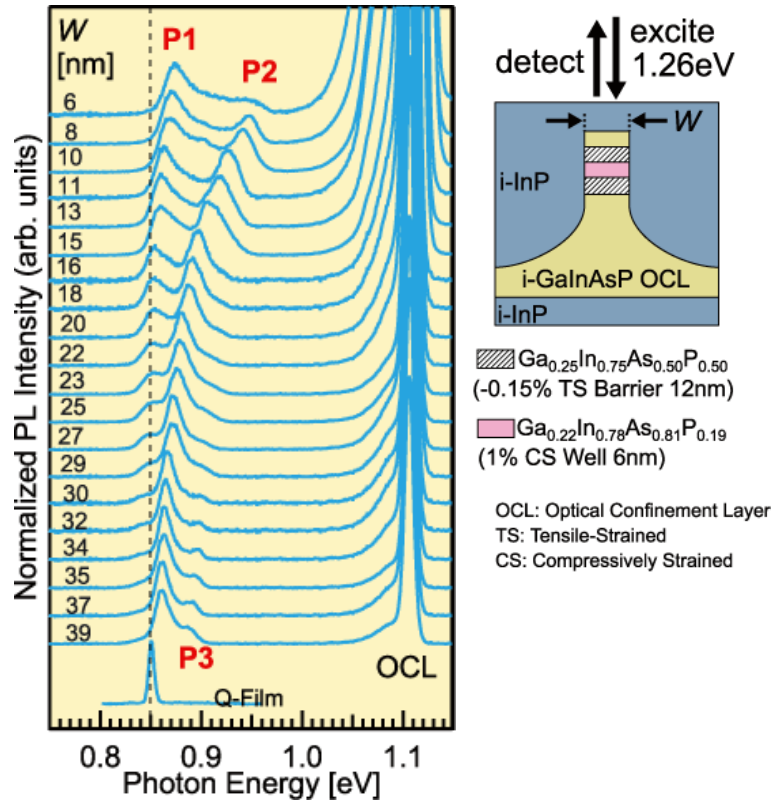


図 17 ドライエッチング・埋め込み再成長法により作製した $1.5\ \mu\text{m}$ 長波長帯 GaInAsP/InP 系単一量子細線の構造(右)と低温顕微 PL スペクトル(左)。 W は細線の幅。

(2)研究成果の今後期待される効果

本研究では, 0.27mA の低い値の 20 本 T 型量子細線電流流入レーザーが作製・評価され, また, その利得スペクトルやピーク利得特性など基礎的データが得られた。これらの結果は, 構造不均一性や界面のダメージなどの影響が少ない高品質の量子細線レーザーであれば, $10\ \mu\text{A}$ レベルのさらに低い値電流も実現可能であることを示している。量子細線 1 本 1 本自体は非常に小さな透明電流さえ超えれば利得を持つことが確かめられたので, あとは, 量子細線の本数を減らし, 長さ短くして, かつ, 光の内部損失と共振器ミラー損失の低いレーザー共振器構造を形成すればよい。原理的な問題はなく, 技術な問題をクリアすればよいとの見通しがえられ, 今後の研究に向けての貴重な知見・材料となった。そのような超低しきい値電流で動作するレーザーは半導体レーザー研究の一つの夢であるが, それが実現できた先のそのレーザー出力光の性質, 特に, 光子統計的な性質は未だ研究されていない。本研究をさらに進展させることによって, 超低しきい値電流で動作するレーザーを作製しその光子統計的性質を実験及び理論の両面から調べたい。

これまでのレーザー理論では, 多数の現象論的なパラメータを用いてレーザーの性質を記述しそのパラメータは実験データとの比較によってのみ決定できるような現象論か, あるいは, ミクロなモデルに基づいてレーザーの性質を記述するがその際に著しい単純化をして電子間のクーロン相互作用などは一切無視する自由電子モデル理論かが主流であった。というのも, 過去これまでの実験研究では, 量子細線の構造不均一性や界面のダメージなどの影響が強く, 実験データを理論計算と比較して理論の精度を定量的に議論することは困難であったからである。しかし, 本研究によって, 構造不均一性や界面のダメージなどの影響が十分に小さい結晶品質のよい量子細

線レーザーの基本的性能が実験的に調べられるようになり、その結果を理論計算と定量的に比較・吟味することができるようになった。実際、ハートリー・フォックレベルの近似で多体効果を取り入れた理論との比較検討が達成できた。さらに、さまざまな近似法を駆使して電子間の多体クーロン相互作用を取り入れる高度な微視的モデル理論計算が、どれだけ正しいかチェックを行うことが可能になった。微視的モデル理論計算の強みは、未知の構造・材料・次元からなる新しいレーザーの性能を予測できることである。今後、その強みを生かした研究が展開できるようになると予想される。

T型 GaAs 量子細線レーザーは、ひずみやダメージが殆どない極めて高品質の GaAs 量子細線を、検出器や評価用光源など測定装置や技術の整った $0.8\ \mu\text{m}$ 短波長帯で調べることが出来るという基礎研究上の大きな利点がある。しかしその一方、MBE へき開再成長という非常に特殊な作製技術と装置を必要とし、生産コストが高く、大量生産が困難で、しかも応用上重要な $1.5\ \mu\text{m}$ 長波長帯の材料には適用が難しいという実用上の欠点がある。従って、T型 GaAs 量子細線レーザーの基礎研究を、如何に応用・実用につなげてゆくかは、次のステップの課題として残されていた。

しかし、本 CREST プロジェクトにおいて、東工大荒井チームが作製し進めている量子細線レーザーの研究に出会った。これは、応用上重要な $1.5\ \mu\text{m}$ 長波長帯で、大量生産可能なドライエッチング・埋め込み再成長法によって作製される量子細線レーザーに関するものであった。そして、私たちの顕微光学計測技術を活かして、共同研究をするチャンスまで得ることができた。既に、単一量子細線の低温 PL 評価に関しては成果が得られ、 $1.5\ \mu\text{m}$ 長波長帯レーザーの評価システムの開発も進んだので、いよいよ本丸である $1.5\ \mu\text{m}$ 長波長帯量子細線レーザーの研究を進めてゆきたい。それによって本 CREST 研究で行った基礎研究の応用への橋渡しができるものと期待している。

本研究では、量子細線レーザーの特性解明を目指して研究を行った。さらに、量子細線レーザーの導波路に外部から光を結合して出力光をモニターする透過実験を成功させることが出来たし、また、量子細線中の電子正孔密度や電子密度を制御することで光吸収・透過・利得を制御する実験も可能になった。これらは、量子細線を用いた光変調器や光スイッチなどのデバイスの基礎実験ともなっている。これらの成果を、光通信応用の分野で関心の高い高速外部変調や全光スイッチングの基礎研究にもつなげてゆきたい。

本研究で開発を行った、顕微光学測定システムや技術は、極めて応用範囲が広い。デバイス中の単一のナノ構造の微弱光信号を計測する技術は、趣は一見かなり異なるが、たんぱく質酵素の中で反応を起こす生体物質の光学評価や、医療・創薬・環境計測など極めて微量の物質を高感度に検出する化学分析技術に直結している。実際、本研究で開発を進めた絶対発光光量計測技術は、生物化学発光の計測分野で極めてニーズの高いものであることが解った。民間企業と協力して、技術の普及や製品化も進め、社会に成果還元をしてゆきたいと考えている。

3. 2 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（大阪大学 小川グループ）

(1) 研究実施内容及び成果

本研究終了報告書の冒頭の概要でも述べたように、小川グループでの理論的研究は、2つの方向性・目標をもって並行して推進した。一方は、半現象論的・半微視的な近似理論を駆使し、レーザー発振過程や利得形成過程の定量的な考察と理解を目指す方向性であり、これらは、以下で解説する個別の研究テーマの(A), (B), (C)が相当する。他方、物理学の基礎理学的立場から低次元半導体を見直し、ソフィスティケートされた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現象や新効果・新パラダイムを探索する方向性は、以下の(D), (E), (F), (G), (H), (I), (J)が相当する。

(A) 遮蔽ハートリー・フォック理論による半導体量子細線（擬1次元系）の利得特性の研究

自由キャリア理論(FCT)に基づくと、1次元結合状態密度の形状により、半導体量子細線レーザーは高次元半導体レーザーよりも高い性能があると予測されてきた。しかし、非ドープ半導体量子細線に対する数値計算によると、励起子効果を考慮することにより、バンド端より高エネルギー側の光吸収は、大幅に減少することが明らかになっている。すなわち、量子細線系では、クーロン相互作用は非常に重要な役割を担っている。そこで我々は、多体クーロン相互作用によって誘起される相関効果を取り入れて、量子細線（擬1次元系）の利得特性を系統的に詳しく研究した。

対象とする系は、断面が $14\text{nm} \times 6\text{nm}$ の GaAs 単一量子細線で、単一モード光導波路中に埋め込まれて作成されている。電子(e)と正孔(h)は、最低エネルギーサブバンドに存在するとして、2バンドモデルを適用する。クーロン相互作用の行列要素は、3次元クーロン相互作用を、閉じ込め方向の波動関数で平均したものを用いて計算した。

このような電子-正孔系は、双極子相互作用を通じて電磁場と結合している。利得と光吸収スペクトルは、遮蔽ハートリー・フォック(SHF)近似の範囲内の半導体ブロッホ方程式(SBE)を用いて計算することができる。我々の計算結果の要点は、以下の通りである。

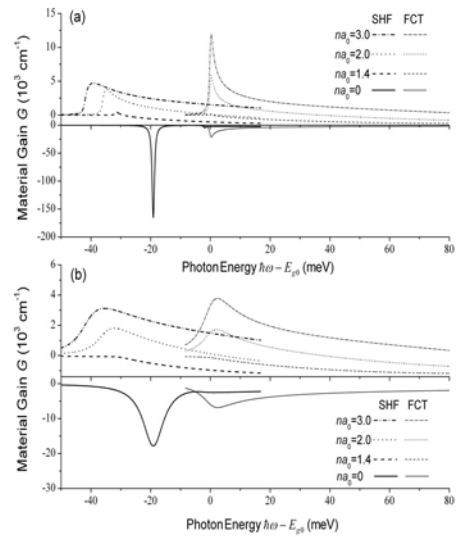


図 A-1 SHF と FCT で計算された利得吸収スペクトル。温度は 300K で、キャリア密度は $n_{a0}=0, 1.4, 2$, and 3 。緩和定数は、(a)が $\gamma=0.42$ meV and (b)では、 $\gamma=4.2$ meV。

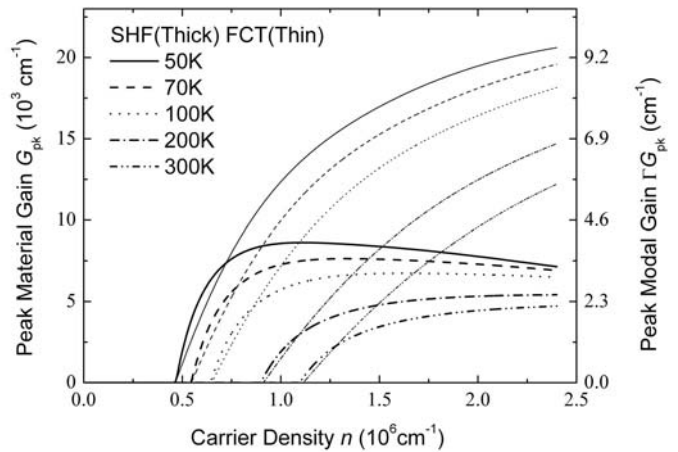


図 A-2 様々な温度でのピーク利得値 G_{pk} をキャリア密度の関数として描いた。太線が SHF、細線が FCT の計算結果。 $\gamma=0.42$ meV。モード利得の値は、右縦軸に記してある。

- 1 利得・吸収スペクトルは、図 A-1 のように、クーロン相互作用によって大きく変形する。バンド端は、バンドギャップ繰り込み効果(BGR)によって、低エネルギー側にシフトする。低密度領域では、バンド端の特異性は、励起子効果によって消える。高密度領域では、利得ピークの形は変形され、緩和定数で与えられる「ぼけ」よりもさらにぼける。
- 2 図 A-2 に示すピーク利得には、下記のような特徴的な性質がある。
 - (ア) 「透明密度」(吸収が 0 となり利得が発生し始める時の粒子密度) は、温度に敏感に依存するが、緩和定数には敏感ではない。クーロン相互作用には少し依存する。
 - (イ) 透明密度近傍の密度領域では、微分利得が増大する。
 - (ウ) 低温で高密度領域では、ピーク利得は減少する。

(イ)と(ウ)について、より詳しく解析するために、ピーク利得の SHF による計算値と FCT による計算値(ただし BGR 効果は取り入れる)の比を、図 A-3 に描いた。透明密度領域近傍で、ピーク利得はクーロン相互作用によって増大していることが分かる。密度を増大させると、この増大効果は急激に減少し、高密度領域では抑圧する効果に転じる。これらの効果の物理的理由は、電子-正孔相関関数の振る舞いによって理解することができた。

図 A-4 の電子-正孔間の空間相関関数が示すように、透明密度領域近傍では、電子-正孔間には有効引力が働く。これが、ピーク利得のクーロン増大効果につながっている。しかし、高密度領域では、電子-正孔間の有効相互作用は、遮蔽効果とパウリブロッッキング効果が強く働いて斥力となる。有効クーロン相互作用の短距離成分は引力で、透明密度近傍で重要となる。一方、高密度側では、長距離成分が部分的に負(斥力)となり、これによって利得が減少する。秋山チームによる実験結果も、以上のようなピーク利得の減少と同じ傾向を示しており、この現象は、クーロン相互作用が強く効き、狭い波数空間内でのパウリブロッッキング効果が有効的に効きやすい量子細線系に特有の現象である。

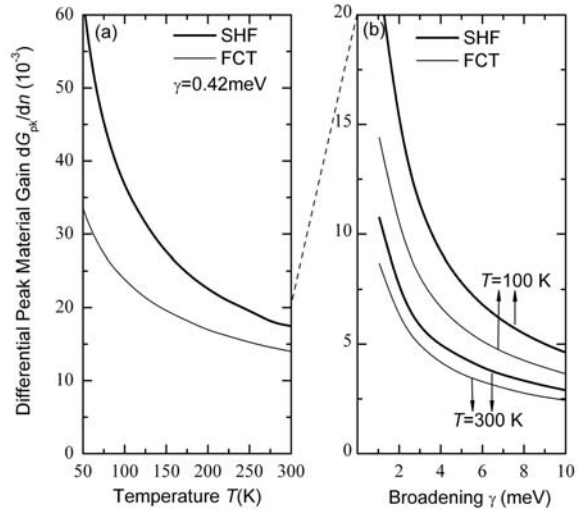


図 A-3 SHF と FCT とで計算したピーク利得の比 $G_{pk}^{SHF} / G_{pk}^{x_0}$ のキャリア密度依存性。

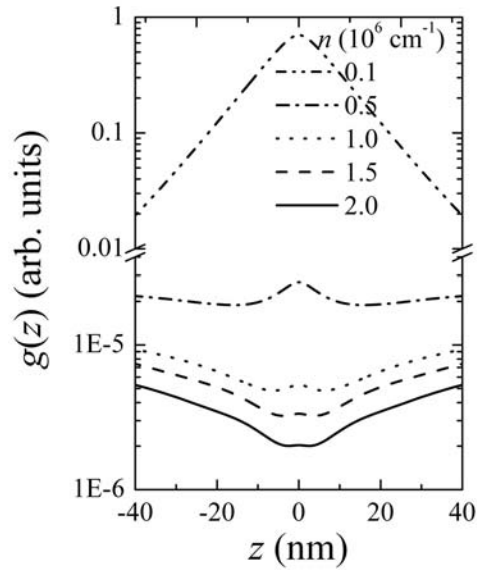


図 A-4 50K での電子-正孔相関関数 $g(z)$ 。

(B) 遮蔽ハートリー・フォック理論による電子ドープした半導体量子細線の光学特異性の研究

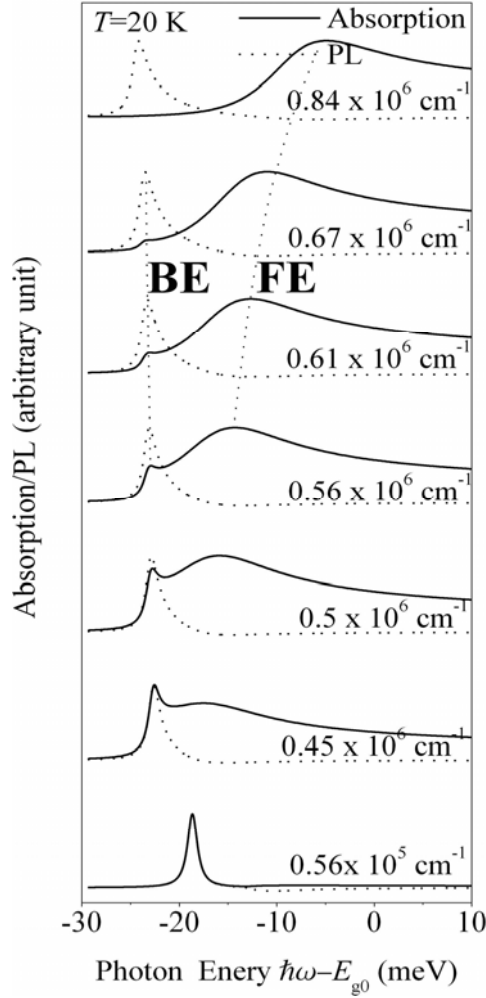


図 B-1 規格化された線形吸収スペクトル(実線)と発光スペクトル(点線)。SHF で計算したもの。

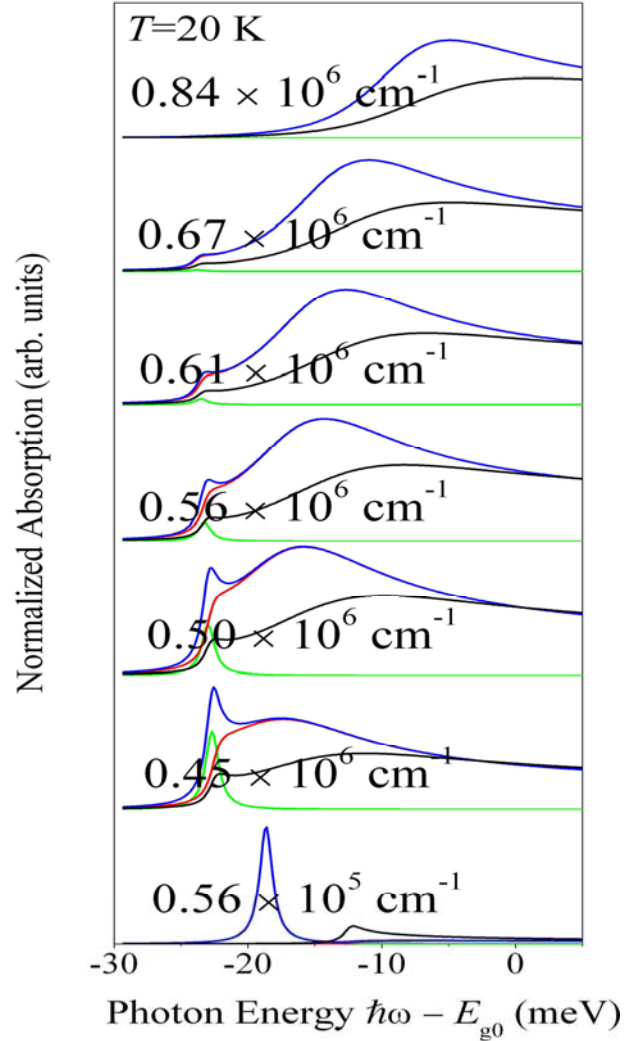


図 B-2 SHF で計算した 20K の吸収スペクトルに対する最低エネルギー励起状態 (1s 励起状態) の寄与 (緑), 他の励起状態の寄与 (赤), 全状態からの寄与 (青)。FCT での計算結果は黒線。

電子ドープした量子細線は、3 種類の特異性の間の関係やクロスオーバーを研究するのに有用な対象である。その 3 種類の特異性とは、1 次元励起子(X)ピーク、1 次元状態密度に起因するバンド端(BE)ピーク、フェルミ端特異性(FES)ピークである。そこで、電子ドープした GaAs 単一量子細線 (14 nm × 6 nm 断面積) を用いて、系統的な研究を進めた。吸収係数は、SBE に基づいてバンド間分極の虚部を計算することにより評価し、発光 (ルミネッセンス) 強度は、非平衡グリーン関数 (NEGF) 法により計算した。

図 B-1 には、ドーピング密度を変化させた時の、20K での、(規格化された) 吸収と発光スペクトルをプロットしている。正孔密度は、 $5.6 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$ として十分に小さく設定している。吸収スペクトルには、3 種類のピークが出現する。

- (1) 低密度では、シャープで対称なピーク
- (2) 中間密度では、二重ピーク構造。ドーピング密度を上げると、低エネルギー側のピークはレッドシフトし、高エネルギー側のピークはブルーシフトを示す。
- (3) 高密度では、単一の非対称なピークで、ブルーシフトを示す。

低密度領域(1)と高密度領域(3)のピークは、励起子と FES によるものであることは直ちに分かる。そこで、中間密度領域でのピーク構造を詳しく調べるために、図 B-2 のように、全吸収に対する、基底状態(1s 励起子状態)からの寄与と励起状態(より高いエネルギーの励起状態)からの寄与を分離して抽出してみた。これにより分かったことは、低エネルギー側の非対称 BE ピークは、1 次元状態密度のバン・ホーベ特異性と励起子共鳴の両方からの寄与から生じるクーロン相関ピークであることである。バンド端におけるこの二重共鳴は、図 B-3 に示す振動子強度の計算からも確認できる。他方、高エネルギー側の第2のピークは、フェルミ端での吸収で、そのブルーシフトは BGR の補正を受けた Burstein-Moss シフトである。

励起子ピーク、バンド端ピーク、フェルミ端ピークのカrossオーバーは、温度上昇によっても見ることができる。電子ドーピングした量子細線の系統的研究は、理論と実験結果の良い一致を示している。

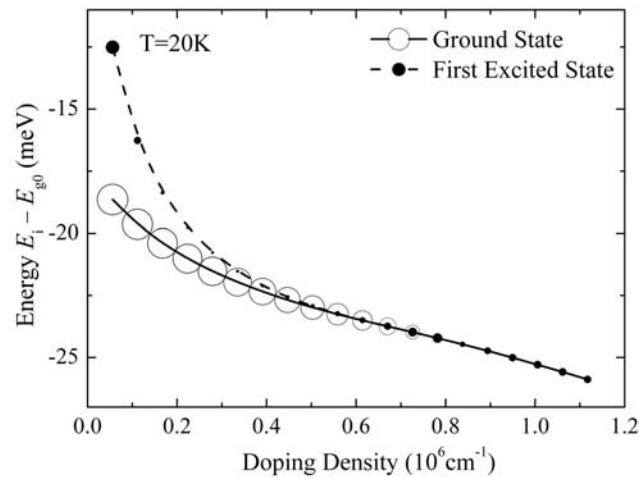


図 B-3 実線(点線)は、20K の量子細線の 1s 励起子状態(第一励起状態)のエネルギー。円の直径は、その状態の振動子強度に対数スケールで比例している。

(C) 半導体量子細線の線形光学スペクトルの計算手法の開発

量子細線の吸収スペクトルは、準平衡条件下での SBE に基づいて、バンド間分極を計算することによって得ることができる。この計算においては、下記のように、いくつかのポイントがある。

- (1) 遮蔽効果: 電子-正孔プラズマ描像では、静的誘電関数は乱雑位相近似(RPA)やプラズマポール近似(PPA)の範囲で導出できる。これらの誘電関数(遮蔽関数)は、高密度領域では非常によい近似である。しかし、低密度領域では、遮蔽を過大評価している。よって、SHF は、高温あるいは高密度領域で有効な計算手法である。電子-正孔プラズマではなく、励起子が主要となる密度領域では、電子-正孔描像に基づく誘電関数は使えない。SHF を中間密度領域や中間温度に適用する際は、その有効性を慎重に検討する必要がある。
- (2) 緩和定数(減衰定数)の取り扱い: SHF 計算では、現象論的な緩和定数を、計算途中に手に入れなければならない。これによって、バンドギャップ中に、ローレンツ関数の(非物理的な)長い裾が現れてしまう場合がある。動的遮蔽関数を用いると、温度や

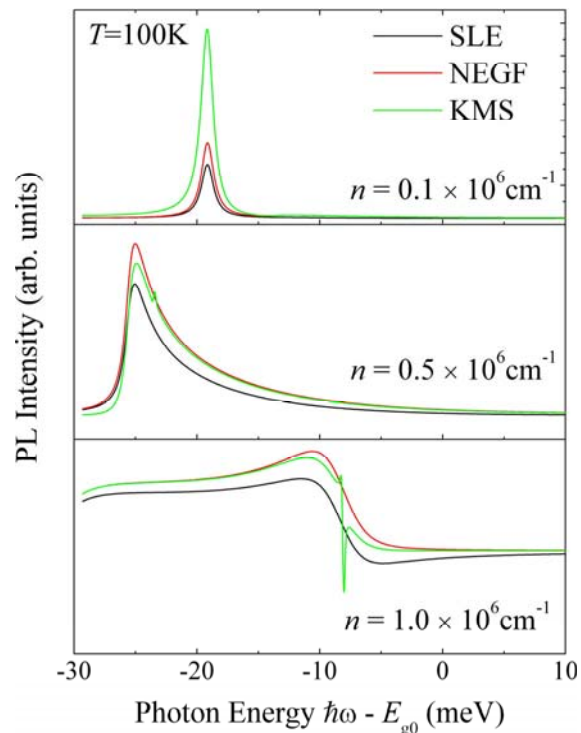


図 C-1 非ドーピング量子細線の 100K での発光スペクトルの計算例。SLE は黒線、NEGF が赤線、KMS は緑線。KMS 関係式を使う方法では、全化学ポテンシャルのエネルギーで発散が生じる。また、高密度領域では、SLE では負の発光が生じてしまう。

キャリア密度に依存する緩和定数を導入することが可能となる。しかし、対角位相緩和効果と非対角位相緩和効果を同等に取り扱わなければ、正しい結果は得られないため、計算は難しい。はしご近似と同等な自己無撞着 T 行列近似は、この目的のために有用である。

- (3) スペクトル表示: 有限の緩和定数を導入するために、エネルギー保存則が破れ、吸収から利得への移り変わりが化学ポテンシャル位置からシフトしてしまう現象が生じる。これが原因で、KMS 関係式を用いて発光スペクトルを計算しようとする、発散や負の発光が生じるという問題が起こる。この問題は、グリーン関数法のスペクトル表示を用いることで解決できる。しかし、別の問題が生じることが明らかになった。それは、透明であるはずのバンドギャップ中に、非物理的な利得の長い裾が残ってしまう問題である。これにより、ドーピング系では、実際には生じない架空の発光ピークが、バンドギャップエネルギー内に生じてしまう。

クーロン相関係の自然放出や発光スペクトルを正しく計算する手法の開発は、非常に重要である。我々は、発光スペクトルを、KMS 関係式を用いる方法と、半導体ルミネッセンス方程式(SLE)を用いる方法の両方で計算してみた。KMS 関係式を使う方法の欠点は、上記の項目(3)で示したとおりである。SLE 法は、光誘起バンド間分極の運動方程式に基づく方法で、相関関数のヒエラルキーを構成する形式になっており、クラスター展開法で系統的に解くことができる。SHFレベルの計算では、SLE での発光スペクトルは、非ドーピング細線でもドーピング細線でも、低密度領域では有効であるが、高密度領域では「負の発光」の問題が生じてしまう。これを改善するには、ヒエラルキーの高次の相関関数を含める改良が必要である。

NEGF 法では、電流-電流相関関数から発光を計算するが、ここでは負の発光問題は現れない。SHF レベルの近似において、NEGF 法で発光スペクトルを計算し、SLE 法や KMS による計算結果と比較した。非ドーピング量子細線の場合が図 C-1 である。NEGF による発光は常に正で、低次元領域では SLE の結果が、高密度領域では KMS による結果(発散点を除く)が、NEGF 法による結果の良い近似になっていることが分かる。

(D) ボゾン化法による 1 次元電子-正孔系の量子状態の研究

光で強励起された量子細線において実現される一次元電子-正孔系は、バルク(3次元)系との比較した時以下の特徴を持っている。

- (1) 強い励起子・励起子分子効果: 束縛エネルギーが非常に大きく、束縛状態がしやすい。
- (2) 朝永-ラッティンジャー流体効果: フェルミ液体論の準粒子描像が破綻し、集団励起のみ重要。
- (3) 弱い遮蔽効果: 電荷は細線上にしか分布できないため遮蔽効果が小さい。
- (4) 強いパウリブロッキング効果: 低次元系であるため、電子や正孔に対する位相空間の制限が強い。

重要なのは、(3) の効果のため、典型的な相互作用エネルギーの尺度が電子-正孔密度によらず、励起子の束縛エネルギー程度であり、これが 100 K 近くにまで達しているという事実である。つまり、実際に実験が行われている液体ヘリウム温度近傍(4~5K 程度)は、系の多体効果について考える上では低温極限に近いと言える。そこでは、低密度側で (1) の効果が、高密度側で (2) の効果が顕著になるので、純 1 次元系においては、いかなる電子-正孔密度においてもランダウのフェルミ液体論が破綻していると考えられ、フェルミ液体論を立脚点としている半導体ブロッホ方程式や摂動論といった既存のアプローチの正当性が、甚だ疑わしいものとなる。

上記の問題がどの程度深刻な影響を与えるか調べるために、高密度領域(弱相関領域)に注目して、ボゾン化法と繰り込み群を用いた考察を行った。これにより、定性的な振る舞いに関しては厳密解に匹敵する結論を導くことができた。具体的には、電子と正孔のバンドを線形化し、電子および正孔それぞれの粒子およびスピン密度に対応する四つの集団モードをボゾン演算子で表現して、有効ハミルトニアンを導出する。このハミルトニアンは、電子-電子、正孔-正孔、電子-正孔間の相互作用項を含んでおり、それらはそれぞれ前方散乱と後方散乱を表す項に分類される。

まず、後方散乱項を無視し、前方散乱項のみを残したハミルトニアンを考察した。クーロン相互作用の長距離性のため、前方散乱が非常に大きい(運動量ゼロの極限で発散)という事実を反映し、基底状態は金属的であるにも関わらず、励起子分子の液体的な相関を強く示す。後述のように、

実際には後方散乱により電荷およびスピン励起ギャップが開くので、この結果は、後方散乱を無視できるギャップを超える温度で、励起子分子液体的な相関が残ることを示唆する。

次に、後方散乱項の効果を繰り込み群と自己無撞着調和近似を使って考察した。その結果、電子-正孔間の後方散乱項が効いて、電荷密度(電子と正孔の粒子密度の差)、電子および正孔スピン密度に対応する三つの集団モードにギャップが開き、系が絶縁体になることが分かった。他方、質量密度(電子と正孔の粒子密度を、それらの質量の重みをかけて足したもの)に対応する集団モードには励起ギャップがなく、この自由度を記述するハミルトニアンが系の低エネルギー領域での性質を支配する。これらの事実を反映して、系の基底状態は、図 D-1 のように、励起子分子結晶(励起子分子が等間隔に並んだ格子)の性格を強く持つ。

また、線形応答の範囲で絶対零度の光吸収スペクトルについても考察した結果、フェルミ端を挟んで、低エネルギー側では負の吸収(光学利得)、高エネルギー側では正の吸収があり、ギャップの存在を反映して、それらの間に全く吸収のないエネルギー領域があることが示された(ただしギャップ中に孤立ピークが存在する可能性は残る)。つまり、絶縁体のままで光学利得が生じているわけで、系が金属化(電子-正孔プラズマを形成)することではじめて光学利得が生じるという半導体ブロッホ方程式の描像が、(少なくとも低温極限では)完全に破綻していることが分かった。

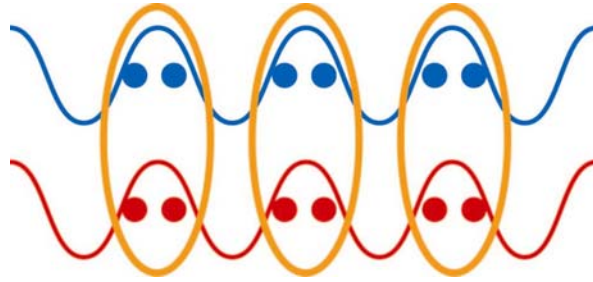


図 D-1 励起子分子結晶の模式図。青丸が伝導帯電子。赤丸が荷電子帯正孔。横軸は実空間座標に相当する。電子と正孔それぞれの電荷密度波が、位相を揃えてロックしている状況に相当する。

以上の結果は、低温かつ高密度の極限に対するものである。他方、低温かつ低密度の極限では、全ての電子と正孔が励起子か励起子分子を形成し、系は絶縁体となる。また低次元性を反映し、束縛状態のボーズ凝縮は起こらないと考えられるので、光吸収スペクトルには光学利得が生じないであろう。こうして、低温極限では、系が低密度から高密度に至るまで、常に強い励起子分子的な相関を持った絶縁体であり続ける(励起子モット転移がない)にも関わらず、密度を高密度側から減少させていくと、ある密度で光学利得が消失するという予想が得られる。

こうした結論は定性的なものではあるが、強い励起子分子相関と非フェルミ液体効果という一次元系の特殊性を反映した新奇なものである。なお、励起子分子相関が高密度領域まで強く効いていることは、実際に実験で測定された発光スペクトルにおいて確認されている。

(E) 動的平均場理論による電子-正孔系の励起子モット転移と光学応答の研究

1次元電子-正孔系や擬1次元電子-正孔系の特徴を浮き彫りにするためには、バルク半導体の3次元電子-正孔系も調べて比較するのが有益である。3次元電子-正孔系では、低密度領域では励起子気体という絶縁体相、高密度領域では電子-正孔プラズマという金属相が生じることが予測されており、粒子数密度を変化させた際に生じるこの金属-絶縁体転移を「励起子モット転移」と呼ぶ。この相転移を理解し、光学過程との関連を調べることで、レーザー反転分布状態の詳しい理解と利得形成に対するクーロン相互作用の効果を理解することにつながる。

3次元電子-正孔系の量子状態を統一的に理解し、励起子モット転移がクーロン相互作用の強さや粒子数密度、電子-正孔質量差、温度などの条件にどのように依存するかを明らかにするために、高次元極限からのアプローチである動的平均場理論(DMFT)と厳密対角化法(ED)を併用して解析した。この相転移を理解するためには、多体クーロン相関効果を十分取り入れた考察が不可欠である。DMFT+EDは局所相関を厳密に扱うので、従来の摂動論的手法を越えた議論が可能となる。電子-正孔系を記述する最も簡単なモデルである2バンドハバード模型にこれを適用し、量子状態および相転移の様子を調べることによって、高次元極限で厳密な励起子モット転移の相図を絶対零度および有限温度において描くことに成功した。

電子および正孔が1/2フィリング(粒子数密度 $n=1$)の場合、電子間(正孔間)斥力 U および電子-正孔間引力 U' の平面において励起子モット転移の絶対零度相図が図E-1のように得られた(電子と正孔の質量が等しい場合)。ここでは2種類の絶縁体相、すなわち、モット-ハバード型絶縁体相(II)と励起子分子的絶縁体相(III)が現れる。各相転移の次数は2次である。 $U=U'$ のライン上では、 U と U' の競合により2つの絶縁体相の量子状態間の揺らぎが大きくなるために金属相(I)が安定化されるという顕著な特徴も明らかになった。さらに、電子-正孔質量差がある場合は、金属相とモット-ハバード型絶縁体相との間の相転移が電子と正孔とで非同時に起こるバンド選択型であること、一方、金属相と励起子分子相との境界線は電子-正孔質量比にほとんど依存しないことなども明らかにした。(赤い縦線で示された領域については後述の光学応答を参照。)

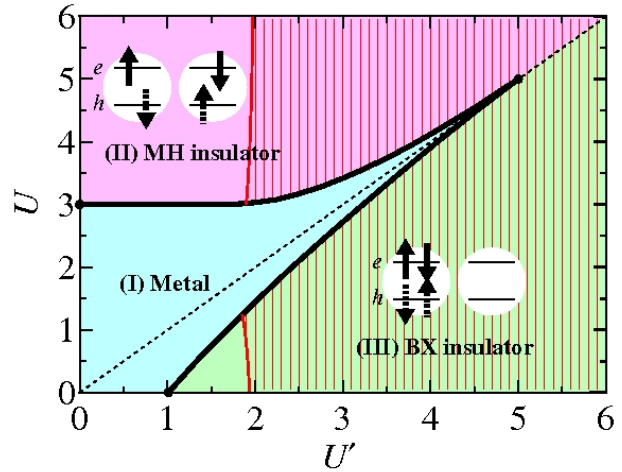


図 E-1 ハーフフィリングでの高次元電子-正孔系の絶対零度での相図。縦軸は電子-電子および正孔-正孔間斥力の大きさ、横軸は電子-正孔間の引力の大きさ。(I)は金属相、(II)はモット-ハバード型絶縁体相、(III)は励起子分子的絶縁体相。

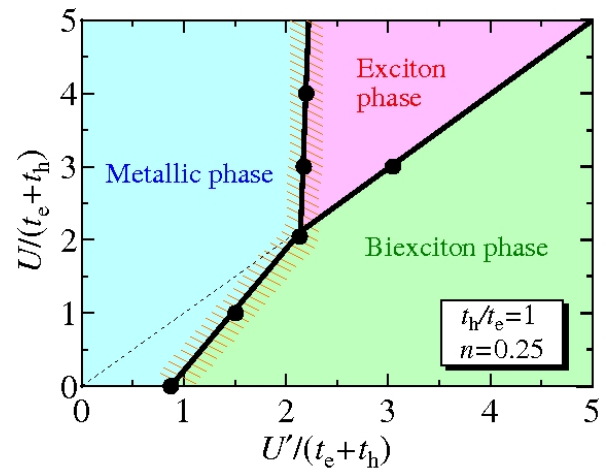


図 E-2 1/8 フィリングでの高次元電子-正孔系の絶対零度での相図。モット-ハバード型絶縁体相は消失するが、新たに励起子の絶縁体相が生じる。

上記の結果では1/2フィリングという特殊な状況に起因して、斥力 U の大きい領域でモットーハバード型絶縁体相が広く出現していた。任意のフィリングにするとこの絶縁体相が消えて金属相が広がるとともに、新たな絶縁体相として励起子相が現れることがわかった。図E-2に1/8フィリング($n=0.25$)の場合の絶対零度相図を示す。特に注目すべき結果として次の2点が挙げられる。(1) 金属相と励起子相の境界は斥力 U にほとんど依存せず、電子-正孔間引力 U' がある程度大きくなると励起子相が現れる。(2) 任意のフィリングでの励起子モット転移は1/2フィリングの場合と異なり1次相転移である、つまり、斜線で示した領域では金属相と絶縁体相のどちらでも存在し得る(ただし、ここでいう「共存」は「相分離」を意味しているわけではない)。

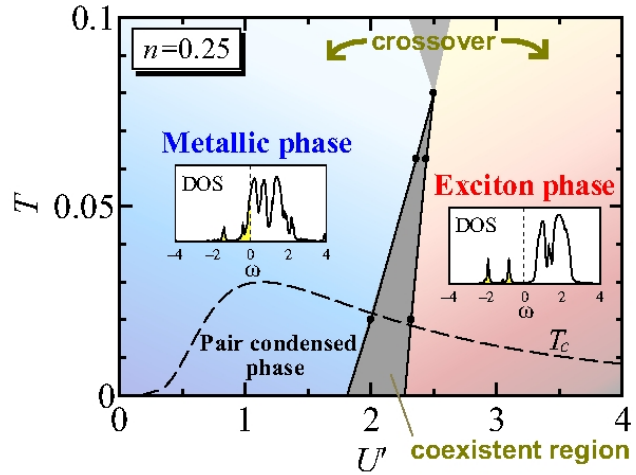


図 E-3 1/8 フィリングでの有限温度での相図。高温では、励起子モット転移はクロスオーバーになる。

この絶対零度における相図を有限温度に拡張した結果を図E-3に示す。 $U=U'$ および $n=0.25$ の場合(図E-2の対角線上)で横軸を U' 、縦軸を温度 T に採っている。有限温度において金属相と励起子相との間は1次転移であり共存領域が存在するが、この共存領域はある臨界温度以上で消滅する。すなわちこの臨界温度は、励起子モット転移の温度軸上での上限を意味し、相互作用する高次元電子-正孔系での励起子束縛エネルギーに相当すると考えられる。電子や正孔の状態密度(DOS)に注目すると、例えば励起子相においては、多励起子形成に由来する明確なギャップが低温で現れているのに対し、臨界温度近傍では電子-正孔対が熱解離するために金属相的なDOSに近づく傾向が見られる。このような金属相と励起子相の間のクロスオーバー的振舞いが臨界温度以上の比較的高温まで観測されることも様々な物理量を計算することにより明確に示した。

以上のように、励起子モット転移の境界を決定して相図を得るだけでなく、それぞれの相における量子状態をも同一の理論の枠内において記述できたことは強調されるべき重要な成果である。

さらに高次元電子-正孔系の励起子モット転移近傍における光学応答の性質を調べるため、図E-1の相図を基にして光学スペクトルを計算した。特に簡便化されたDMFT+EDと梯子近似の併用により、モットーハバード絶縁体相および励起子分子相でのバンド間吸収・利得スペクトルが解析的に求められた。この吸収・利得スペ

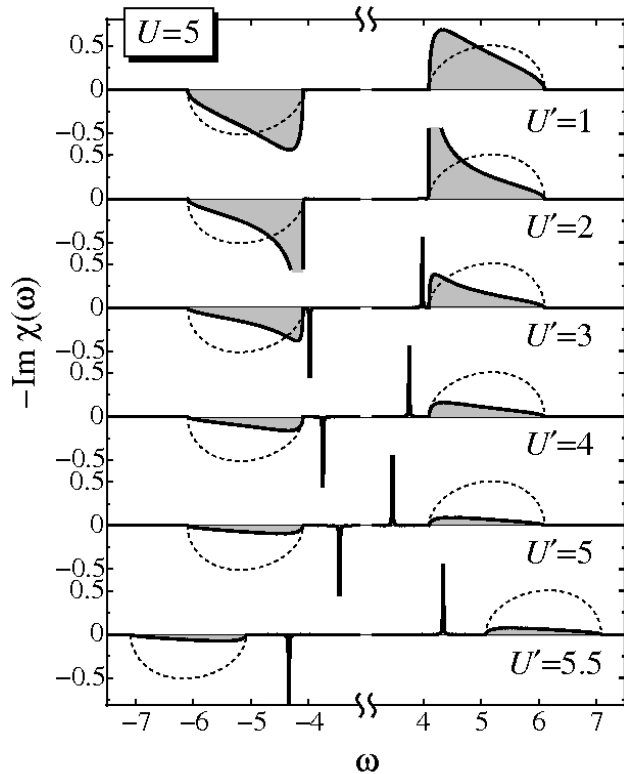


図 E-4 ハーフフィリングでの高次元電子-正孔系の吸収利得スペクトル。 $U=5$ に固定して、 U' を変化させている。 U' が2以上になると束縛状態に起因するピーク構造が現れる。

クトルを図E-4に示す(実線)。引力 U' を大きくしていくと励起子的な孤立ピークが出現する様子がわかる。これは絶縁体相における準電子と準正孔の束縛状態の形成を意味しており、このような励起子ピークが出現する領域を図E-1の赤い縦線で示した。この結果は、電子-正孔系のモット-ハバード絶縁体相が異なる2つの絶縁化メカニズムによって誘起されていることを強く示唆している。すなわち、斥力 U のみによる通常の意味でのモット-ハバード型の絶縁化と引力 U' による励起子形成に起因する絶縁化である。このような違いは状態密度などでは判別できず、本研究の光学スペクトルの解析によって初めて明らかにされた。

(F) スレイブボゾン平均場法による電子-正孔系の相図の研究

光で強励起された半導体や光学格子中の原子ガス系で実現される電子-正孔系を理解する上で、擬似的な熱平衡状態の相図を知ることは大変重要である。これに関して過去に行われてきた理論研究のほとんどは、電子-正孔プラズマがフェルミ液体を形成していることを仮定し、それに対する不安定性を議論することで相図を描くものであった。しかしその際、これらの理論が弱相関側のみで正確で、強相関側では信頼できないという点が問題になる。この点を解決するためには、弱相関から強相関に至る全領域を、統一的かつ同等に扱える理論の枠組みが必要となる。

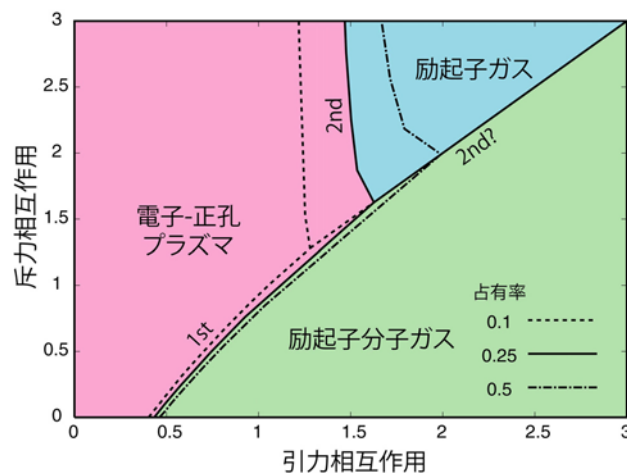
この目的に向けた第一段階として、電子-正孔ハバードモデルをスレイブボゾン平均場法によって考察した。このモデルは、電子間あるいは正孔間斥力をオンサイト相互作用 U で表し、電子-正孔間引力をオンサイト相互作用 U' で表した、非常に単純化されたものである。以下ではノンドープ系を光励起した系を念頭に置き、電子と正孔の占有率は共に n とし、 n は1より小さいとした。また、二次元的な系を想定し、電子と正孔の裸の(相互作用がない時の)状態密度は矩形形で、電子のバンド幅は正孔のバンド幅の二倍であるとした。

スレイブボゾン平均場法では、1サイト上における電子と正孔の配置(計 16 通りある)それぞれに対し、異なる種類のボゾンを割り当て、それらの数演算子のみを使って相互作用項を表現する。ただし、このままではボゾンの分だけ系の自由度が増大してしまうので、この増大を打ち消すための拘束条件を導入する必要がある。また、電子や正孔の生成・消滅が1サイト上の電子-正孔配置を変化させることを反映して、相互作用による質量に対する繰り込みの効果が自動的に導入される。こうして得られた有効ハミルトニアンで平均場近似を行い、ボゾン演算子を全て c -数に置き換え、これらをエネルギー最小の条件を使って変分的に決定する。これらの c -数は各サイトに現れる電子-正孔配置の確率振幅という物理的な意味を持っている。

正常相を仮定して得られる $U-U'$ 平面上における基底状態の相図(図F-1)は以下に挙げる三つの相から成っている。

1. 励起子分子ガス絶縁相(引力相互作用が斥力相互作用より大きい)
2. 電子-正孔プラズマ金属相(引力相互作用が斥力相互作用より小さく、バンド幅より小さい)
3. 励起子ガス絶縁相(引力相互作用が斥力相互作用より小さく、バンド幅より大きい)。この結果は、相転移の次数を除けば、前項で説明した動的平均場近似による相図(図 E-2)と定性的に一致している。こうした非常に複雑な数値計算によって得られる結果を、非常に単純な計算のみで再現できることは大変興味深いことである。

また、占有率 n を減少させていくと、励起子ガス絶縁相と電子-正孔プラズマ金属相の間の相境界だけが移動し、励起子ガス絶縁相が広がっていくことが分かった。占有率が小さくなると、電子



図F-1 スレイブボゾン平均場法で得られた電子-正孔系の準安定相図(絶対零度)。粒子数密度(占有率)は、0.1, 0.25, 0.5の3通りを描いている。図E-2とほとんど同じ相図が得られている。

間および正孔間の斥力相互作用は有効的に小さくなっていくと考えられるが、電子-正孔間の引力相互作用の強さはほとんど変化しない。そのため有効的に励起子の相関が強まって、このような振る舞いが起こると考えられる。

現段階の結果は、電子-正孔対の凝縮の可能性が考慮されておらず、サイト間の相関効果が無視されているなど、課題を多く残したものである。ただし、凝縮相の可能性を考慮した場合の相図に関しては、ある程度の予想を立てることはできる。即ち凝縮の可能性まで考慮すると、励起子分子ガス絶縁相は励起子分子のボーズ凝縮相、電子-正孔プラズマ金属相は、電子-正孔クーパー対が凝縮した相、励起子ガス絶縁相は、励起子のボーズ凝縮相へ置き換わると予想される。これらの凝縮相はすべて絶縁相であり、電子-正孔の複合ボゾンの性格を変化させながら、互いの相の間をクロスオーバー的に移り変わると考えられる。

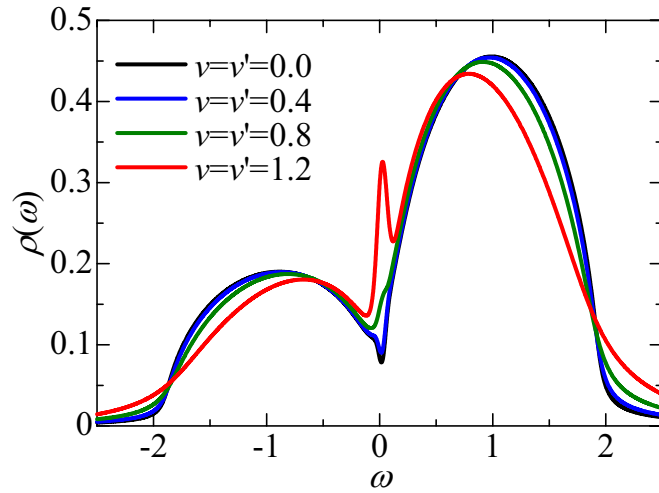


図 G-1 状態密度の計算結果。サイト間斥力相互作用 ν と引力相互作用 ν' を同時に変化させると、フェルミレベル($\omega=0$)にピーク構造が出現し、金属状態が安定化することがわかる。

(G) 拡張動的平均場理論による長距離クーロン相互作用の励起子モット転移への影響の解明

項目(E)で述べたように、電子-正孔系における励起子モット転移や凝縮転移を記述する理論を構築した。これらの研究では、電子-正孔系を2バンドハバード模型により記述し、動的平均場理論(DMFT)を適用することにより、電子相関効果を正しく取り入れた解析を行った。しかし、ハバード模型においては、on-site のクーロン相互作用のみが取り入れられているため、励起粒子が低密度の場合に重要となると考えられる、クーロン相互作用の長距離性が相転移にどのような影響を与えるかという問題は未解明であり、かつ重要な問題である。

そこで、ハバード模型を出発点とし、長距離クーロン力の効果について調べるため、サイト間相互作用を含む拡張ハバード模型を用い、拡張 DMFT による解析を行った。この方法は、系の空間次元が大きい場合に妥当な近似となっている。予備的な計算結果により、サイト間の電子-電子・正孔-正孔斥力 ν と電子-正孔引力 ν' が等しい場合は金属相を安定化する傾向があり(図 G-1)、逆に、 ν と ν' が異なる場合には絶縁相を安定化することを明らかにした(図 G-2)。上述のDMFT解析により、空間次元の大きい系においては、電子-正孔プラズマ状態から、ほぼ局在した励起子状態へと転移することが明らかにされている。このような金属-絶縁体転移の近傍において $\nu=\nu'$ が導入されると、この相

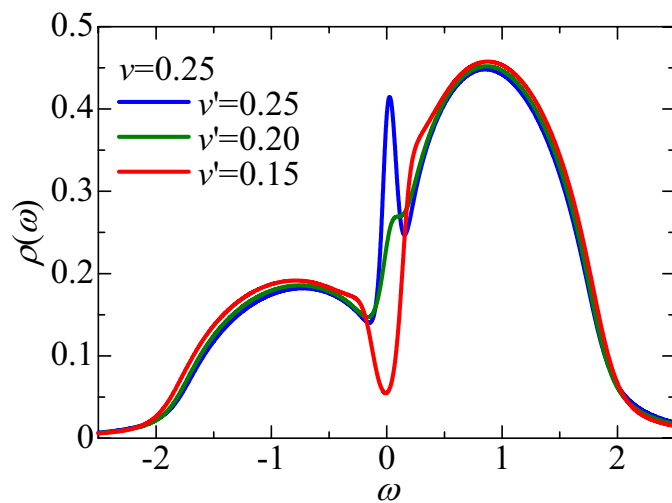


図 G-2 状態密度の計算結果。サイト間斥力相互作用 ν を固定し、引力相互作用 ν' を小さくすると、フェルミレベル($\omega=0$)にピーク構造が消滅し、絶縁状態が安定化することがわかる。

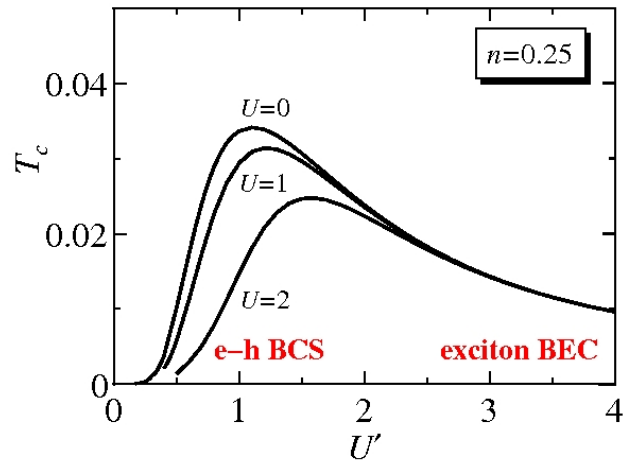
相互作用は励起子を空間的に広げる働きをするため、on-site の相互作用のみを取り入れた場合と比較して、電子-正孔プラズマ状態を安定化する。一方、 $v \neq v'$ は、on-site の引力相互作用と協力し、励起子の密度波的揺らぎを誘起するため、純粋なDMFT解析による励起子メカニズムとは異なった絶縁相を安定化することが明らかとなった。

(H) 自己無撞着T行列近似による電子-正孔系の量子凝縮相と光学応答の研究

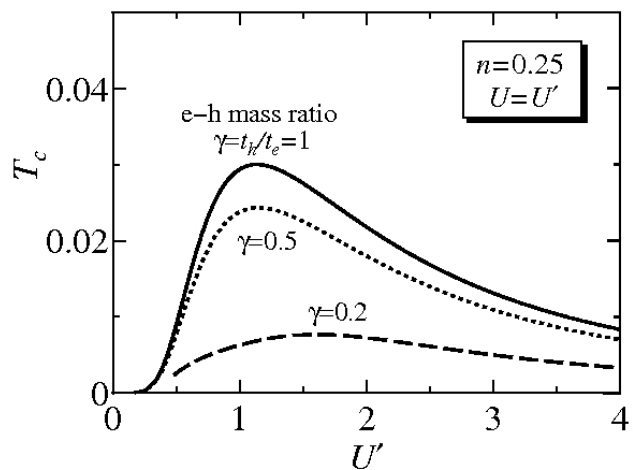
電子-正孔系の低温での量子秩序相として期待されている励起子のボーズ-アインシュタイン凝縮(BEC)相および電子-正孔のBCS的な対凝縮相について、これらの量子秩序相への転移温度や両者間の移り変わりとクーロン相互作用の強さや粒子数密度、電子-正孔質量差、温度などとの関連を解明するために、動的平均場理論(DMFT)と自己無撞着T行列近似(SCTMA)を併用して解析した。この近似は高次元低密度において妥当であり、弱結合領域から強結合領域までの相互作用パラメータにおいて定性的に信頼できる結果を与える。電子-正孔系を記述する最も簡単なモデルである2バンドハバード模型に対して電子-正孔対凝縮相への転移温度を計算し、それに基づいた相図を描くことに成功するとともに、高次元電子-正孔系の励起子BECおよび電子-正孔BCS状態の性質が各種パラメータにどのように依存するかを系統的に明らかにすることができた。

電子-正孔対凝縮転移温度の変化を追うことにより、電子-正孔間引力 U' の増加に伴って弱結合側の電子-正孔BCS状態から強結合側の励起子BEC状態へと移り変わっていく様子が明確に理解された。我々のSCTMAによる計算は、 U' に関して指数関数的に増大するBCS転移温度と U' に反比例するBEC転移温度の滑らかな移り変わりをよく記述する。このような振舞いを見せる転移温度に対して、特に、
(1) 電子間(正孔)間斥力相互作用 U 、
(2) 電子-正孔質量差、の効果に注目して解析を行い、以下の結果を得た。

図H-1は、電子および正孔が1/8フィリング($n=0.25$)の場合に、様々な U の値に対して対凝縮転移温度 T_c を U' の関数として示したものである。電子-正孔対凝縮転移の相互作用-温度平面における相図を表す。斥力相互作用 U の存在は、BCS領域において著しい転移温度 T_c の低下を招く一方、BEC領域においてはほとんどその影響がないことがわかる。 T_c 以上の正常相の性質を調べることによって、前者の原因が U による励起子相関の抑制にあることがわかった。また、後者の結果は U' によって強く束縛された電子-正孔対がほとんど中性ボーズ粒子のように振舞っているという描像の妥当性を裏付けている。



図H-1 1/8フィリングでの量子凝縮温度の U' 依存性。斥力 U を変えたもの。 U' が小さい領域が弱結合の電子-正孔BCS類似状態、 U' が大きい領域が励起子BEC状態。



図H-2 1/8フィリングでの量子凝縮温度の U' 依存性。電子-正孔質量比 γ をかえたもの。

電子と正孔の質量比を変えた場合の対凝縮温度 T_c を U' の関数として図H-2に示した($n=0.25$, $U=U'$ の場合)。電子-正孔の質量差が大きくなるほど、弱結合(BCS)から強結合(BEC)の全領域に渡って著しく T_c が抑えられることがわかる。このような T_c の振舞いを理解するため、BCSおよびBEC両極限で解析的評価を行い、その質量比依存性を顕に導くことで T_c 低下の原因を解明することができた。

以上のようにして、電子(正孔)間斥力相互作用が電子-正孔BCS状態の発現に大きな影響を与えることや、電子と正孔の質量差がこの系の量子秩序相形成にとって重要な要素の一つであることなど、他の量子凝縮(例えば高温超伝導やフェルミ原子気体のBECなど)との類似点や相違点といった観点からも興味深い多くの基礎的知見を得ることができた。

さらに、この高次元電子-正孔系の対凝縮転移や励起子BEC-BCSクロスオーバーが光学応答にどのように反映されるかを解明するため、吸収・利得スペクトルおよび発光スペクトルを計算した。DMFT+SCTMAを対凝縮相へ拡張することにより、転移温度以下での光学スペクトルの変化を系統的に記述することに成功した。

弱結合領域の電子-正孔BCS状態における発光スペクトルを図H-3に示す。絶対零度($T=0$)では、BCSのギャップを跨ぐ電子-正孔準粒子間再結合に起因した連続スペクトルが低エネルギー域($\omega < 0$)に、化学ポテンシャルの位置($\omega=0$)には対凝縮に伴う巨視的コヒーレンスを反映した巨大なピークが現れる。温度が高くなるにつれて、このコヒーレントピークの強度は減少していき、高エネルギー域($\omega > 0$)では熱的個別励起に由来する連続スペクトルが成長してくる。一方、強結合領域の励起子BEC状態では電子-正孔対が強く束縛しているため個別励起が許されず、コヒーレントピークのみしか現れない。したがって、中間結合でBCS状態とBEC状態とが移り変わる領域では両者の中間的な性質を持ったスペクトルとなると予想される。図H-4にこのような中間結合領域での光学スペクトルを示した。特に発光スペクトルではコヒーレントピークに加えて、BCS状態の特徴を表す連続スペクトルの肩が残っているが図H-3ほど明確ではない様子がよくわかる。

(I) 励起子密度展開法による励起子気体状態の光学応答の研究

SHF法が電子-正孔プラズマを仮定した高密度側からの接近理論であったのに対して、低密度側からの理論を構築した。バンド端を光励起した1次元の励起子気体相を研究対象とする。

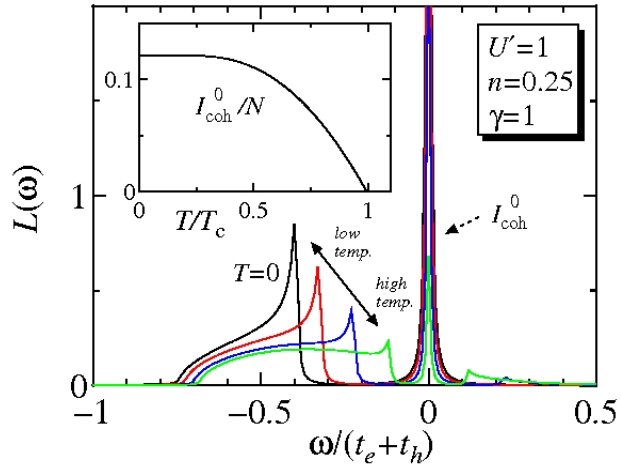


図 H-3 弱結合領域の電子-正孔 BCS 状態における発光スペクトル。

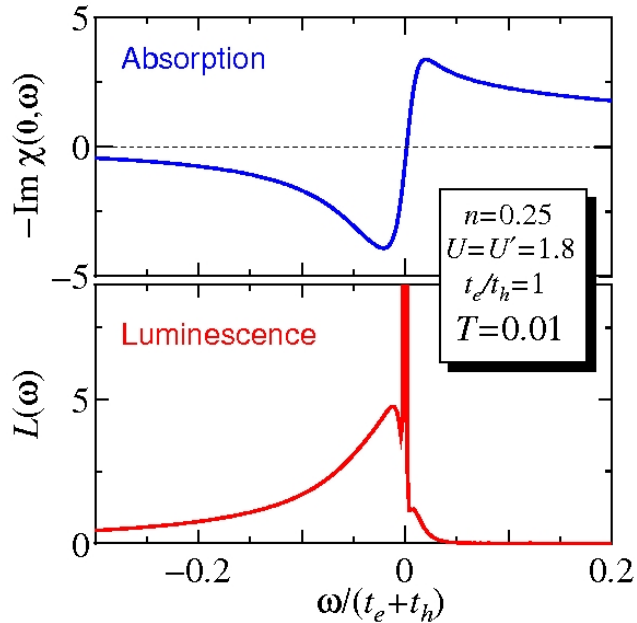


図 H-4 中間結合領域の吸収利得と発光スペクトル。

1次元電子-正孔系では、高次元のものと比較すると、励起子の束縛エネルギーが非常に大きくなることが知られており(温度に換算すると100K以上)、低温-低密度領域では安定な励起子気体相が実現される。そのため、励起子間相互作用が光学応答、物理量に大きく寄与することが考えられる。しかしながら、従来から用いられてきた理論(例えばSBE)では、励起子間相互作用を考慮していない。さらに、従来の理論は、電子-正孔プラズマのフェルミ流体中に電子-正孔のペアが埋め込まれた描像で定式化されている。そのため、この理論の適用範囲は高温かつ高密度であり、低温かつ低密

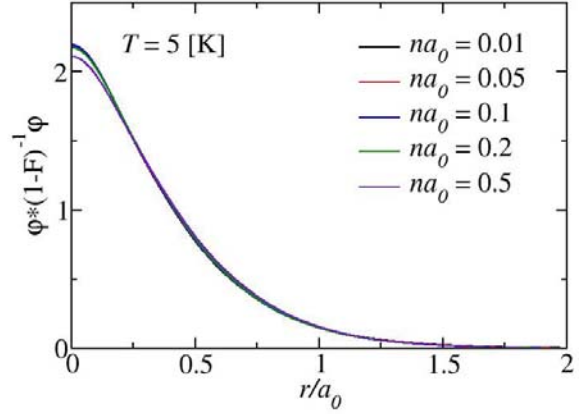
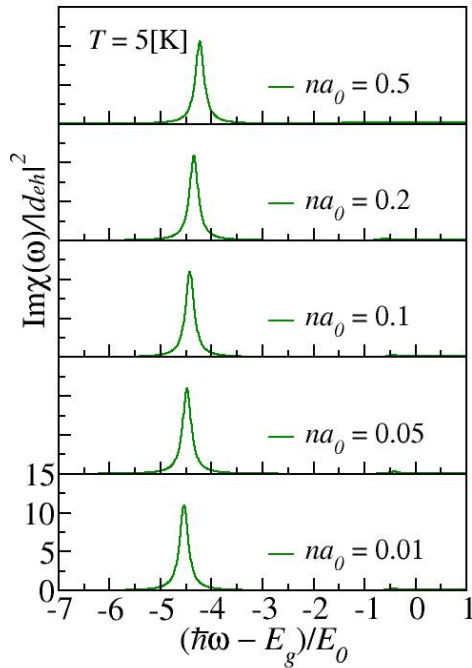


図 I-1 温度5Kにおける、励起子波動関数の密度(na_0)依存性。密度を上げるにつれて、励起子波動関数は広がる。つまり、バックグラウンドの励起子が増えるにつれて、電子と正孔の束縛が弱くなることを示す。



図I-2 温度5Kにおける、光吸収スペクトルの密度依存を示す。横軸の値が -4.55 ($na_0=0.01$)のピークは1s励起子を表し、 -0.45 ($na_0=0.01$)の小さなピークは第1励起状態(2s)のピークを表す。密度を上げるにつれて、1s励起子エネルギーはわずかにブルーシフトし、振動子強度は若干減少する。

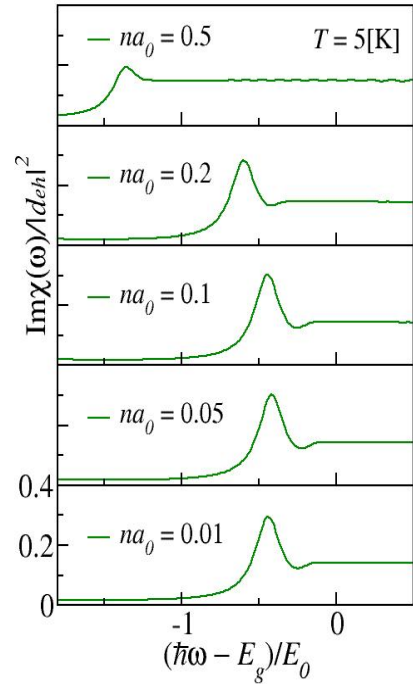


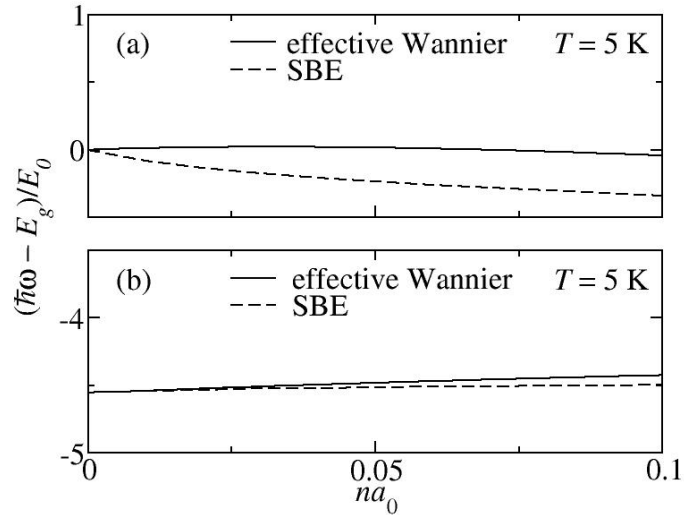
図 I-3 温度 5K における、光吸収スペクトルの密度依存のバンド端近傍を拡大した光吸収スペクトル。

度領域の計算には適用できない。そこで、本研究では、低温-低密度領域すなわち励起子気体相に注目し、熱分布した励起子中に光励起された1つの励起子を埋め込むという描像で定式化を行い、有効フニャ方程式を導出した。この理論では、励起子が複合粒子であるという情報も含まれており、電子と正孔のフェルミ統計性も適切に扱われている。バックグラウンドの熱分布した励起子と注目した励起子を自己無撞着に解くことにより、励起子の波動関数を求めることができる。その結果、求めた波動関数から光吸収スペクトルを計算できる。

図I-4に温度5Kにおける(a)バンド端と(b)1s励起子エネルギーの密度依存を示す。ここで、実線は有効ワニア方程式の計算結果、点線は比較のため半導体ブロッホ方程式(SBE)を同じ系で計算した結果である。 $na_0=0.05$ 以下の密度領域でバンド端は、わずかではあるがブルーシフトする。さらに密度を上げて、バンド端の密度依存は小さいことが分かる(図I-4(a)の実線)。この傾向は低温-低密度領域における実験結果を同じである。しかしながら、半導体ブロッホ方程式のバンド端は、密度を上げるにつれて大きくレッドシフトし(図I-4(a)の点線)、有効ワニア方程式、実験結果のバンド端の密度依存と大きく異なることが分かる。

半導体ブロッホ方程式と有効ワニア方程式のバンド端密度依存の大きな差異は、バックグラウンドの分布が異なること、励起子間相互作用の有無から生じる。半導体ブロッホ方程式は、バックグラウンドが電子-正孔プラズマのフェルミ分布に対し、有効ワニア方程式は励起子のボーズ分布に従う。そのため、半導体ブロッホ方程式の場合、パウリブロッッキング効果により、バンド端を大きくレッドシフトさせる。他方、有効ワニア方程式の場合、分布によるレッドシフトはあるが、我々の計算には、バンド端をブルーシフトさせる励起子間相互作用が適切に含まれている。そのため、有効ワニア方程式のバンド端密度依存は非常に小さくなる。

束縛エネルギーが密度を大きくしても有限であることから、低温の1次元電子-正孔系では、励起子の解離はないことが予想される。これは高密度で厳密な絶対零度のボゾン化法と同じ結果である。

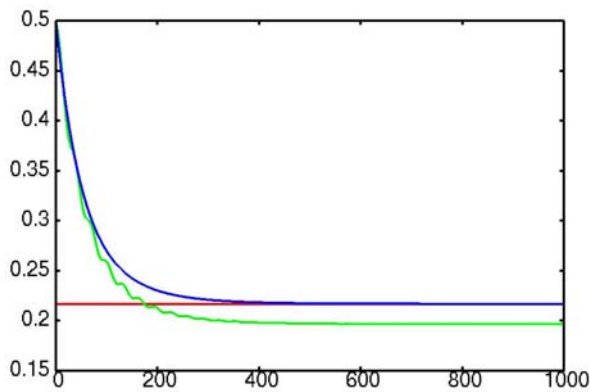


図I-4 温度5Kにおける(a)バンド端と(b)1s励起子エネルギーの密度依存性。1s励起子エネルギーの密度依存は、有効ワニア方程式(図I-4(b)の実線)と半導体ブロッホ方程式(図I-4(b)の点線)の両方において、小さいことが分かる。

(J) 結合した量子系の熱浴による緩和過程の研究

半導体レーザーは、電子-正孔系と共振器中の電磁場が結合しながら、エネルギー散逸(緩和)をする量子系の一例である。緩和問題は、現象論的緩和定数として導入されるのが常套手段であるが、その量子力学的原理を徹底的に理解しようとする、まだ未解明の点が多い。そこで、半導体と電磁場をできるだけ単純化した量子モデルで代用し、その緩和過程を研究した。

相互作用する二つの量子系が熱浴と接したときの量子緩和ダイナミクスは、まだ十分に解明されていない。従来からこのような相互作用する系の量子緩和を記述するのには、相互作用する個々の系がそれぞれ独立に緩和すると考えた、現象論的なマルコフ型量子マ



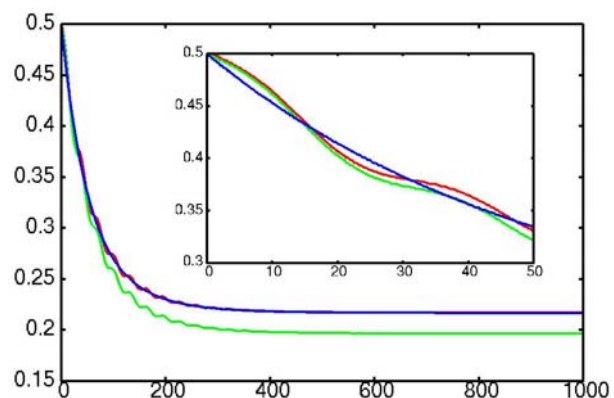
図J-1 量子緩和ダイナミクスの計算例。横軸は時間で、二準位系の遷移振動数で無次元化してある。縦軸は系が対角化した描像での $|+\rangle$ 状態にある確率。 $|+,-\rangle$ は対角化した描像での二準位系の状態を表す。パラメータは内部相互作用 $g=0.1$ 、緩和係数 $K=0.01$ 、逆温度 $=1.0$ 、離調 $\delta=0.0$ 。赤が熱平衡状態、緑が従来の式、青が強結合極限の式を表す。従来の式から得られる定常状態が熱浴との平衡状態と一致しないが、強結合極限の式から得られる定常状態とは一致することを示している。

スター方程式がよく用いられていたが、これには緩和して行き着く定常状態が熱浴との平衡状態を与えないという問題をもっていた。そこで本研究ではこのような相互作用する系の量子緩和が、量子マスター方程式によってどのように記述されるのか調べた。

その結果、たとえ熱浴の相関時間が非常に短かったとしても、完全正值性を保存するマルコフ型の量子マスター方程式では、相互作用する系の量子緩和を十分に記述できないことが分かった。特に緩和より量子系間の内部相互作用が強い強結合領域では、緩和に内部相互作用の影響が生じない短時間スケールと、内部相互作用が働く時間より十分に長い長時間スケールとで、別々のマルコフ型量子マスター方程式によって記述されることを明らかにし、それぞれの式を微視的なモデルから導出した(図J-1)。短時間スケールでの緩和を記述するマスター方程式は、従来から用いられていたものに等しいことが分かった。一方、長時間スケールでのマスター方程式は、内部相互作用時間程度の変化を平均化して得られるものであり、緩和の強さに比べ内部相互作用が非常に大きい強結合極限においてのみ、短時間スケールのダイナミクスを正しく記述するものであった。

一般にマルコフ近似をした量子マスター方程式は、完全正值性を保存する性質を持つ必要があることが知られているが、このことは短時間スケールから長時間スケールにわたる量子緩和を、完全正值性を保存するひとつのマルコフ型量子マスター方程式によって記述するのが不可能であることを意味する。

そこで次に、相互作用する量子系に対する非マルコフ型の量子マスター方程式を導出し、強結合領域での量子緩和を調べた。それにより、熱浴の相関時間が短くマルコフ近似が妥当となる場合、短時間スケールでの緩和ダイナミクスは従来の現象論的量子マスター方程式のものと良く一致し、長時間スケールでは上述の強結合極限で正しい量子マスター方程式によるダイナミクスと良く一致することを確認した(図J-2)。



図J-2 赤は非マルコフ型の式、緑と青は図1と同じ式。インセットは、短時間スケールの変化を拡大したもの。短時間スケールでは、赤と緑は赤と青よりも合っているが、長時間スケールでは、緑はずれ、赤と青が良く一致することを示している。

(2)研究成果の今後期待される効果

半導体レーザーの発振過程において、キャリア間のクーロン相互作用が、定性的にも定量的にも、どのように影響しているかは、半導体レーザーが市場や日常生活に出回り技術的に成熟したように見える現状においても、実は未解明の問題である。本研究プロジェクトによって、レーザー発振に関わる反転分布状態でのクーロン相互作用と、それに起因する量子多体効果とが、無視できない寄与を及ぼすことを明らかにした。とりわけ、相互作用が本質的に重要となる量子細線系や低次元系においては、クーロン多体効果を含めた議論をすることが不可欠で、利得特性などの振る舞いに、従来の自由電子理論では記述できなかった新しい効果が見つかった。

今後のレーザーデバイスは、低次元半導体を用いた低しきい値レーザーを始めとする省電力光デバイスに向かうと考えられる。省電力動作下では低電流駆動を行うため、キャリア密度が大きく均一な「平均場状態」にはならないと予想される。すなわち、キャリア間相互作用が重要となり、かつ、キャリア運動の揺らぎや波動性と粒子性の二重性が表れるような動作環境で、レーザーを駆動させることになる。よって、このCRESTプロジェクトでの研究成果により、低次元半導体で、従来の自由キャリア理論モデルの守備範囲を超えた質的に新しい効果や機能が生み出されることを示したことは、今後の光学デバイスや電子輸送デバイスの研究に非常に大きなインパクトを与えるであろう。また、少数多体系におけるキャリア間相互作用と低次元性とを効果的に利用する新しい光素子も、低次元半導体で実現できる可能性が開ける。さらに、従来の波動関数工学的現象論を超えた最

先端量子理論によって、新効果や新機能を予測することが可能になれば、デバイスの設計手法の新たなブレークスルーにもつながる。このように、本プロジェクトの研究成果は、非平衡量子多体問題の学理を深めるだけでなく、低次元半導体の光デバイスや電子デバイスの限界を極める際の基準や指標にもなる。よって、本プロジェクトで得た成果を基にして、キャリア間相互作用・量子揺らぎを取り入れた低次元半導体レーザー量子工学理論を構築することが特に重要な課題であり、それを用いて低電流動作下の半導体光能動デバイスの諸問題を理論的および実験的両面から探究することが、国内外の研究・技術開発に大きな影響を与えるであろう。

本研究成果は、低電流駆動半導体レーザーや省電力光デバイスへ適用されるだけでなく、適用範囲や守備範囲は広い。本プロジェクトで研究したキャリア間相関の問題は、光デバイスだけでなく伝導デバイスや電子デバイスにも内在する過程であるため、本研究によってそれらの光・電子融合領域の研究の糸口が得られる可能性がある。また、SHF 近似を超えた「超」HF 近似理論も、本研究を萌芽として、近い将来に構築すべき課題であり、その「超」HF 近似理論は、半導体中の少数多体系における強い電子相関をもった電子系や電子-正孔系の動的応答をより正しく記述することができるであろう。この「超」HF 理論は、今日盛んに基礎研究が行われている強相関電子系酸化物の光デバイス量子工学研究にも拡張して適用できる。

4 研究参加者

①秋山グループ(実験の研究)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
秋山 英文	東大物性研	准教授	装置開発・研究総括	H14, 11～H20, 3
吉田 正裕	東大物性研	助教	素子作製評価計測	H14, 11～H20, 3
呉 智元	東大物性研	研究員	顕微画像計測	H14, 11～H16, 12
鵜沼 毅也	東大物性研	大学院生	赤外分光計測	H14, 11～H17, 3
早水 裕平	東大物性研	大学院生	レーザー特性計測	H14, 11～H17, 3
高橋 和	東大物性研	大学院生	低温顕微透過計測	H14, 11～H18, 3
安東 頼子	東大物性研	大学院生	絶対光量計測	H15, 4～H18, 3
	東大物性研	CREST 研究員		H18, 4～H19, 3
	ハーバード大	研究員		H19, 4～H19, 7
	東大物性研	CREST 研究員		H19, 8～H20, 3
伊藤 弘毅	東大物性研	大学院生	顕微 PLE・数値計算	H14, 11～H19, 3
井原 章之	東大物性研	大学院生	ドープ細線計測	H15, 4～H20, 3
木下 基	東大物性研	大学院生	外部共振器レーザー	H15, 4～H17, 3
高橋 貴	東大物性研	大学院生	量子井戸 PL 評価	H16, 4～H16, 10
稲田 智志	東大物性研	大学院生	常温顕微透過計測	H16, 4～H20, 3
岡田 高幸	東大物性研	大学院生	注入型細線レーザー	H17, 4～H19, 3
岡野 真人	東大物性研	大学院生	注入型細線レーザー	H17, 4～H20, 3
劉 舒曼	東大物性研	研究員	注入型細線レーザー	H17, 10～H19, 10
宗像 孝光	東大物性研	大学院生	注入型細線レーザー	H18, 4～H20, 3
丸山 俊	東大物性研	大学院生	注入型細線レーザー	H19, 4～H20, 3
久保田 英博	アトー(株)	研究員	計測装置開発	H14, 11～H18, 3
高橋 正幸	アトー(株)	研究員	計測装置開発	H14, 11～H20, 3
安原 信治	アトー(株)	研究員	計測装置開発	H14, 11～H20, 3
臼田 正道	アトー(株)	研究員	計測装置開発	H14, 11～H18, 3
Ning	東大物性研・ア	客員教授・教授	レーザー・半導体理論	H18, 6～H18, 9
Cun-Zheng	リゾナ州立大			
高橋 登美子	東大物性研	研究補助員	研究補助および事務	H14, 11～H15, 12
別所 眞知子	東大物性研	事務補佐員	研究補助および事務	H15, 12～H20, 3

②小川グループ(理論の研究)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
小川哲生	大阪大学	教授	理論的研究の総括	H14, 11～H20, 3
浅野建一	大阪大学	准教授	数値 DMRG 法	H16, 3～H20, 3
高際睦起	大阪大学	助手	結合クラスター理論	H14, 11～H18, 3
大橋琢磨	大阪大学	助教	拡張動的平均場理論	H19, 4～H20, 3
稲垣 剛	奈良先端大	助教	RPA と数値計算	H14, 11～H20, 3
飯田 勝	情報通信研究機構	研究員	ダイナミクス数値計算	H15, 6～H16, 9
浅野建一	JST	研究員	厳密数値対角化	H15, 2～H16, 2

富尾 祐	JST	研究員	動的平均場理論	H15, 4～H19, 12
Ping Huai	JST	研究員	高密度 HF 理論	H16, 12～H19, 12
石川 陽	大阪大学	研究生	相分離現象論	H14, 11～H17, 8
奥村 暁	大阪大学	大学院生	非線形応答理論	H14, 11～H15, 3
西口三喜	大阪大学	大学院生	励起子理論	H16, 4～H17, 9
東田和万	大阪大学	大学院生	量子相転移理論	H14, 11～H18, 3
西山祐輔	大阪大学	大学院生	量子輸送理論	H16, 10～H20, 3
本田光太郎	大阪大学	大学院生	T 行列理論	H15, 4～H17, 3
辰巳浩一	大阪大学	大学院生	動的平均場理論	H15, 4～H17, 3
中谷正俊	大阪大学	大学院生	開放系の量子論	H15, 4～H20, 3
有井宏敏	大阪大学	大学院生	ポラリトンレーザー理論	H17, 4～H20, 3
花宮輝彰	大阪大学	大学院生	励起子気体理論	H17, 4～H20, 3
西田拓人	大阪大学	大学院生	クラスター摂動論	H18, 4～H20, 3
渡邊耕太	大阪大学	大学院生	量子散乱理論	H18, 4～H20, 3
山下和男	大阪大学	大学院生	量子凝縮理論	H19, 4～H20, 3
中田喜之	大阪大学	大学院生	量子凝縮理論	H19, 4～H20, 3

5 招聘した研究者等

氏 名 (所属, 役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Dr. Marzena H. Szymanska (Cavendish Laboratory, University of Cambridge, postdoctoral researcher)	T 型量子細線中の励起 子状態のエネルギー・ 波動関数・振動子強度 の理論計算指導のため	東京大学物性研究 所	2003 年 5 月 6 日-31 日
Dr. Manyalibo J. Matthews (Bell Labs, Lucent Technologies, USA, member of technical staff)	半導体レーザーおよび 光ネットワークについ ての助言を得るため	東京大学物性研究 所	2004 年 3 月 21 日-29 日
Dr. Aref Chowdury (Bell Labs, Lucent Technologies, USA, member of technical staff)	光スイッチングおよび 光通信についての助言 を得るため	東京大学物性研究 所	2004 年 11 月 9 日-14 日
Prof. Cun-Zheng Ning (Professor of State University of Arizona, and NASA, USA, and visiting professor of University of Tokyo)	レーザーおよび半導体 量子構造の光学応答に 関する理論的基礎研究 を共同で行うため	東京大学物性研究 所および大阪大学	2006 年 6 月 19 日-9 月 21 日

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 0 件, 国際誌 69 件)

S. Watanabe, M. Yoshita, S. Koshihara, and H. Akiyama, “Polarization dependence of the optical interband transition defined by the spatial variation of the valence p-orbital Bloch functions in quantum wires”, Jpn. J. Appl. Phys., Part 1 41(10), 5924–5936 (2002).

Y. Hayamizu, M. Yoshita, S. Watanabe, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, “Lasing from a single quantum wire”, Appl. Phys. Lett. 81, 4937–4939 (2002).

Tetsuo Ogawa and Mutsuki Takagiwa, “Optical spectra of spin-1/2 Fermi-degenerate systems with a bound state: Crossover between excitonic peaks and the power-law singularities”, Nonlinear Optics 29(7), 465–473 (2002).

Satoru Okumura and Tetsuo Ogawa, “Microscopic theory of four-wave-mixing processes with an exciton-bosonization method”, Nonlinear Optics 29(10), 571–577 (2002).

H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, M. Yoshita, A. Pinczuk, and K. W. West, “One-dimensional continuum and exciton states in quantum wires”, Appl. Phys. Lett. 82, 379–381 (2003).

H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, M. Yoshita, A. Pinczuk, P. B. Littlewood, K. W. West, M. J. Matthews, and J. Wynn, “Coulomb-correlated electron-hole plasma and gain in a quantum-wire laser of high uniformity”, Phys. Rev. B 67, 41302 (2003).

T. Unuma, M. Yoshita, T. Noda, H. Sakaki, H. Akiyama, “Intersubband absorption linewidth in GaAs quantum wells due to scattering by interface roughness, phonons, alloy disorder, and impurities”, J. Appl. Phys. 93, 1586–1597 (2003).

M. Matsuda, S. Ikeda, N. Hanasaki, M. Yoshita, H. Tajima, “Fabrication of Thin Films Using a Soluble Metal Phthalocyanine Salt and Their Photoconductive Properties”, Chemistry Letters 32 No.2, 130–131 (2003).

J. W. Oh, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, “Step-edge kinetics driving the formation of atomically flat (110) GaAs surfaces”, Appl. Phys. Lett. 82, 1709–1711 (2003).

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. 251, 62–67 (2003).

H. Akiyama, M. Yoshita, L. N. Pfeiffer, K. W. West, “Quantum wire lasers with high uniformity formed by cleaved-edge overgrowth with growth-interrupt anneal”, Solid State Communications 127, 63–68 (2003).

H. Tajima, S. Ikeda, M. Matsuda, N. Hanasaki, J. W. Oh, H. Akiyama, “A light-emitting diode fabricated from horse-heart cytochrome c”, Solid State Communications 126, 579–581 (2003).

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”, Applied Physics Letters 83, 2043–2045 (2003).

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”, Applied Physics Letters 83, 4089–4091 (2003).

S. Watanabe, S. Koshiba, M. Yoshita, M. Baba, H. Sakaki, and H. Akiyama, “Vertically polarized lasing and photoluminescence in a ridge quantum-wire laser”, Phys. Rev. B 68, 193304 (2003).

A. Ishii, T. Aisaka, J-W Oh, M. Yoshita, and H. Akiyama, “Low and anisotropic barrier energy for adatom migration on a GaAs (110) surface studied by first-principles calculations”, Appl. Phys. Lett. 83, 4187–4189 (2003).

S. Watanabe, S. Koshiba, M. Yoshita, H. Sakaki, M. Baba and H. Akiyama, “Vertically-polarized lasing and photoluminescence in crescent-shaped quantum wires”, Proc. of 26th Int. Conf. on Physics of Semiconductors, D150 (2003).

Y. Hayamizu, L. N. Pfeiffer, M. Yoshita, S. Watanabe, A. Pinczuk, K. W. West, K. W. Baldwin, T. Unuma, and H. Akiyama, “Ground state lasing in a high quality single quantum wire”, Proc. of 26th Int. Conf. on Physics of Semiconductors, L24 (2003).

T. Otsuji, E. Okuda-Ashitaka, S. Kojima, H. Akiyama, S. Ito, and Y. Ohmiya “Monitoring for dynamic biological processing by intra-molecular bioluminescence resonance energy transfer system using secreted luciferase” Analytical Biochemistry 329, 230–237 (2004).

S. Ikeda, M. Matsuda, Y. Ando, J-W Oh, N. Hanasaki, H. Tajima, and H. Akiyama, “Novel electroluminescence properties of thin films using soluble metallophthalocyanine salts” Jpn. J. Appl. Phys., 43 Part 2, L1187– L1189 (2004).

K. Ohdaira, H. Murata, S. Koh, M. Baba, H. Akiyama, R. Ito, and Y. Shiraki “Control of type-I and type-II band alignments in AlInAs/AlGaAs self-assembled quantum dots by changing AlGaAs compositions” Physica E 21, 308–311 (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).

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).

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 21, 689–691 (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).

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* 21, 230–235 (2004).

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).

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).

S. Ikeda, H. Tajima, M. Matsuda, Y. Ando, and H. Akiyama, “External quantum efficiency and electroluminescence spectra of BIODE (biomolecular light-emitting diode) fabricated from horse-heart cytochrome c”, *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 78, 1608–1611 (2005).

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).

Yoriko Ando, Hidefumi Akiyama, Kazuki Niwa, Hidehiro Kubota, and Yoshihiro Ohmiya, “Bioluminescence quantum-yield measurements with modern semiconductor photo-detectors”, in “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.

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).

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)

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)

Kenichi Asano and Tetsuo Ogawa, “Instability toward biexciton crystallization in one-dimensional electron-hole systems”, *Journal of Luminescence* 112, 200–203 (2005).

Yuh Tomio and Tetsuo Ogawa, “Phase diagram for the exciton Mott transition in infinite-dimensional electron-hole systems”, *Journal of Luminescence* 112, 220–224 (2005).

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).

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. Tajima, K. Shimatani, T. Komino, M. Matsuda, S. Ikeda, Y. Ando, H. Akiyama, “A voltage-induced transition of hemin in BIODE (biomolecular light-emitting diode)” Bulletin of the Chemical Society of Japan 79 (4), 549–554 (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).

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 the photoluminescence spectrograph method”, Phys. Rev. B 74, 165332 (2006).

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).

Tetsuo Ogawa, Akira Ishikawa, and Shingo Saito, “Full quantum-mechanical treatment for spatiotemporal dynamics of electrons and holes in a quantum wire coupled to a thermal reservoir”, Journal of Luminescence 119, 188–192 (2006).

Ping Huai and Tetsuo Ogawa, “Absorption and gain spectra of optically excited semiconductor quantum wires: Effects of Coulomb correlation and screening”, Journal of Luminescence 119, 468–472 (2006).

Yuh Tomio, Kotaro Honda, and Tetsuo Ogawa, “Excitonic BCS-BEC crossover at finite temperature: Effects of repulsion and electron-hole mass difference”, Physical Review B 73, 235108 (2006).

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).

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. Fujii, K. Takao, M. Kakino, N. Tsurumachi, H. Miyagawa, R. Ueji, H. Itoh, S. Nakanishi, H. Akiyama and S. Koshiba, “GaNAs/GaAs multiple quantum well grown by modulated N radical beam sequence of RF-MBE: effect of growth interruption”, J. Crystal Growth. 301–302, 583–587 (2007).

K. Fujii, N. Tsurumamachi, H. Miyagawa, R. Ueji, H. Itoh, S. Nakanishi, H. Akiyama and S. Koshiba, “Structural and Optical Studies of AlAs / GaAs Type-I Ultra Short-period and Fractional Layer Superlattices”, J. Crystal Growth. 301–302, 168–171 (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).

Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, “Surface-morphology evolution during growth-interrupt in situ annealing on GaAs(110) epitaxial layers”, J. Appl. Phys. 101, 103541 (2007).

Yoriko Ando, Kazuki Niwa, Nobuyuki Yamada, Tsutomu Irie, Toshiteru Enomoto, Hidehiro Kubota, Yoshihiro Ohmiya, Hidefumi Akiyama, “Determination and Spectroscopy of Quantum Yields in Bio/Chemiluminescence via Novel Light-Collection-Efficiency Calibration: Reexamination of The Aqueous Luminol Chemiluminescence Standard”, Photochemistry and Photobiology 83 (2007, published online).

Shu-man Liu, Masahiro Yoshita, Makoto Okano, Toshiyuki Ihara, Hirotake Itoh, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, and Kirk W. Baldwin, “Electronic Structure and Efficient Carrier Injection in Low-threshold T-shaped Quantum-wire Lasers with Parallel p- and n-doping Layers”, J. Appl. Phys. 102, 043108 (2007).

M. Yoshita, S. M. Liu, M. Okano, Y. Hayamizu, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, “T-shaped GaAs quantum-wire lasers and the exciton Mott transition”, J. Phys.; Condensed Matters 19, 295217 (2007).

Tetsuo Ogawa, Yuh Tomio, and Kenichi Asano, “Quantum condensation in electron-hole systems: excitonic BEC-BCS crossover and biexciton crystallization”, Journal of Physics: Condensed Matter 19, 295205 (20pp) (2007).

Yuh Tomio and Tetsuo Ogawa, Optical spectra and excitonic BEC-BCS crossover in coherent electron-hole pair condensation”, Journal of Luminescence, available online 14 December 2007 doi:10.1016/j.jlumin.2007.12.019.

Tetsuo Ogawa and Yuh Tomio, “Optical spectra and exciton Mott transition in correlated electron-hole systems”, Journal of Luminescence, available online 19 November 2007 doi:10.1016/j.jlumin.2007.11.068.

Kenichi Asano and Tetsuo Ogawa, Phase diagram of two-dimensional electron-hole Hubbard model”, Physica E, published online 6 September 2007 doi:10.1016/j.physe.2007.08.044.

Tetsuo Ogawa, Ping Huai, Mutsuki Takagiwa, Kenichi Asano, Toshiyuki Ihara, Masahiro Yoshita, and Hidefumi Akiyama, “Linear optical responses of one-dimensional electron systems: Comparison of theories with experiments”, Physica E, published online 6 September 2007 doi:10.1016/j.physe.2007.08.051.

Teruaki Hanamiya, Kenichi Asano, and Tetsuo Ogawa, “Self-consistent theory for optical spectra of exciton gas in quasi-one dimension”, *Physica E*, published online 19 September 2007 doi:10.1016/j.physe.2007.09.023.

Makoto Okano, Shu-man Liu, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West “Current injection T-shaped quantum wire lasers with perpendicular doping layers operating at 100K”, *Physica E*, published online 21 September 2007 doi:10.1016/j.physe.2007.09.043.

Toshiyuki Ihara, Yuhei Hayamizu, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West, “One-dimensional band-edge absorption in a doped quantum wire”, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 126803 (2007).

Yuhei Hayamizu, Masahiro Yoshita, C. Z. Ning, Yasushi Takahashi, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West, “Biexciton gain and the Mott transition in GaAs quantum wires”, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 167403 (2007).

Hirotake Itoh, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Dhanorm Plumwongrot, Takeo Maruyama, and Shigehisa Arai, “Micro-photoluminescence spectroscopy of GaInAsP/InP single quantum wires fabricated by dry etching and regrowth”, *J. Appl. Phys.*, **102**, 093509 (2007).

Hidefumi Akiyama, Masahiro Yoshita, Yuhei Hayamizu, Shu-man Liu, Makoto Okano, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, Ping Huai, Kenichi Asano, Tetsuo Ogawa, and C. Z. Ning, “Exciton-biexciton-plasma crossover and formation of optical gain in quantum wires”, *Physica E*, published online 30 October 2007 doi:10.1016/j.physe.2007.10.067

Ping Huai, Hidefumi Akiyama, Yuh Tomio, and Tetsuo Ogawa, “Coulomb Enhancement and Suppression of Peak Gain in Quantum Wire Lasers”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, L1071-L1073 (2007).

Satoshi Inada, Moto Kinoshita, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, and Liming Zhang, “Measurements of Gain Spectra over Wide Spectral Ranges in GaInAsP/InP Multiple-Quantum-Well Laser Diodes”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 329-333 (2008).

Yoriko Ando, Kazuki Niwa, Nobuyuki Yamada, Tsutomu Irie, Toshiteru Enomoto, Hidehiro Kubota, Yoshihiro Ohmiya, and Hidefumi Akiyama, “Firefly bioluminescence quantum yield and colour change by pH-sensitive green emission”, *Nature Photonics* **2**, 44 - 47 (2008).

(2)その他の著作物（総説、書籍など）

Tetsuo Ogawa, “Quantum states and optical responses of low-dimensional electron-hole systems”, *Journal of Physics: Condensed Matter* **16**, S3567-S3595 (2004).

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.

Tetsuo Ogawa, Yuh Tomio, and Kenichi Asano, “Dynamical mean-field theory for the exciton Mott transition in electron-hole systems”, Journal of Physics: Conference Series 21, 112-117 (2005).

Masatoshi Nakatani and Tetsuo Ogawa, “Relaxation dynamics toward a thermal equilibrium in the damped Jaynes-Cummings model”, Technical digest of International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Laser and Electro-Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR2005), pp. 788-789.

Yuh Tomio and Tetsuo Ogawa, “Exciton Mott transition and pair condensation in electron-hole systems: Dynamical mean-field theory”, AIP Conference Proceedings 850, 1313-1314 (2006).

Tetsuo Ogawa, “Theory of photoinduced phase transitions: From semiclassical to quantum aspects”, Solid State Phenomena 112, 21-38 (2006).

Masatoshi Nakatani and Tetsuo Ogawa, “Relaxation dynamics of the damped Jaynes-Cummings model”, Frontiers of Basic Science: Towards New Physics -- Earth and Space Science -- Mathematics (Osaka University Press, Osaka, 2006), pp. 269-270.

Mutsuki Takagiwa and Tetsuo Ogawa, “Optical properties of low-dimensional electron systems”, Frontiers of Basic Science: Towards New Physics -- Earth and Space Science -- Mathematics (Osaka University Press, Osaka, 2006), pp. 331-332.

H. Akiyama, M. Yoshita, L. N. Pfeiffer, K. W. West, “高品質 T 型量子細線レーザーの一次元電子状態とレーザー発振起源”, 固体物理 37(10), 771-778 (2002).

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).

小川 哲生, 「今後の展開(1) -理論と現象-」(連載「光物性の基礎と応用」第 23 回) オプトロニクス社「OPTRONICS」24(288), 221-229 (2005).

秋山英文, “量子ナノ細線の光物性とレーザ応用”, 科学立国日本を築く -極限に挑む気鋭の研究者たち, 榊裕之監修 (日刊工業新聞社, 2006), p. 143-149

安東頼子, 秋山英文, “どのように発光は計測されるか”, バイオ・ケミルミネッセンスハンドブック, 今井洋一, 近江谷克裕編 (丸善, 2006), 第 3 章 3.2 節, p. 114-127

小川 哲生(分担執筆), 「科学立国日本を築く 極限に挑む気鋭の研究者たち」榊裕之 監修／財団法人 丸文研究交流財団選考委員会 編 (日刊工業新聞社, 東京, 2006) [ISBN 4-526-05635-9].

小川 哲生, 「量子力学講義」(新・数理科学ライブラリ[物理学]6)(サイエンス社, 東京, 2006) [ISBN 4-7819-1121-8].

光物性研究会 組織委員会編(分担執筆), 「光物性の基礎と応用」(オプトロニクス社, 東京, 2006) [ISBN 4-902312-16-6].

(3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

① 招待講演 (国内会議 8 件, 国際会議 8 件)

H. Akiyama, “Many-body electron interactions and lasing in T-shaped quantum wires with high uniformity”, COE International Workshop on Physics of Confined Electron Systems, Osaka University, Toyonaka, Japan, February 19-20, 2003 (2003).

H. Akiyama, “Many-body electron interactions and lasing in T-shaped quantum wires with high uniformity”, The First German-Japanese Symposium on Spatially Resolved Spectroscopy and Fabrication of Nano-Atom Photonics, Berlin, Germany, March 17-19, 2003 (2003).

H. Akiyama, “Many-body electron interactions and lasing in T-shaped quantum wires with high uniformity”, Photon-Mediated Phenomena Network Conference, Gregynog, Wales, UK, March 28 - 30, 2003 (2003).

Hidefumi Akiyama, “Lasing in T-shaped quantum wires”, Colorado Meeting on Fundamental Optical Processes in Semiconductors (FOPS) August 8-13, 2004 Estes Park, Colorado, USA (2004).

H. Akiyama, “Many-body electron interactions and lasing in quantum wires with high uniformity”, The 4th NSF-MEXT Joint Symposium on “Nanophotonics: Beyond the Limit of Optical Technology”, Shinagawa, Tokyo, Japan, October 25-27, 2004.

H. Akiyama, “Photoluminescence and lasing in T-shaped GaAs quantum wires”, Japan(JSPS) - Singapore(SNU) Symposium on Nano-science and Nano-technology, at Singapore National University (SNU), Singapore, Nov. 2-4, 2004.

H. Akiyama, “T-shaped quantum wire lasers with high uniformity”, 2004 MRS Fall Meeting, Boston, MA, USA, Nov. 29 - Dec. 3, 2004.

Tetsuo Ogawa, “Theory of photoinduced phase transitions: From semiclassical to quantum aspects”, The 17th International School on Physics and Chemistry of Condensed Matter and the 5th International Symposium on Physics in Materials Science, at Bialowieza, Poland, 21-29 June 2005.

鵜沼毅也, 吉田正裕, 秋山英文 (東大物性研, 科技団 CREST), “GaAs 量子井戸におけるサブバンド間遷移の線幅の物理”, 日本物理学会 2003 年 第 58 回年会, 東北大学 川内キャンパス, 2003 年 3 月 28 日--31 日

吉田 正裕, 秋山 英文 (東大物性研, CREST(JST)), “ソリッドイマージョン蛍光顕微計測法とそのナノ光物性計測への応用”, 日本光学会年次学術講演会(OJ2004) (大阪大学コンベンションセンター, 2004 年 11 月 4-5 日)シンポジウム「ナノオブティクス:ナノスケール分光学を目指して」, 5aBS2

吉田正裕, 秋山英文 (東大物性研), “半導体ナノ量子細線の光吸収・利得機構とレーザー発振”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会(埼玉大学, 2005 年 3 月 29 日-4 月 1 日) 30p-YZ-5

秋山英文, 吉田正裕, ローレン・ファイファー, ケン・ウエスト “GaAs 量子細線レーザーの開発と

その物性の評価” 日本学術振興会ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第 162 委員会・第 44 回「量子構造制御による高効率・新波長領域光デバイスの開発」研究会, 平成 17 年 10 月 21 日 (金), 弘済会館, 東京

秋山英文, “量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明”, 独立行政法人科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」研究領域公開シンポジウム, 平成 17 年 10 月 18 日 (火), 東京ガーデンパレス, 御茶ノ水, 東京

秋山英文, 吉田正裕, ローレン・ファイファー, ケン・ウエスト “T 型 GaAs 量子細線レーザー” 日本学術振興「光電相互変換」第125委員会・「未踏・ナノデバイステクノロジー」第151委員会・「光デバイスとナノテクノロジー」合同研究会, 平成 18 年 2 月 3, 4 日, 伊勢志摩

秋山英文 (東大物性研), “ドーブした一次元半導体細線の光学応答”, 日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月 27-30 日) 28pXC-4

小川 哲生, 「半導体中のキャリア間相互作用に起因した現象の理論の新展開」領域 4・領域 5 合同シンポジウム『光学測定による半導体中のキャリア間相互作用研究の新展開』, 日本物理学会第 61 回年次大会 28pXC-2 (愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月 28 日).

② 口頭発表 (国内会議 77 件, 国際会議 15 件)

H. Itoh, Y. Hayamizu, M. Yoshita, H. Akiyama, K. W. West and L. N. Pfeiffer, “Photoluminescence excitation spectra in T-shaped quantum wires”, 2003 CLEO/QELS Conference; Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, USA, June 1-6, 2003 (2003).

Y. Hayamizu, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, “Evolution of gain in a high-quality single quantum wire laser”, 2003 CLEO/QELS Conference; Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, USA, June 1-6, 2003 (2003).

T. Unuma, K. Kobayashi, A. Yamamoto, M. Yoshita, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, Y. Iye, Y. Kanemitsu, M. Baba, and H. Akiyama, “Comparison between intersubband infrared absorption and electronic Raman scattering in a narrow single quantum well (awarded as an extended oral presentation)”, 7th International Conference on Intersubband Transition in Quantum Wells (ITQW 2003), Evolene, Switzerland, Sep 1-5, 2003 (2003).

A. Ishii, T. Aisaka, Ji-Won Oh, M. Yoshita and H. Akiyama, “First Principles calculation of the epitaxial growth of GaAs(110) as an atomically flat substrate for nano structure”, 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-7), Nara, Japan, November 16-20, 2003 (2003).

Tetsuo Ogawa and Akira Ishikawa, “Theory of phase-separation dynamics in high-density electron-hole systems”, The 14th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC2003) [Christchurch, New Zealand] 3-8 August 2003.

Yasushi Takahashi, Masahiro Yoshita, Hirotake Itoh, Toshiyuki Ihara, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West, “Absorption spectra measured in T-shaped quantum-wire-laser waveguides”, International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC), IthC4, Moscone

Center West, San Francisco, California, May 2004 (2004).

Y. Hayamizu, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, “Optical gain spectra due to a one-dimensional electron-hole plasma in a quantum wire laser”, The 27th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-27), July 26–30, 2004 (Flagstaff, Arizona, USA) R4; AIP Conf. Proc. 772, 1575 (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 measurement”, Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS), QMB2, Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, May 2005 (2005).

Tetsuo Ogawa, Yuh Tomio, and Kenichi Asano, “Dynamical mean-field theory for the exciton Mott transition in electron-hole systems”, The Second International Conference on Photo-Induced Phase Transitions; Cooperative, Non-Linear and Functional Properties (PIPT RENNES 2005) [at Rennes, France] 24–28 May 2005.

Tetsuo Ogawa, Akira Ishikawa, and Shingo Saito, “Full quantum-mechanical treatment for spatiotemporal dynamics of electrons and holes in a quantum wire coupled to a thermal reservoir”, The 15th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC’05) [at Shanghai, China] 1–5 August 2005.

M. Okano, S.-M. Liu, M. Yoshita, T. Ihara, H. Itoh, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, K. W. Baldwin, and O. Malis “Current-injection T-shaped GaAs/AlGaAs quantum-wire lasers” The 2006 IEEE/LEOS Semiconductor Laser Workshop, Long Beach Convention Center, Long Beach, California, May 26, 2006.

Y. Ando, K. Niwa, N. Yamada, T. Enomoto, T. Irie, H. Kubota, Y. Ohmiya, and H. Akiyama, “Quantitative luminescence yield spectra of firefly bioluminescence”, 14th International Symposium on Bioluminescence and Chemiluminescence, San Diego, USA, October 15–19, 2006; Luminescence 21, 269 (2006).

Toshiyuki Ihara, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West, “Density tuning of one-dimensional electron gas in a T-shaped quantum wire, QTuL4(oral), CLEO/QELS 2007, Baltimore, USA, May 6–11, 2007.

Hirotake Itoh, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Dhanorm Plumwongrot, Takeo Maruyama, and Shigehisa Arai, “Photoluminescence of GaInAsP/InP Single QuantumWires With LateralWidths Down To 6 nm Fabricated by Dry Etching and Regrowth”, CThGG3(oral), CLEO/QELS 2007, Baltimore, USA, May 6–11, 2007.

Shu-man Liu, Masahiro Yoshita, Makoto Okano, Toshiyuki Ihara, Hirotake Itoh, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, and Kirk W. Baldwin, “Low-Threshold Current-Injection Single-Mode Lasing in T-shaped Quantum Wires with Parallel Doping Layer”, CMD5(oral), CLEO/QELS 2007, Baltimore, USA, May 6–11, 2007.

矢口裕之, 森桶利和, 青木貴嗣, 土方泰斗, 吉田貞史, 宇佐美德隆, 秋山英文, 青木大一, 尾鍋研太郎, “レーザ照射によるGaAsN 混晶の発光効率の向上”, 応用物理学会 2003 春季講演会, 神奈川大学, 2003/3/27–30

大平圭介, 村田博, 黄晋二, 馬場基芳, 秋山英文, 白木靖寛, 伊藤良一, “AlGaAs 層の Al 組成を変化させた AlInAs/AlGaAs 量子ドットの光学特性”, 応用物理学会 2003 春季講演会, 神奈川大学, 2003/3/27-30

伊藤弘毅, 早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, ルーセント・ベル研), “発光励起スペクトルを用いた T 型量子細線中の励起子励起状態の観測”, 日本物理学会 2003 年 第 58 回年会, 東北大学 川内キャンパス, 2003 年 3 月 28 日-31 日

早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken West (東大物性研, ルーセント・ベル研), “T 型単一量子細線レーザーの動作温度の改善 II”, 日本物理学会 2003 年 第 58 回年会, 東北大学 川内キャンパス, 2003 年 3 月 28 日-31 日

呉智元, 早水裕平, 吉田正 裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, ルーセント・ベ ル研), “超平坦界面を有する GaAs(110)量子井戸の顕微分光”, 日本物理学会 2003 年 第 58 回年会, 東北大学 川内キャンパス, 2003 年 3 月 28 日-31 日

高際 睦起, 小川 哲生, 「フェルミ端特異性光学スペクトルの温度依存性」日本物理学会第 58 回年次大会 28pYF-1 (東北大学川内キャンパス・東北学院大学土樋キャンパス 2003 年 3 月 28 日).

青木貴嗣, 森桶利和, 呉智元, 秋山英文, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 青木大一郎, 尾鍋研太郎 (埼玉大工, 東大物性研, 東大工), “希薄 GaAsN 混晶のフォトルミネッセンス”, 応用物理学会学術連合講演会, 第 64 回, 福岡大学 七隈キャンパス, 2003 年 8 月 30 日-9 月 2 日 1p-K-7

森桶利和, 青木貴嗣, 呉智元, 馬場基芳, 秋山英文, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 青木大一郎, 尾鍋研太郎 (埼玉大工, 東大物性研, 東大工), “GaAs 基板上に成長した GaAsN 混晶のフォトルミネッセンス”, 応用物理学会学術連合講演会, 第 64 回, 福岡大学 七隈キャンパス, 2003 年 8 月 30 日-9 月 2 日 1p-K-8

石井晃, 逢坂豪, 呉智元, 吉田正裕, 秋山英文 (鳥取大工, 東大物性研), “GaAs(110)表面の Ga, As 原子移動バリアーの低さと異方性の第一原理計算”, 応用物理学会学術連合講演会, 第 64 回, 福岡大学 七隈キャンパス, 2003 年 8 月 30 日-9 月 2 日 1a-YA-6

石井晃, 逢坂豪, 呉智元, 吉田正裕, 秋山英文 (鳥取大工, 東大物性研), “GaAs(110)表面の Ga, As 原子移動バリアーの低さと異方性の第一原理計算”, 日本物理学会 2003 年 秋季大会, 岡山大学 津島キャンパス, 2003 年 9 月 20-23 日 21pYC-4

田島裕之, 池田真吾, 松田真生, Ji-Won Oh, 秋山英文 (東大物性研), “生体物質 cytochrome c を用いた発光ダイオードの特性”, 日本物理学会 2003 年 秋季大会, 岡山大学 津島キャンパス, 2003 年 9 月 20-23 日

木下基, 秋山英文, 田中佑一 (東大物性研, 科技団 CREST, アルネアラボラトリ), “ファブリ・ペローエタロンを用いたリング型外部共振器付半導体レーザーの発振周波数制御”, 日本物理学会 2003 年 秋季大会, 岡山大学 津島キャンパス, 2003 年 9 月 20-23 日

井原章之, 早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, 科技団 CREST, ルーセント・ベル研), “n 型ドーピング GaAs 量子細線の発光の温度依存性”, 日本物理学会 2003 年 秋季大会, 岡山大学 津島キャンパス, 2003 年 9 月 20-23 日

伊藤弘毅, Marzena H. Szymanska, 早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Peter B. Littlewood, Ken W. West, Loren N. Pfeiffer (東大物性研, 科技団 CREST, ケンブリッジ大物理, ルーセント・ベル研), “発光励起スペクトルを用いた T 型量子細線中励起子励起状態の観測及び数値解析”, 日本物理学会 2003 年 秋季大会, 岡山大学 津島キャンパス, 2003 年 9 月 20-23 日

高橋和, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, 科技団 CREST, ルーセント・ベル研), “透過測定による T-型量子細線レーザーの吸収・利得スペクトル”, 日本物理学会 2003 年 秋季大会, 岡山大学 津島キャンパス, 2003 年 9 月 20-23 日

鶴沼毅也, 小林研介, 山本愛士, 吉田正裕, 馬場基芳, 橋本義昭, 勝本信吾, 家泰弘, 金光義彦, 秋山英文 (東大物性研, 科技団 CREST, 奈良先端大物質), “赤外吸収と電子ラマン散乱による量子井戸のサブバンド間励起”, 日本物理学会 2003 年 秋季大会, 岡山大学 津島キャンパス, 2003 年 9 月 20-23 日

早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “T 型量子細線レーザーの利得スペクトル”, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 九州大学箱崎地区(2004 年 3 月 27-30 日)

安東頼子, 山田展之, 入江勉, 榎本敏照, 久保田英博, 秋山英文 (東大物性研, 科技機構, アトー), “発光絶対光量測定法の開発と生物発光の量子収率測定”, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 九州大学箱崎地区(2004 年 3 月 27-30 日)

井原章之, 早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “n 型ドープ GaAs 量子細線の発光および発光励起スペクトル測定”, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 九州大学箱崎地区(2004 年 3 月 27-30 日)

縞谷和宏, 田島裕之, 池田真吾, 松田真生, 安東頼子, 秋山英文 (東大物性研), “ミオグロビンを用いた OLED の特性”, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 九州大学箱崎地区(2004 年 3 月 27-30 日)

池田真吾, 松田真生, 田島裕之, 安東頼子, 呉 智元, 秋山英文 (東大物性研), “Cytochrome c を用いた有機 EL 素子の発光挙動と I-V 特性”, 応用物理学会, 2004 年 第 51 回 春季講演会, 東京工科大学, 2004/3/28-31

藤井健輔, 前田知徳, 森川高至, 沢丸大樹, 小柴 俊, 秋山英文, 鶴町徳昭, 中西俊介, 角田直人, 伊藤 寛, 八塚正太, 山田大樹, 小川 洸, 濱谷亮輔 (香大工, 東大物性研), “GaAs/AlAs 系デジタルアロイの MBE 成長と評価”, 応用物理学会, 2004 年 第 51 回 春季講演会, 東京工科大学, 2004/3/28-31

青木貴嗣, 森桶利和, 呉 智元, 秋山英文, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 青木大一郎, 尾鍋研太郎 (埼玉大工, 東大物性研, 東大工), “極低窒素濃度 GaAsN 混晶からのフォトルミネセンス”, 応用物理学会, 2004 年 第 51 回 春季講演会, 東京工科大学, 2004/3/28-31 30p-YG-8

山本憲哉, 根木泰義, 藤井健輔, 角田直人, 小柴 俊, 秋山英文 (香大工, 東大物性研), “AlAs/GaAs デジタルアロイ半導体の界面構造”, 日本金属学会 2004 年春期大会 2004 年 3 月 30 日-4 月 1 日 東京工業大学(大岡山), 講演番号 402

富尾 祐, 小川 哲生, 「無限次元電子-正孔系の金属-絶縁体転移」日本物理学会第 59 回年次

大会 30pXQ-1(九州大学箱崎地区 2004 年 3 月 30 日).

浅野 建一, 小川 哲生, 「Absence of exciton Mott transition in one-dimensional electron-hole systems」 日本物理学会第 59 回年次大会 30pXQ-2(九州大学箱崎地区 2004 年 3 月 30 日).

木下基, Manyalibo J. Matthews, 秋山英文 (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), ”バーニア効果を用いた外部共振器型半導体レーザー”, 日本物理学会秋季大会(青森大, 2004 年 9 月 12-15 日)15aTG-6

呉智元, 吉田正裕, 秋山英文, Loren Pfeiffer, Ken West(東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), ”超弱励起による原子平坦面をもつ量子井戸の発光スペクトル”, 日本物理学会秋季大会(青森大, 2004 年 9 月 12-15 日)14pYC-7

早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West(東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), ”T 型量子細線における利得吸収スペクトルの温度依存性”, 日本物理学会秋季大会(青森大, 2004 年 9 月 12-15 日)14pXC-14

森桶利和, 青木貴嗣, 呉 智元, 吉田正裕, 秋山英文, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 青木大一郎, 尾鍋研太郎(埼玉大工, 東大物性研, CREST, JST, 東大工), “レーザ照射による GaAsN 混晶の発光効率向上の窒素濃度依存性”, 2004 年秋季第 65 回応用物理学会学術講演会(東北学院大学, 2004/9/1-9/4)3p-W-7

浅野 建一, 小川 哲生, 「高密度 1 次元電子正孔系の繰り込み群による解析」 日本物理学会 2004 年秋季大会 13aXD-5(青森大学 2004 年 9 月 13 日).

富尾 祐, 小川 哲生, 「励起子モット転移の動的平均場理論」 日本物理学会 2004 年秋季大会 13aXD-6(青森大学 2004 年 9 月 13 日).

花島君俊, 森桶利和, 青木貴嗣, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 吉田正裕, 秋山英文, 平山琢, 片山竜二, 尾鍋研太郎(埼玉大工, 東大工, 東大物性研), ”窒素を δ ドープした GaAs の顕微フォトルミネッセンス”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会(埼玉大学, 2005 年 3 月 29 日-4 月 1 日) 30a-L-11

田島裕之, 縞谷和宏, 池田真吾, 安東頼子, 松田真生, 秋山英文(東大物性研), ”生体物質を用いた発光ダイオードの作成, 物性測定”, 日本化学会第 85 春季年会(神奈川大学横浜キャンパス, 2005 年 3 月 26-29 日)2F1-25

小簗剛, 縞谷和宏, 池田真吾, 松田真生, 田島裕之, 安東頼子, 秋山英文 (東大物性研), ”生体分子を用いた有機 EL デバイス”, 日本物理学会第 60 回年次大会(東京理科大野田キャンパス, 2005 年 3 月 24-27 日)26pYK-1

高橋和, 早水裕平, 伊藤弘毅, 吉田正裕, 秋山英文, Loren Pfeiffer, Ken West(東大物性研, ルーセント・ベル研), ”T-型量子細線レーザーの吸収スペクトル”, 日本物理学会第 60 回年次大会(東京理科大野田キャンパス, 2005 年 3 月 24-27 日)27aZC-2

吉田正裕, 早水裕平, 秋山英文, Loren Pfeiffer, Ken West(東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), ” T 型量子細線中の一次元電子正孔系の時間分解発光測定”, 日本物理学会第 60 回年次大会(東京理科大野田キャンパス, 2005 年 3 月 24-27 日)27aZC-1

中谷 正俊, 小川 哲生, 「共振器中の 2 原子の量子ダイナミクス」日本物理学会第 60 回年次大会 25aYG-6(東京理科大学野田キャンパス 2005 年 3 月 25 日).

富尾 祐, 辰巳 浩一, 浅野 建一, 小川 哲生, 「電子-正孔系の励起子モット転移と光学応答」日本物理学会第 60 回年次大会 26pYH-1(東京理科大学野田キャンパス 2005 年 3 月 26 日).

本田 光太郎, 富尾 祐, 浅野 建一, 小川 哲生, 「電子-正孔系の対凝縮と光学応答」日本物理学会第 60 回年次大会 26pYH-2(東京理科大学野田キャンパス 2005 年 3 月 26 日).

矢口裕之, 清水博史, 森桶利和, 青木貴嗣, 土方泰斗, 吉田貞史, 宇佐美徳隆, 吉田正裕, 秋山英文, 青木大一郎, 尾鍋研太郎 (埼玉大工, 東北大金研, 東大物性研, 東大工), “ラマン分光を用いた GaAsN 混晶の光照射による構造変化の評価”, 2005 年秋季第 66 回応用物理学会学術講演会(徳島大学, 2005/9/7-9/11)9p-ZA-18

伊藤弘毅, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “5nm スケール AlAs/GaAs T 型量子細線の発光及び発光励起スペクトル II”, 日本物理学会 2005 年秋季大会(同志社大京田辺キャンパス, 2005 年 9 月 19-22 日) 19aYC-1

小簗剛, 松田真生, 田島裕之, 安東頼子, 秋山英文(東大物性研), “Hemin を発光層に用いた単層型有機 EL の発光過程”, 日本物理学会 2005 年秋季大会(同志社大京田辺キャンパス, 2005 年 9 月 19-22 日)19aXB-12

稲田智志, 井原章之, 伊藤弘毅, 高橋和, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West(東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “20 周期および 100 周期 T 型量子細線レーザーにおけるレーザー発振の温度依存性”, 日本物理学会 2005 年秋季大会(同志社大京田辺キャンパス, 2005 年 9 月 19-22 日)19aYC-2

井原章之, 早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “n 型にドープした T 型量子細線における PLE スペクトルの電子濃度依存性”, 日本物理学会 2005 年秋季大会(同志社大京田辺キャンパス, 2005 年 9 月 19-22 日)20aXB-5

Ping Huai, 小川 哲生, 「Optical spectra of many-body quantum wires: Effects of quantum confinement」日本物理学会 2005 年秋季大会 19aYC-3(同志社大学京田辺キャンパス 2005 年 9 月 19 日).

富尾 祐, 小川 哲生, 「電子-正孔対凝縮相における BEC-BCS クロスオーバーと光学応答」日本物理学会 2005 年秋季大会 20aXB-8(同志社大学京田辺キャンパス 2005 年 9 月 20 日).

張英樹, 白井紀行, 滝澤真一, 宮岡靖晃, 藤井健輔, 宮川勇人, 鶴町徳昭, 秋山英文 A, 小柴俊, 中西俊介, 伊藤寛, (香川大工, 東大物性研), “AlAs/GaAs 短周期超格子の励起子緩和”, 日本物理学会第 61 回年次大会(愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月 27-30 日)28pRE-5

井原章之, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, (東大物性研, CREST-JST, ルーセント・ベル研), “アクセプターを注入した n 型ドープ量子細線の発光における正孔の局在効果”, 日本物理学会第 61 回年次大会(愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月 27-30 日)27pRE-3

岡野真人, 劉舒曼, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, (東大物性研,

CREST(JST), ルーセント・ベル研), ”電流注入型T型量子細線レーザーの作製と評価”, 日本物理学会第 61 回年次大会(愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月 27-30 日)27pXC-3

鵜沼毅也, 小林研介, 山本愛士, 平川一彦, 関根徳彦, 吉田正裕, 勝本信吾, 金光義彦, 秋山英文(東大生産研, 東大物性研, CREST(JST), 京大化研, 奈良先端大物質), “GaAs 量子井戸におけるサブバンド間吸収・電子ラマン散乱の対応関係と動的多体効果”, 日本物理学会第 61 回年次大会(愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月 27-30 日)27pXC-6

Ping Huai, 小川 哲生, 「Theoretical study on absorption and gain spectra of photoexcited T-shaped quantum wires」日本物理学会第 61 回年次大会 28aXB-7(愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月 28 日).

遠藤雄太, 谷岡健太郎, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 吉田正裕, 秋山英文, 中島史博, 片山竜二, 尾鍋研太郎(埼玉大院理工, 東大物性研, 東大新領域), “窒素を δ ドープした GaAs における等電子トラップの顕微フォトルミネッセンス測定”, 第 67 回応用物理学会学術講演会(立命館大学びわこ・くさつキャンパス, 2006 年 8 月 29 日~9 月 1 日)29p-B-11

DHANORM PLUMWONGROT, 伊藤弘毅, 田村洋介, 西本頼史, 丸山武男, 秋山英文, 荒井滋久(東工大量子ナノセンター, JST-CREST, 東大物性研), “GaInAsP/InP 単一量子細線構造の PL 特性”, 第 67 回応用物理学会学術講演会(立命館大学びわこ・くさつキャンパス, 2006 年 8 月 29 日~9 月 1 日)31a-RE-1

岡野真人, 劉舒曼, 井原章之, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, Oana Malis(東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “Arm-Stem 電流注入型 T 型量子細線レーザーの発振特性”, 日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学西千葉キャンパス, 2006 年 9 月 23-26 日)24aXL-12

吉田正裕, 劉舒曼, 岡野真人, 井原章之, 伊藤弘毅, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, Kirk W. Baldwin(東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “Arm-arm 電流注入型 T 型量子細線レーザーの光学評価と電流注入発振機構の解明”, 日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学西千葉キャンパス, 2006 年 9 月 23-26 日)24aXL-11

Shu-man LIU, 吉田正裕, 岡野真人, 井原章之, 伊藤弘毅, 秋山英文, Loren N. PFEIFFER, Ken W. WEST, Kirk W. BALDWIN(東大物性研, CREST-JST, ルーセント・ベル研), “Low-threshold T-shaped Quantum Wire Lasers by Arm-arm Current Injection”, 日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学西千葉キャンパス, 2006 年 9 月 23-26 日)24aXL-10

岡田高幸, 井原章之, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West(東大物性研, CREST-JST, ルーセント・ベル研), “T 型量子細線を用いた 1 次元励起子吸収の温度依存性測定”, 日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学西千葉キャンパス, 2006 年 9 月 23-26 日)24aXL-9

Ping Huai, 小川 哲生, 「Theoretical study on absorption and gain spectra of photoexcited T-shaped quantum wires II」日本物理学会 2006 年秋季大会 23pXJ-7(千葉大学西千葉キャンパス 2006 年 9 月 23 日).

富尾 祐, 小川 哲生, 「励起子モット転移と電子-正孔対凝縮の有限温度相図」日本物理学会 2006 年秋季大会 25pWB-4(千葉大学西千葉キャンパス 2006 年 9 月 25 日).

稲田智志, 吉田正裕, 秋山英文 (東大物性研, CREST JST) “外部量子効率の共振器長依存性と利得吸収スペクトル測定による多重量子井戸レーザーダイオードの内部損失の違い”, 日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス, 2007/3/18-3/21) 18pTA-10

伊藤弘毅, Plumwongrot, 丸山武男, 吉田正裕, 荒井滋久, 秋山英文 (東大物性研, CREST(JST), 東工大量子ナノセ) “ドライエッチングと埋め込み再成長法による GaInAsP/InP 単一量子細線の低温発光分光”, 日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス, 2007/3/18-3/21) 18pTA-4

井原章之, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, CREST-JST, ルーセント・ベル研) “発光と発光励起スペクトルから見積もる低次元電子系のキャリア温度”, 日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス, 2007/3/18-3/21) 18pTA-3

遠藤雄太, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 吉田正裕, 秋山英文, 中島史博, 片山竜二, 尾鍋研太郎(埼玉大院理工, 東大物性研, 東大新領域), “窒素をデルタドープした GaAs における単一の等電子トラップからの発光”, 2007 年春季第 54 回応用物理学関係連合講演会(青山学院大学相模原キャンパス, 2007/3/27-3/30) 29p-Q-14

Ping Huai, 小川 哲生, 「Theoretical study on optical spectra of n-doped quantum wires」日本物理学会 2007 年春季大会 18pTA-2(鹿児島大学郡元キャンパス 2007 年 3 月 18 日).

浅野 建一, 小川 哲生, 「スレーブボゾン法による電子-正孔系の解析」日本物理学会 2007 年春季大会 18pZB-3(鹿児島大学郡元キャンパス 2007 年 3 月 18 日).

富尾 祐, 小川 哲生, 「励起子 BEC 及び電子-正孔 BCS 状態における発光スペクトルと有限温度効果」日本物理学会 2007 年春季大会 18pZB-4(鹿児島大学郡元キャンパス 2007 年 3 月 18 日).

稲田智志, 吉田正裕, 秋山英文 (東大物性研, CREST JST) “パルス駆動による InGaAsP/InP 量子井戸レーザーダイオードの利得吸収スペクトル評価”, 日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス, 2007/9/21-9/24) 21pTG-5

岡野真人, 劉舒曼, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “光励起及び電流注入による T 型量子細線の利得スペクトル測定”, 日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス, 2007/9/21-9/24) 21pTG-3

丸山俊, 吉田正裕, 伊藤弘毅, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “5nmGaAs/AlAs 量子井戸の界面平坦化と発光線幅”, 日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス, 2007/9/21-9/24)

吉田正裕, 岡野真人, 井原章之, 秋山英文, ふあい平, 小川哲生, Loren Pfeiffer, Ken West (東大物性研, 阪大理, CREST(JST), アルカテル・ルーセント・ベル研), “T 型量子細線レーザーでのキャリア密度増加にともなう光学利得の増大と抑制効果”, 日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス, 2007/9/21-9/24) 21pTG-2

谷岡健太郎, 遠藤雄太, 伊藤正俊, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 片山竜二, 尾鍋研太郎, 吉田正裕, 秋山英文(埼玉大院理工, 東大新領域, 東大物性研), “光照射による GaInAsN 混

晶の発光効率向上に関する研究”，2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会(北海道工業大学, 2007/9/4-9/8) 7p-E-2

伊藤正俊, 遠藤雄太, 土方泰人, 矢口裕之, 吉田貞史, 吉田正裕, 秋山英文, 中島史博, 片山竜二, 尾鍋研太郎(埼玉大院理工, 東大物性研, 東大新領域), “窒素をデルタドープした GaP 中の等電子トラップからの発光” 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会(北海道工業大学, 2007/9/4-9/8) 7a-E-7

遠藤雄太, 伊藤正俊, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 吉田正裕, 秋山英文, 中島史博, 片山竜二, 尾鍋研太郎(埼玉大院理工, 東大物性研, 東大新領域), “窒素をデルタドープした GaAs における単一の等電子トラップからの発光の偏光特性” 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会(北海道工業大学, 2007/9/4-9/8) 7a-E-6

大橋 琢磨, 富尾 祐, 小川 哲生:「励起子モット転移における長距離クーロン力の効果: 拡張動的平均場理論による研究」日本物理学会第 62 回年次大会 21aTQ-10(北海道大学札幌キャンパス 2007 年 9 月 21 日).

Ping Huai, 小川 哲生, 吉田 正裕, 秋山 英文,「Theoretical Study on gain characteristics of semiconductor quantum wire lasers」日本物理学会第 62 回年次大会 21pTG-1(北海道大学札幌キャンパス 2007 年 9 月 21 日).

中谷 正俊, 小川 哲生,「強く結合した二準位系の量子緩和ダイナミクス」日本物理学会第 62 回年次大会 23pTW-8(北海道大学札幌キャンパス 2007 年 9 月 23 日).

③ ポスター発表 (国内会議 39 件, 国際会議 35 件)

T. Enomoto, H. Kubota, H. Akiyama, and Y. Ohmiya, “Novel Method of Photon Counting of Multi-Color Bioluminescence for Reporter Gene Assay”, 31st Annual Meeting of the American Society for Photobiology, Baltimore, July 5-9, 2003 (2003).

K. Ohdaira, H. Murata, S. Koh, M. Baba, H. Akiyama, R. Ito, and Y. Shiraki, “Control of Type-I and Type-II Band Alignments in AlInAs/AlGaAs Self-assembled Quantum Dots by Changing AlGaAs Compositions”, The 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS11), Nara, Japan, July 14-18, 2003 (2003).

J. W. Oh, M. Yoshita, H. Itoh, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, “Carrier Diffusion on Atomically Flat (110) GaAs Quantum Wells”, The 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS11), Nara, Japan, July 14-18, 2003 (2003).

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”, The 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS11), Nara, Japan, July 14-18, 2003 (2003).

Ji-Won Oh, Masahiro Yoshita, Y. Hayamizu, A. Ishii, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, “Atomically Smooth Interface with Characteristic Step Edges in a (110) GaAs Quantum Well Revealed by Microphotoluminescence Technique “, The 9th International Symposium on Advanced Physical Fields (APF-9), “Characterization of Artificial Nanostructures and

Nanomaterials”, P03 (Poster Presentation) March 1–4, 2004, NIMS (Tsukuba), Japan (2004).

Toshiteru Enomoto, Yoriko Ando, Nobuyuki Yamada, Tsutomu Irie, Hidehiro Kubota, Hidefumi Akiyama, and Yoshihiro Ohmiya, “A Spectrophotometry of luminescence for quantitative spectral analysis”, 13th International Symposium on Bioluminescence and Chemiluminescence, Yokohama, Japan, 2–6 August, 2004.

Kenichi Asano and Tetsuo Ogawa, “Instability toward biexciton crystalization in one-dimensional electron-hole systems”, The 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON’04) [at Cracow, Poland] 6–9 July 2004.

Yuh Tomio and Tetsuo Ogawa, “Phase diagram for the exciton Mott transition in infinite-dimensional electron-hole systems”, The 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON’04) [at Cracow, Poland] 6–9 July 2004.

Toshiyuki Ihara, Y. Hayamizu, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K.W. West, “Photoluminescence excitation spectra of one-dimensional electron systems in an n-type doped quantum wire”, The 27th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-27), July 26–30, 2004 (Flagstaff, Arizona, USA) P5.069 (poster); AIP Conf. Proc. 772, 887 (2005).

Masahiro Yoshita, Yuhei Hayamizu, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West, “Crossover from excitons to an electron-hole plasma in a high-quality single T-shaped quantum wire”, The 27th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-27), July 26–30, 2004 (Flagstaff, Arizona, USA) P5.068 (poster); AIP Conf. Proc. 772, 885 (2005).

Masatoshi Nakatani and Tetsuo Ogawa, “Relaxation dynamics toward a thermal equilibrium in the damped Jaynes–Cummings model”, International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Laser and Electro–Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR2005) [at Tokyo, Japan] 11–15 July 2005.

Ping Huai and Tetsuo Ogawa, “Absorption and gain spectra of optically excited semiconductor quantum wires: Effects of Coulomb correlation and screening”, The 15th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC’05) [at Shanghai, China] 1–5 August 2005.

Yuh Tomio and Tetsuo Ogawa, “Exciton Mott transition and pair condensation in electron-hole systems: Dynamical mean-field theory”, The 24th International Conference on Low Temperature Physics (LT24) [at Orlando, Florida, U.S.A.] 10–17 August 2005.

Mutsuki Takagiwa and Tetsuo Ogawa, “Optical properties of low-dimensional electron systems”, Osaka University–Asia Pacific–Vietnam National University, Hanoi Forum 2005 [at Hanoi, Vietnam] 26–29 September 2005.

Masatoshi Nakatani and Tetsuo Ogawa, “Relaxation dynamics of the damped Jaynes–Cummings model”, Osaka University–Asia Pacific–Vietnam National University, Hanoi Forum 2005 [at Hanoi, Vietnam] 26–29 September 2005.

Yuh Tomio and Tetsuo Ogawa, “Dynamical mean-field theory for phase transitions in electron-hole systems”, International Workshop on First Principles Calculation of Correlated

Electrons (FPCCE) [at University of Tokyo, Tokyo, Japan] 30 November – 1 December 2006.

Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West, “Surface stability and atomic-step-edge kinetics on a cleaved-edge-overgrown (110) GaAs surface”, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006), WeA2f.38(poster), Vienna, Austria, July 24–28, 2006: AIP Conference Proceedings Volume 893, ed. Wolfgang Jantsch and Friedrich Schaffler (AIP) (2007) 85–86.

Shu-man Liu, Masahiro Yoshita, Makoto Okano and Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer and Ken W. West, “Current-injection lasing in T-shaped GaAs/AlGaAs quantum-wire lasers”, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006), TuA3o.2, Vienna, Austria, July 24–28, 2006: AIP Conference Proceedings Volume 893, ed. Wolfgang Jantsch and Friedrich Schaffler (AIP) (2007) 861–862.

T. Ihara, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer and K. W. West, “Band-edge divergence and Fermi-edge singularity in an n-type doped T-shaped quantum wire”, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006), TuA3o.3, Vienna, Austria, July 24–28, 2006: AIP Conference Proceedings Volume 893, ed. Wolfgang Jantsch and Friedrich Schaffler (AIP) (2007) 863–864.

Takeya Unuma, Kensuke Kobayashi, Aishi Yamamoto, Masahiro Yoshita, Kazuhiko Hirakawa, Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye, Yoshihiko Kanemitsu, and Hidefumi Akiyama, “Single-particle nature of intersubband electronic Raman scattering and dynamical many-body effects in narrow GaAs quantum wells”, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006), TuA3m.7, Vienna, Austria, July 24–28, 2006: AIP Conference Proceedings Volume 893, ed. Wolfgang Jantsch and Friedrich Schaffler (AIP) (2007) 475–476.

K. Fujii, K. Takao, M. Kakino, N. Tsurumachi, H. Miyagawa, R. Uejii, H. Itoh, S. Nakanishi, H. Akiyama and S. Koshiba, “GaNAs/GaAs multiple quantum well grown by modulated N radical beam sequence of RF-MBE: effect of growth interruption”, 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2006), WeP–31, Tokyo, September 3–8, 2006.

K. Fujii, N. Tsurumamachi, H. Miyagawa, R. Uejii, H. Itoh, S. Nakanishi, H. Akiyama and S. Koshiba, “Structural and Optical Studies of AlAs / GaAs Type-I Ultra Short-period and Fractional Layer Superlattices”, 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2006), MoP-12, Tokyo, September 3–8, 2006.

Hidefumi Akiyama, Masahiro Yoshita, Yuhei Hayamizu, Shu-man Liu, Makoto Okano, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, Ping Huai, Kenichi Asano, Tetsuo Ogawa, and C. Z. Ning, “Exciton-biexciton-plasma crossover and formation of optical gain in quantum wires”, The 17th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS 17), Genova, Italy, July 15–20 2007.

Makoto Okano, Shu-man Liu, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West, “Current injection T-shaped quantum wire lasers with perpendicular doping layers operating at 100K” The 13th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-13), Genova, Italy, July 15–20 2007.

Masahiro Yoshita, Makoto Okano, Toshiyuki Ihara, Hidefumi Akiyama, Ping Huai, Tetsuo Ogawa, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West, “Carrier-Density-Dependent Increase and Suppression of Optical Gain in T-Shaped Quantum-Wire Lasers”, The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2007), Kyoto Univ., Japan, October 15–18 2007.

Masatoshi Nakatani and Tetsuo Ogawa, “Validity of the Markov approximation in quantum master equations for composite systems”, The 9th Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics (CQO9) and The International Conference in Quantum Information (ICQI) [at Rochester, U.S.A.] 10–15 June 2007.

Yuh Tomio and Tetsuo Ogawa, “Optical spectra and excitonic BEC–BCS crossover in coherent electron–hole pair condensation”, The 16th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC07) [at Segovia, Spain] 17–22 June 2007.

Tetsuo Ogawa and Yuh Tomio, “Optical spectra and exciton Mott transition in correlated electron–hole systems”, The 16th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC07) [at Segovia, Spain] 17–22 June 2007.

Kenichi Asano and Tetsuo Ogawa, “Phase diagram of two-dimensional electron–hole Hubbard model”, The 17th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS 17) [at Genova, Italy] 15–20 July 2007.

Tetsuo Ogawa, Ping Huai, Mutsuki Takagiwa, Kenichi Asano, Toshiyuki Ihara, Masahiro Yoshita, and Hidefumi Akiyama, “Linear optical responses of one-dimensional electron systems: Comparison of theories with experiments”, The 17th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS 17) [at Genova, Italy] 15–20 July 2007.

Teruaki Hanamiya, Kenichi Asano, and Tetsuo Ogawa, “Self-consistent theory for optical spectra of exciton gas in quasi-one dimension”, The 17th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS 17) [at Genova, Italy] 15–20 July 2007.

Ping Huai, Tetsuo Ogawa, Kenichi Asano, Yuhei Hayamizu, Toshiyuki Ihara, Masahiro Yoshita, and Hidefumi Akiyama, “Gain characteristics of Coulomb-correlated quantum wire”, The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2007) [at Seoul, Korea] 26–31 August 2007.

Masatoshi Nakatani and Tetsuo Ogawa, “Quantum relaxation dynamics of strongly coupled two-level systems”, The Photons, Atoms and Qubits Conference 2007 (PAQ07) [at London, U.K.] 2–5 September 2007.

Kenichi Asano and Tetsuo Ogawa, “Analysis of electron–hole systems by bosonization technique”, International Workshop 2007, The 21st Century COE Program “Towards a New Basic Science: Depth and Synthesis” [at Osaka University, Toyonaka, Japan] 10–11 September 2007.

Masatoshi Nakatani and Tetsuo Ogawa, “Quantum relaxation dynamics of strongly coupled two-level systems”, International Workshop 2007, The 21st Century COE Program “Towards a New Basic Science: Depth and Synthesis” [at Osaka University, Toyonaka, Japan] 10–11 September 2007.

早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, 科技団 CREST, ルーセント・ベル研), “T型量子細線レーザーの利得測定”, 日本物理学会 2003 年 秋季大会, 岡山大学 津島キャンパス, 2003 年 9 月 20-23 日 22pPSA-55

吉田正裕, 早水裕平, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, 科技団 CREST, ルーセント・ベル研), “高品質単一 T 型量子細線における一次元励起子系の多体効果 II”, 日本物理学会 2003 年 秋季大会, 岡山大学 津島キャンパス, 2003 年 9 月 20-23 日 21pPSB-3

石川 陽, 小川 哲生, 「電子と正孔の空間的凝縮過程の量子論」日本物理学会 2003 年秋季大会 22pPSA-37(岡山大学津島キャンパス 2003 年 9 月 22 日).

浅野 建一, 小川 哲生, 「クーロン相互作用する一次元電子・正孔系のボゾン化による解析」日本物理学会 2003 年秋季大会 22pPSA-38(岡山大学津島キャンパス 2003 年 9 月 22 日).

富尾 祐, 小川 哲生, 「高密度電子-正孔系の動的平均場理論による解析」日本物理学会 2003 年秋季大会 22pPSA-39(岡山大学津島キャンパス 2003 年 9 月 22 日).

鶴沼毅也, 小林研介, 山本愛士, 吉田正裕, 橋本義昭, 勝本信吾, 家泰弘, 金光義彦, 秋山英文 (東大物性研, 科技機構 CREST, 奈良先端大物質), “赤外吸収と電子ラマン散乱による量子井戸のサブバンド間励起 II”, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 九州大学箱崎地区(2004 年 3 月 27-30 日) 28pPSB-8

吉田正裕, 早水裕平, 秋山英文, Loren Pfeiffer, Ken West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “高品質単一 T 型量子細線における一次元励起子系の多体効果 III”, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 九州大学箱崎地区(2004 年 3 月 27-30 日) 28pPSB-7

呉智元, 吉田正裕, 秋山英文, Loren Pfeiffer, Ken West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “超平坦界面を有する(110)GaAs 量子井戸構造における特徴的な表面原子ステップの発光顕微分光測定”, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 九州大学箱崎地区(2004 年 3 月 27-30 日)28pPSB-6

飯田 勝, 渡邊 昌良, 小川 哲生, 「Coulomb 相互作用する半導体キャリアの強電場下でのダイナミクス」日本物理学会第 59 回年次大会 30aPS-43(九州大学箱崎地区 2004 年 3 月 30 日).

高際 睦起, 小川 哲生, 「1 次元電子系の発光スペクトルにおけるフェルミ端特異性」日本物理学会第 59 回年次大会 30aPS-54(九州大学箱崎地区 2004 年 3 月 30 日).

石川 陽, 小川 哲生, 「電子-正孔-格子系における空間的凝縮過程の量子緩和ダイナミクス」日本物理学会第 59 回年次大会 30aPS-56(九州大学箱崎地区 2004 年 3 月 30 日).

東田 和万, 小川 哲生, 「誘電体近傍での exciton 輸送の Keldysh 理論」日本物理学会第 59 回年次大会 30aPS-90(九州大学箱崎地区 2004 年 3 月 30 日).

稲田智志, 木下基, 高橋和, 早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文 (東大物性研, CREST(JST)), “レーザーダイオードを用いたエタロンフィルタの顕微透過計測”, 日本物理学会秋季大会(青森大, 2004 年 9 月 12-15 日)13pPSA-56

安東頼子, 山田展之, 入江勉, 榎本敏照, 久保田英博, 丹羽一樹, 近江谷克裕, 秋山英文(東

大物性研, CREST(JST), アトー, 産総研, 静岡大院), ”発光絶対光量測定法の開発と生物発光の量子収率測定 II”, 日本物理学会秋季大会(青森大, 2004 年 9 月 12-15 日)14aPS-81

高橋和, 早水祐平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren. Pfeiffer, Ken West (東大物性研, ルーセント・ベル研), ”顕微透過測定による T-型量子細線レーザーの吸収-利得スペクトル”, 日本物理学会秋季大会(青森大, 2004 年 9 月 12-15 日)13pPSA-80

鵜沼毅也, 小林研介, 山本愛士, 吉田正裕, 橋本義昭, 勝本信吾, 家泰弘, 金光義彦, 秋山英文(東大物性研, CREST(JST), 奈良先端大物質, 京大化研), ”赤外吸収と電子ラマン散乱による量子井戸のサブバンド間励起 III”, 日本物理学会秋季大会(青森大, 2004 年 9 月 12-15 日)13pPSA-79

本田 光太郎, 富尾 祐, 小川 哲生, 「T 行列近似による電子-正孔対凝縮の解析」日本物理学会 2004 年秋季大会 13aPSA-52(青森大学 2004 年 9 月 13 日).

石川 陽, 小川 哲生, 「高密度電子正孔系の LA-フォノンによる緩和の時空間ダイナミクス」日本物理学会 2004 年秋季大会 13pPSA-54(青森大学 2004 年 9 月 13 日).

伊藤弘毅, 早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), ”5nm スケール AlAs/GaAs T 型量子細線の発光及び発光励起スペクトル”, 日本物理学会第 60 回年次大会(東京理科大野田キャンパス, 2005 年 3 月 24-27 日)24aPS-103

石川 陽, 小川 哲生, 飯田 勝, 齋藤 伸吾, 「一次元電子-正孔系における時空間キャリアダイナミクス」日本物理学会第 60 回年次大会 24aPS-57(東京理科大学野田キャンパス 2005 年 3 月 24 日).

安東頼子, 山田展之, 入江勉, 榎本敏照, 久保田英博, 丹羽一樹, 近江谷克裕, 秋山英文(東大物性研, CREST・JST, アトー, 産総研, 静岡大), ”絶対値発光量測定法とホタルの量子収率”, 日本物理学会 2005 年秋季大会(同志社大京田辺キャンパス, 2005 年 9 月 19-22 日)22pPSA-4

井原章之, 早水裕平, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), ”n 型にドープした T 型量子細線における PLE スペクトルの温度依存性”, 日本物理学会 2005 年秋季大会(同志社大京田辺キャンパス, 2005 年 9 月 19-22 日)20pPSA-21

石川 陽, 小川 哲生, 齋藤 伸吾, 「一次元電子-正孔系における時空間キャリアダイナミクスと光学応答」日本物理学会 2005 年秋季大会 20pPSA-32(同志社大学京田辺キャンパス 2005 年 9 月 20 日).

浅野 建一, 小川 哲生, 「高密度 1 次元電子正孔系のボゾン化法による解析」日本物理学会 2005 年秋季大会 20pPSA-55(同志社大学京田辺キャンパス 2005 年 9 月 20 日).

吉田正裕, 秋山英文, “量子細線における光学利得と多体効果” 独立行政法人科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」研究領域公開シンポジウム, 平成 17 年 10 月 18 日(火), 東京ガーデンパレス, 御茶ノ水, 東京

吉田正裕, 秋山英文, “高品質 T 型量子細線レーザーの作製と評価” 独立行政法人科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」研究領域公開シンポジウム, 平成 17 年 10 月 18 日(火), 東京ガーデンパレス, 御茶ノ水, 東京

富尾 祐, 小川 哲生, 「励起子 BEC-BCS クロスオーバーと光学吸収／利得スペクトル」日本物理学会第 61 回年次大会 28aPS-23(愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月 28 日).

中谷 正俊, 小川 哲生, 「相互作用する原子-光子系の緩和ダイナミクス」日本物理学会第 61 回年次大会 29pPSB-43(愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月 29 日).

鵜沼毅也, 小林研介, 山本愛土, 吉田正裕, 平川一彦, 勝本信吾, 金光義彦, 秋山英文(東大生研, 東大物性研, CREST(JST), 京大化研, 奈良先端大物質) “GaAs 量子井戸におけるサブバンド間吸収・電子ラマン散乱の対応関係と動的多体効果 II”, 日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス, 2007/3/18-3/21) 19pPSB-24

花宮 輝彰, 浅野 建一, 小川 哲生, 「擬 1 次元系における低密度励起子相の吸収スペクトル」日本物理学会 2007 年春季大会 19pPSB-9(鹿児島大学郡元キャンパス 2007 年 3 月 19 日).

有井 宏敏, 浅野 建一, 小川 哲生, 「電子-正孔系+光子場における BCS 状態」日本物理学会 2007 年春季大会 19pPSB-18(鹿児島大学郡元キャンパス 2007 年 3 月 19 日).

中谷 正俊, 小川 哲生, 「複合系の量子マスター方程式について」日本物理学会 2007 年春季大会 21aPS-45(鹿児島大学郡元キャンパス 2007 年 3 月 21 日).

井原章之, 吉田正裕, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West (東大物性研, CREST(JST), ルーセント・ベル研), “発光励起スペクトル測定法で見るドープ量子井戸の光放出と光吸収の関係”, 日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス, 2007/9/21-9/24) 23pPSB-54

西田 拓人, 浅野 建一, 富尾 祐, 大橋 琢磨, 小川 哲生, 「クラスター摂動法を用いた低次元電子-正孔系の解析」日本物理学会第 62 回年次大会 23pPSA-76(北海道大学札幌キャンパス 2007 年 9 月 23 日).

渡邊 耕太, 浅野 建一, 小川 哲生, 「カーボンナノチューブでの励起子分子の Auger 再結合過程」日本物理学会第 62 回年次大会 23pPSA-78(北海道大学札幌キャンパス 2007 年 9 月 23 日).

花宮 輝彰, 浅野 建一, 小川 哲生, 「1 次元励起子気体の吸収スペクトル」日本物理学会第 62 回年次大会 23pPSA-80(北海道大学札幌キャンパス 2007 年 9 月 23 日).

浅野 建一, 小川 哲生, 「Slave-Boson 法による電子-正孔 Hubbard モデルの励起子 Mott 転移および凝縮相の解析」日本物理学会第 62 回年次大会 23pPSB-10(北海道大学札幌キャンパス 2007 年 9 月 23 日).

富尾 祐, 小川 哲生, 「動的平均場理論による励起子モット転移と電子-正孔対凝縮の研究」日本物理学会第 62 回年次大会 23pPSB-11(北海道大学札幌キャンパス 2007 年 9 月 23 日).

(4)特許出願

①国内出願 (3 件)

(以下3件は、CREST 研究のメイン・直接の成果ではないが、関連があるので報告する。)

- 1.「複数の発光成分の発光量測定法およびその発光測定装置」, 秋山英文, 近江谷克裕, 榎本敏照, 堀隆司, 久保田英博, 出願人「アトー株式会社」2003 年 5 月 2 日出願 特願 2003-162987 2004 年 11 月 25 日公開 特開 2004-333457
- 2.「微弱光スペクトルの測定方法及びその装置」, 秋山英文, 近江谷克裕, 山田展之, 入江勉, 出願人「アトー株式会社」2005 年 9 月 15 日公開 特開 2005-249760 2004 年 3 月 1 日出願 特願 2004-90488
- 3.「総発光量測定基準容器および測定方法」, 秋山英文, 安東頼子, 近江谷克裕, 久保田英博, 出願人「国立大学法人東京大学, 独立行政法人産業技術総合研究所, アトー株式会社」2006 年 1 月 5 日出願 特願 2006-025047

②海外出願 (0 件)

なし

(5)受賞等

①受賞

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

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), [対象論文 S. Ikeda, H. Tajima, M. Matsuda, Y. Ando, H. Akiyama, “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).]

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, \$1500, 2006.10.19.

②新聞報道

朝日新聞 2005 年 6 月 28 日夕刊, ”「量子細線」は光の98%吸収”

科学新聞 2005 年 6 月 24 日, ”ナノ細線のデバイス化に光明 単一のナノメートル半導体細線 強い光吸収を確認”

柏市民新聞 2005 年 7 月 8 日, ”ナノ単位の半導体細線で光吸収を測定”

東京大学新聞 2005 年 7 月 5 日, ”半導体細線の性質解明”

③その他
なし

7 研究期間中の主な活動(ワークショップ・シンポジウム等)

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H14 年 11 月 13 日	JST 戦略創造プロジェクト代表者説明会	JST 東京本部 市ヶ谷	多数	全体説明会の機会に、秋山・小川の打ち合わせ
H14 年 11 月 28-30 日	「オプト・マテリアルサイエンス」研究会	国際高等研究所・奈良	20	秋山チームと小川チームの成果発表と議論
H14 年 12 月 24 日	領域総括と研究打合せ	JST 渋谷オフィス	2	研究計画について打ち合わせ
H15 年 2 月 18-19 日	研究打合せ・大阪大学 COE 研究会	大阪大学	10 50	小川チームと秋山の理論研究に関する打ち合わせと、研究会での小川と秋山の発表
H15 年 3 月 27 日-4 月 3 日	EU Network Workshop・ケンブリッジ大研究打ち合わせ	英国カーディフ大・ケンブリッジ大	80 20	英国ケンブリッジ大のシマンツカ博士・リトルウッド教授らと研究打ち合わせ・討論
H15 年 5 月 13 日	セミナー・研究打合せ	東京大学物性研究所	30	シマンツカ博士を招聘しセミナー・研究打合せ
H15 年 5 月 13-14 日	全体会議・研究会	東京大学物性研究所	30	秋山チーム・小川チーム全体の研究会・研究打合せ
H15 年 5 月 26 日	セミナー・研究打合せ	奈良先端大相原研究室	5	シマンツカ博士を招聘しセミナー・研究打合せ
H15 年 5 月 27 日	セミナー・研究打合せ	大阪大学小川研究室	10	シマンツカ博士を招聘しセミナー・研究打合せ
H15 年 7 月 11-13 日	合同研究会	軽井沢・上智大学セミナーハウス	50	秋山チーム・東大五神研，上智大江馬研，慶応大齋木研と合同研究会
H15 年 9 月 20-23 日	学会（メンバーの大半が参加）	物理学会（岡山）	多数	秋山チームと小川チームの成果発表と議論
H15 年 10 月 10 日	研究打合せ	東京大学物性研究所	5	浅野健一氏と秋山チームで励起子分子効果・発表論文について議論
H15 年 12 月 5 日	第2回JST領域内研究打合せ	JST 上野オフィス	30	研究進捗状況の発表と研究討論
H16 年 2 月 18 日	ナノ・バーチャルラボ全体発表会	お台場	多数	全体発表会の機会を活用して，関連研究者と討論
H16 年 2 月 19-20 日	研究会発表および研究打合せ	東京大学物性研究所	100 10	浅野健一氏，富尾裕氏の物性研研究会における発表と秋山チームとの詳細研究打合せ

H16年3月22日	セミナー・研究打合せ	東京大学物性研究所	30	イボ・マッシューズ博士を招聘しセミナー・研究打合せ
H16年3月27-30日	学会（メンバーの大半が参加）	物理学会（九州大学）	多数	秋山チームと小川チームの成果発表と議論
H16年5月31日-6月2日	全体会議・研究会	大阪大学	30	秋山チーム・小川チーム全体の研究会・研究打合せ
H16年9月12-15日	学会（メンバーの大半が参加）	物理学会（青森）	多数	秋山チームと小川チームの成果発表と議論
H16年10月9-11日	合同研究会	軽井沢・上智大学セミナーハウス	50	秋山チーム・小川チーム・東大五神研，上智大江馬研，慶応大齋木研と合同研究会
H16年11月10日	セミナー・研究打合せ	東京大学物性研究所	10	Aref Chowdury博士を招聘しセミナー・研究打合せ
H16年12月14日	第3回JST領域内研究打合せ	JST上野オフィス	40	研究進捗状況の発表と研究討論
H17年2月17-18日	研究会・研究打合せ	大阪大学	20	秋山チーム・小川チームの研究会・研究打合せ
H17年3月24-27日	学会（メンバーの大半が参加）	物理学会（野田）	多数	秋山チームと小川チームの成果発表と議論
H17.6.6-8	秋山チーム・小川チーム合同研究会	大阪大学	20	秋山チーム・小川チーム全員が参加して合同で研究発表討論
H17.9.19-22	物理学会（主催ではない。参加）	同志社大学	20（秋山小川チーム参加者）	学会に秋山チーム・小川チームほぼ全員が参加して研究発表討論
H17.10.18	CREST 公開シンポジウム（主催ではない。参加）	東京ガーデンパレスホテル	12（秋山チーム全員と小川富尾が参加）	シンポジウムの機会を利用し他チームも含め討論
H17.11.1	荒井チームとの研究打ち合せ	東京工業大学	20	荒井チームと秋山チームとの共同研究打ち合せ
H17.11.4-6	秋山チーム・小川チーム・東大五神研島野研・上智大江馬研・慶応大齋木研の合同研究会	軽井沢・上智大学セミナーハウス	50	秋山チーム・小川チーム全員が参加して，外部の研究室と研究発表と討論を行った
H17.11.8	秋山小川打ち合せ	芝公園	2	研究方針の打ち合わせ
H17.11.9-16	秋山 Hauli 合宿	東大物性研	2	秋山とHauliの集中合宿研究

H17.11.18	光計測標準に関する見 学打ち合せ	産総研(筑 波)	10	秋山チームが産総研光計測 標準部門を訪問見学打ち合 せ
H17.12.16	ライス大河野研と合同研 究会	東大物性研	15	秋山チームとライス大河野 研との合同研究会
H18.1.31	荒井チームとの研究打 ち合せ	東京工業大 学	10	荒井チームと秋山チームと の共同研究打ち合せ
H18.3.13	秋山-小川チーム理論 検討会	大阪大学	5	小川チームと秋山の理論研 究に関する検討会
H18.3.27-30	物理学会(主催ではな い。参加)	愛媛大学	20 (秋山 小川チー ム参加者)	学会に秋山チーム・小川チ ームほぼ全員が参加して研 究発表討論
H18.4.25-26	秋山チーム・Hauい 研究 打ち合わせ	東大物性研	12	秋山チームとHauい が共同研 究打ち合わせ
H18.5.13-14	光物研究会京都支部の 研究討論会	高浜町営国 民 宿 舎「城 山 荘」	10	小川チームが光物研究会と 実験・理論の研究討論
H18.6.29-30	秋山チーム・ 小川チーム合同研究会	大阪大学	22	秋山チーム・小川チーム全 員が参加して合同で研究発 表討論
H18.7.6	秋山-小川チーム理論 検討会	大阪大学	5	小川チームと秋山の理論研 究に関する検討会
H18.7.31- 8.1	秋山チーム・Hauい 研究 打ち合わせ	東大物性研	12	秋山チームとHauい が共同研 究と研究打ち合わせ
H18.9.5-6	秋山チーム・Hauい 研究 打ち合わせ	東大物性研	12	秋山チームとHauい が共同研 究と研究打ち合わせ
H18.9.23-26	物理学会(主催ではな い。参加)	千葉大学西 千葉キャン パス	20 (秋山小川 チー ム 参 加者)	学会に秋山チーム・小川チ ームほぼ全員が参加して研 究発表討論
H18.11.3-5	秋山チーム・小川チー ム・東大五神研島野研・ 上智大江馬研・慶応大 斎木研の合同研究会	軽井沢・上 智大学セミ ナーハウス	50	秋山チーム・小川チーム全 員が参加して、外部の研究 室と研究発表と討論
H18.12.26-2 7	第4回「超高速・超省電 力高性能ナノデバイス・ システムの創製」研究打 ち合わせ・秋山-小川チ ーム討論会	川崎グラン ドホテル	50・ 10	研究進捗状況の発表と研 究討論・ 秋山-小川チーム理論研究 検討
H19.2.7	秋山-小川チーム理論 検討会	大阪大学	5	小川チームと秋山の理論研 究に関する検討会
H19.3.2	秋山-小川チーム理論 検討会	大阪大学	7	小川チームと秋山の理論研 究に関する検討会
H19.3.18-21	物理学会(主催ではな い。参加)	鹿児島大学	20 (秋山 小川チー ム参加者)	学会に秋山チーム・小川チ ームほぼ全員が参加して研 究発表討論

H19.4.26	研究会	東大物性研	20	東大ハロルド・ファン研と秋山チームの合同研究会
H19.5.22	NTT 新田チーム・秋山チーム・小川チーム合同研究会	NTT・厚木	30	NTT 新田チーム・秋山チーム・小川チーム全員が参加して合同で研究発表討論
H19.6.14-15	秋山チーム・Hau1 研究打ち合わせ	東大物性研	12	秋山チームとHau1 が共同研究と研究打ち合わせ
H19.6.20	東工大荒井チームとの研究打ち合せ	東京工業大学	20	荒井チームと秋山チームとの共同研究打ち合せ
H19.6.26-27	秋山チーム・小川チーム合同研究会	大阪大学	22	秋山チーム・小川チーム全員が参加して合同で研究発表討論
H19.7.4-6	研究会	京都大学化学研究所(京都宇治)	20	秋山チーム・小川チームの主要メンバーが参加して研究発表・討論
H19.7.23-24	研究打ち合わせ	東大物性研	15	Ning, 小川, 富尾, ファイおよび秋山チームの研究打ち合わせ
H19.8.21	研究打ち合わせ	東大・本郷	5	秋山・小川ほか3名が研究打ち合わせ
H19.9.21-24	物理学会(主催ではない。参加)	北海道大学	20 (秋山小川チーム参加者)	学会に秋山チーム・小川チームほぼ全員が参加して研究発表討論
H19.9.28	富尾氏セミナーと研究検討会	大阪大学	10	小川チームと秋山が富尾氏の理論研究に関する検討会

8 研究成果の展開

(1)他の研究事業への展開

まだ実現していない、「超低しきい値レーザー」「定量的量子工学レーザー理論確立」を目指す発展研究計画を、代表者秋山と分担者小川が協力して企画・予算申請し、競争的資金・研究事業へ展開する努力をしているところだがまだ実現していない。1次元系や、電子正孔多体系の基礎物理に関する研究は、大型予算が無くても継続してライフワークとして継続する。

(2)実用化に向けた展開

生物化学発光絶対光量計測装置、発光計測標準の開発研究について、民間企業および産業技術総合研究所と共同のプロジェクトが始まりつつある。顕微発光計測技術は、以前から研究開発を進めてきて、本 CREST 研究でも大きく進展をさせたものであるが、極めて応用範囲が広く、半導体ナノ構造はもちろん、酵素の中で効率良く反応する生体物質など、医療・創薬・環境計測の現場で極めて微量の物質を高感度に検出する化学分析技術に直結している。とくに、絶対発光光量計測技術は、生物化学発光の計測分野で極めてニーズの高いものであることが明らかになってきた。というのも、血液検査など多くの医療検査において蛍光や化学発光は最も多く使われる技術であり、そのための発光プローブの開発・評価には、絶対発光光量計測技術が有効である。しかしながら、市販の全ての蛍光分光光度計は任意単位・相対単位でしか発光量を計測できない。発光を絶対量で計測できる分光機器や、市販の蛍光分光光度計の校正ツールを開発することは、ニーズの大きいことであることがより明らかになったので民間企業と協力して、技術の普及や製品化を進める共同プロジェクトを開始した。これらの技術は、光放射強度の計測標準技術の一貫であることも、この数年の研究でわかり、すでに、産業技術総合研究所の光放射強度の計測標準の研究部門の研究者と密に連絡をとり、国家標準とレーザブルな発光蛍光計測標準を作ってゆくことを企画中である。これができれば医療・医学・薬学・生物・化学など広い応用分野に適用する技術として社会に成果還元してゆけると考えている。

9 他チーム、他領域との活動とその効果

(1)領域内の活動とその効果

同じ領域内の東工大荒井チームとの共同研究を、毎回の領域会議での議論、中間シンポジウムの際の打ち合わせ、さらに中間ヒアリングでの領域総括とアドバイザーからのアドバイス・応援を経て 3 年目から開始することが出来た。工学的および応用実用な視点とデバイス作製に強みをもつ荒井チームと、理学的かつ基礎物理的な視点およびデバイス物理計測・理論解析に強みをもつ我々のチームが、量子細線レーザーの基本的な研究に関して積極的な共同研究を開始できたことは大変ありがたかった。今後もさらに発展させてゆきたい。

新田チームのうち光関係の NTT・筑波大のサブグループとも、毎回の領域会議での議論、中間シンポジウムの際の打ち合わせなどで理解を深め合い、平成 19 年 5 月に合同研究会を開催した。さらに6月と7月に行った秋山・小川が中心となった研究会にも、招待講演を依頼して参加してもらうなど積極的な交流が始まった。世界最高品質の半導体ナノ構造を作製して、精密な物理計測と理論解析を目指すという研究の方向性が共通しており、共同で着実な努力を続ければ大きな成果が得られるものと確信している。

(2)領域横断的活動とその効果

関心はあったが領域外までは手を広げる時間的・人的・資金的な余裕が無かった。

10 研究成果の今後の貢献について

(1) 科学技術の進歩が期待される成果

これまでの半導体レーザー理論では、実験データとの比較によってのみ決定できるような多数の現象論的なパラメータを用いてレーザーの性質を記述するタイプの理論(現象論)か、ミクロなモデルに基づいてレーザーの性質を記述するがその際に著しい単純化をしてしまい電子間のクーロン相互作用などは一切無視する自由電子モデル理論が主流であった。従って、半導体レーザーにおいて、キャリア間のクーロン相互作用がどのように影響しているか、特に次元が下がったときにそれがどう影響するのかは、殆ど予測できない問題であった。そのため、今日のナノ構造半導体レーザーの先端的・開発的・模索的研究において、有効に使える半導体レーザー理論というものはなく、理論と実験の研究の間にはかなり隔たりがあった。

本研究プロジェクトにおいて、量子細線レーザーという非常に明確なターゲットに絞って、レーザー発振に関わる反転分布状態でのクーロン相互作用とそれに起因する量子多体効果との影響に着目しながら、理論と実験を比較して研究を進めた結果、PC ワークステーションを用いて定量的な計算ができる実用的なハートリー・フォックレベル近似理論と、さらに高度な数学的・理論物理的手法を用いて新たな効果や物理現象を発見的に研究するための超ハートリー・フォック近似理論をそれぞれ発展させることが出来た。

実際に研究を行ってみて解ったことは、理論物理学者にとってはとても簡単と思われた(ている)ハートリー・フォックレベル近似理論であっても、実際の・定量的なレーザー特性の計算をしようとすると、遮蔽の取り入れ方、ブロードニングの取り入れ方、発光の計算法など多くの問題があり、相互作用を含めて計算された結果の解釈も簡単ではないことであった。今回、それらを一つずつ解決しながら研究を進めたことで、ハートリー・フォックレベル近似理論を使って定量的・実用的な理論計算を行い、特性の理解や予測をすることができるようになった。近似の有効範囲についても、超ハートリー・フォック近似理論を用いた検討により、かなりの部分が明らかになった。

今日、多くの研究者の関心が、低次元半導体ナノ構造および3D 光閉じ込め・フォトニック結晶光共振器を用いた低しきい値レーザーなど省電力光デバイスに向いている。我々の量子細線レーザーの研究もその一つである。省電力動作下では低電流駆動を行うためキャリア数が低い少数多体キャリア系の光学応答が重要になるほか、量子的ゆらぎも重要になり大きく均一な「平均場状態」にはならないと予想される。このような状況では、さらに超ハートリー・フォックレベル近似理論も不可欠になってくるはずである。

こうした背景の中、理論体系の整備をさらに続ける必要がある。また、理論体系を発展させてゆくために、それと比較すべきクリーンで構造不均一性や界面のダメージなどの影響が十分に小さいレーザーを用いた実験が不可欠で、車の両輪のようにして進める必要がある。整備された理論体系や理論実験比較などを、論文・教科書のような形にまとめ情報発信をしてゆくことで、ナノ構造半導体レーザーの科学技術の進歩に大きな貢献ができると思う。

(2) 社会・経済の発展が期待される成果

本 CREST 研究の実験手法の一つとして開発を進めた、絶対発光光量計測技術は、生物化学発光の計測分野で極めてニーズの高いものであることが解った。ホタルやオワンクラゲの生物発光は、バイオテクノロジー分野で、ATP 検出、DNA 配列解読技術、生体内細胞内反応可視化技術などに既に広く応用されているのであるが、発光の明るさの絶対値を測るための標準技術が欠如しており、我々の成果はその計測標準技術となりうるからである。標準、すなわち「ものさし」や「秤」のない科学技術は、産業には発展し得ないので、我々の絶対発光光量計測技術が発光計測標準を与えたり発光標準化の契機になれば、産業発展に寄与し、社会的・経済的な価値のある成果といえると思う。

11 結び

達成度に関しては、80-90%程度という数字と50%程度という数字が頭に浮かびます。

というのも、私たちの目標は、「高品質の電流注入および光励起 T 型量子細線レーザーを作製し、次元性と多体クーロン相互作用を強く反映するだろうと思われるレーザーの特性を明らかにする」というものでした。成果としては本報告書で述べたとおり、実際に電流注入レーザーは完成し0.27mA というかなり低い最低しきい値を示し、光励起での量子細線レーザーの物理計測がかなり詳細に進んで世界のトップデータがいくつも得られ、得られた新しいデータの理論的な理解もでき、理論体系自体の進展もあり、温度や物質パラメータによってはさらにさまざまな状態・光学応答がありうるとの理論予測もたてられました。それらの事実を元に考えると、目標の80-90%程度の達成度、あるいは期待していた以上の発見・進展があったと言えます。

その反面、(ある意味予想通りの?)誤算もありました。というのも、CREST プロジェクトは予算規模の点でも関与する学生・ポスドクの規模の点でも、我々にとってこれまでで最大のチャレンジでした。そこで、チャレンジするつもりで、電流注入レーザーのような未経験のデバイスを実際に作るゾと宣言し、理論と実験という「言うは易し行うは難し」の共同研究をやるゾと宣言しました。予算がついて必要な道具は買えるのだからきっと大丈夫だろうという楽観も多少ありました。

しかし、実際やってみると、電流注入レーザーの作製には大変苦勞しました。中間評価の時点でも、電流注入発振は実現できていなかったもので、評価コメントとして「電流注入にばかりこだわらず他の成果をめざせ」とも、「研究資源を集中して早く電流注入を達成せよ」とも、両面の指摘を頂きました。「予算がついて道具は買えたのだから」というのはむしろプレッシャーになりました。中間評価から、半年してからようやく初めての電流注入発振が観測されたときは、胸をなでおろしました。電流注入デバイス特性の研究が開始できたのはそれからでしたので、最後は、時間が押せ押せになりました。

また、理論と実験の共同研究もとくに最初のうちは会話がピンとこなくて、私はひとりの実験研究者としても、プロジェクトの代表者としても苦悶しました。例えば、私は、分担者の小川先生の話はかなり解ったのですが、小川研の理論のポスドクや学生の話がどうしても解りませんでした。ましてや、理論と実験のポスドク・学生同士が一緒にプロジェクトの中で協力して共同で課題に取り組んでいるという体制はなかなか作れませんでした。それで、研究会で発表・議論を深夜12時を回るまで時間無制限でやったり、理論のポスドク一人と秋山が1週間あまりの合宿をやったり、泊まりや日帰りの合同研究会・討論会を何度もやったり、そして先端理論と実験の仲立ちをする上ではハートリー・フォックレベルの理論研究を掘り下げることが重要と気づいて1人のポスドクに担当してもらったりしました。その結果、プロジェクトの後半に差し掛かってようやく「理論実験の共同研究プロジェクト体制」が出来たと思います。ですが、この点でも時間が押せ押せになってしまいました。

目指したチャレンジの「しきい値」のようなものを超えるのに時間がかかってしまい、成果を刈り取ること、すなわち、原著論文や解説論文、書籍などを沢山執筆して成果を公表することはこれでも全力でやってきたのですが、期待の半分程度しかできませんでした。論文の質は高く保ってきたことを自負していますが、やったことに比べて論文の量が不十分と思います。総じて、代表者を含め、各研究者・学生の遅筆も原因しています。成果の刈り取り作業は、引き続き、2008年3月いっぱいまでに、またそれ以降にも、きちんと成し遂げる責任があると思っています。パブリッシュされたもので評価するという研究社会の常識からすると、まだ50%の達成度しか成し遂げていないと言うほかない気がしています。

得られた成果の意義は、非常に大きいと思います。もちろん、代表者秋山と分担者小川をはじめとしてプロジェクト参加者全員が、研究で得たことを自己満足として終らせずに、今後も、成果をきちんと公開・情報発信し、新しい学理や技術などまとまった形にまで発展させること、第3者にもアクセス可能な形にまで持ち上げることが必要条件だと思います。

意義ある成果としては、例えば、量子細線レーザーは低しきい値レーザーを目指す上で有効かという問題に対して、YES という答えを得ました。室温の、透明電流や透明電流近傍での利得ピーク値は、初期の自由粒子近似理論による見積りがある程度正しいこともわかりました。しかし、注入

電流が大きくなるにつれて、著しいキャリア間相互作用の影響が効いてくるので、利得ピーク値は低くなってしまうことなども知りました。レーザー共振器や動作電流密度などを適切に設計しないと量子細線の利点が失われてしまうことになります。こうした知見は、量子細線レーザーやドットレーザーなど低次元量子構造レーザーの研究開発において極めて重要なポイントだと思います。

また、今後、グリーン関数など高度な数学手法を用いた量子物理学的な理論体系と、応用実用を重視した電子工学的レーザー理論体系を融合し、近代的な半導体レーザー理論を作ってゆく意義づけやその基礎などが得られました。さらに、理論と実験をきちんと比較するための、高品質の量子細線レーザーや量子井戸レーザー試料と精密評価技術の開発がなされたことも大きな意義だと思います。

また、例えば、基礎学理の観点では、電子間・正孔間・電子-正孔間の相互作用の強さと長さレンジ、キャリア質量、さらに温度などを大きく変えて調べてみると、さまざまな秩序状態と光学応答が可能であることを、理論的に集中的に掘り下げて示すことが出来ました。更なる理論探索や、対応する実験を企画しチャレンジすることは今後の課題です。

また、クリーンな1次元および2次元の電子系や電子正孔系の本質を探る舞台となる、量子細線及び量子井戸の著しい高品質化やキャリア濃度制御、計測技術の改良も達成できました。材料あつての物性研究ですから、これは今後の基礎研究に大きな意義を果たすと思います。

研究代表者としてのプロジェクト運営について気づいたポイントがいくつかあります。

まず、本プロジェクトは2チームの共同研究として計画したわけですが、その分担者の小川先生が、代表者の秋山と同じ責任感を持って「もう一人の代表者」のようにしてプロジェクトで活躍してくれたことが非常に重要でした。科研費の研究分担者の位置付けが審議会などで議論されていますが、研究費をもらわないからといって責任を持たない分担者や、研究費をもらっても責任を持たない分担者、また一方、責任を持って研究したのにそのクレジットが得られない分担者など、様々なケース・問題があり、チームの数が増えるとさらに問題も増すと思います。今回は、小川先生の理論研究室と2チームでプロジェクトを構成し、個別では全く不可能な、真に戦略的な研究が遂行できたことが良かったと思います。

CRESTのようなプロジェクト研究を行うにあたっては、明快でシンプルな課題・スローガンというのが如何に重要かということも学びました。当初、私たちの考えた課題は「量子細線レーザーにおける電子間相互作用と低次元性」という科学的な重要ポイントを表現しようとしたものですが、それを改めて現在の課題名「量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明」としました。その結果、課題名だけからでも何をすることが明確になり、チームに加わった新大学院生でもすぐに、「量子細線レーザーを作ること、その特性を解明すること」を目指してチームとして戦略的に研究をしているのだということを知り、如何に自分が貢献するかを一人一人自発的に意識するようになってくれました。研究の最終年度には、提案した「量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明」という課題に対してダイレクトな答えを出そう、研究室や理論実験の壁を越えて他の人の研究に口出ししよう、というスローガンを設けてチーム全員で研究の仕上げに取り組みましたが、既に研究課題がチームメンバー全員に浸透していたおかげでそうすることが可能でした。

CREST 研究費の使い方に関して、私たちは、「足で稼ぐこと」と「常に2名の理論ポスドクを雇用すること」という方針を堅持して計画・執行を行いました。結果として、とても良かったと思っています。電流注入量子細線レーザーの作製は、非常に高価な結晶成長および加工装置を必要とするので、CREST 予算が恵まれているといっても、設備を自分の研究室にすべて整備することは出来ません。そこで試行錯誤を繰り返すためにどうしても手元に無ければいけない設備装置だけは購入しましたが、共同研究や共同利用できる場合には我々が出かけて行って研究の意義と自分達の情熱を相手に伝えて説得して、作業依頼したり装置借用をしました。交通費・旅費は多くかかりましたが、設備を購入するよりはコストパフォーマンスもよく、逆に相手に対する説明責任を果たすことで研究の意図や内容が磨かれ、戦略的な研究が出来たと思います。「常に2名の理論ポスドク」は、研究の推進のためにも若手研究者育成の意味でも非常に有意義でした。しかも、プロジェクトで雇うし

たことにより、彼らは「量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明」という問題提起に自分がどう答えるかを常に意識してくれて、さらに、実験や理論のまわりの研究者・学生と深く交流しながら研究を進める動機づけが与えられました。プロジェクト後のポストは、最初のポストドク浅野氏は2004年に大阪大学准教授に、2人目のポストドク富尾氏は2008年1月からアリゾナ州立大学ポストドクに、3人目のHuai氏も2007年12月から上海応用物理学研究所(Shanghai Institute of Applied Physics)のパーマネント研究員(教員)に、それぞれ決定しています。3人とも、レーザーや半導体電子正孔系の光学物性とはやや異なる分野からプロジェクトに参入してきましたが、このプロジェクトでの研究を継続して更に発展させてゆく進路選択をしてくれました。この点では、若手研究者育成にも成功したのではないかと考えています。

プロジェクトに参加した大学院生たちの多くも、学位修了後は国内外の各大学・研究所の主要グループのポストドクやスタッフなどになり、明るく元気な研究者として活躍しています。近年、周囲を眺め渡すと、教員・研究員が肉体を病んだり、学生が精神的に病んだりするが増えているような気がします。これは世の中の研究レベルが高くなり、情報も早く伝わり、競争が激化していることと無関係ではないと思っています。私たちのプロジェクトでは、代表者・指導者の立場から、「健康第一、研究第二」と常々連呼しながら、健康と安全の重要性を強調してきました。大きな事故や病気や怪我もなく、肉体的および精神的に健康な状態で、多くの大学院生、研究員、大学スタッフ、国内外の招聘者・訪問者・共同研究者といった人々が切磋琢磨する場としてプロジェクトが遂行できたことは本当に幸せだったと思います。末尾の写真は、プロジェクトに参加してくれたメンバーの集合写真などです。

戦略的創造研究推進事業の制度は、科研費のような制度と違って、領域総括のリーダーシップで運営が大きく異なっていると思います。ですのでこの事業は、領域ごとに良くも悪くもなりうるのだと思います。私たちは、榊先生が主宰するこの領域でCRESTプロジェクトを進めることが出来たことは非常に幸運でした。私たちが主に理学系の学会で活動していたので、電子工学系の世界になじみが薄く、そのために最初のうちは知りませんでしたが、領域内の他の研究代表者らの学問的ステイタスや研究レベルがとても高いことが徐々にわかり驚きました。毎回の密度の濃い領域会議のときにはただならぬ刺激を受けました。量子細線レーザーの先駆的研究者である榊先生や浅田先生、宮本先生の前で報告をすることは、喜びでもあり心配でもありました。また、私たちと同じように品質にこだわりながら量子細線レーザーの研究を行っている東工大荒井先生のチームと5年間も同じ領域で研究報告や議論をすることができ、しかも終わりの2年間は共同研究をすることができたのも本当に幸運でした。

領域総括の榊先生、領域アドバイザーの先生、村井技術参事、斉藤事務参事、JSTの職員の皆様から、貴重なアドバイス、ただならぬご支援を頂きました。本当に、心から感謝しています。



写真（上）プロジェクト開始半年後の集合写真（2003 年 5 月@東大物性研）。（中左）深夜 12 時まで続いた合同研究会（2003 年 5 月@東大物性研）。（中右）ケンブリッジ大シマンツカ博士を招聘して議論（2003 年 5 月@大阪大）。（下）毎年恒例になった秋山チーム・小川チーム合同研究会（2005 年 6 月@大阪大）