

産業技術総合研究所 光技術研究部門 主任研究官

小倉 睦郎

「原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子効果」

1. 研究実施の概要

半導体デバイスの特性寸法が縮小され電子のドブロイ波長と同程度になると、電子波動関数の状態密度やトンネル確率の制御による量子効果素子の設計が可能となる。

本プロジェクトの目的は、化合物半導体による低次元量子ナノ構造の基礎物性の解明とその有効性の立証である。すなわち、量子細線 FET、量子細線レーザあるいはフォトニックスイッチなどの具体的な量子デバイス構造におけるデバイス性能と低次元電子やエキシトンなどの物性とを関連づけることにより、細線中において電子の散乱が抑制されているかどうか、低次元量子ナノ構造が光デバイスにどのように有効かなど、デバイス物理において重要な課題を明らかにしてゆく。この目的を達成するためには、原子層レベルで位置や形状が制御された極めて均一で高純度な量子ナノ構造の形成が前提となる。

本プロジェクトにおいては、流量変調法を用いた MOCVD や、原子状水素や砒素クラッキングソースを用いた MBE による結晶成長法により、段差基板上に自己形成的に製作した高純度化合物半導体系量子細線を起点として、量子デバイスの開発と低次元エキシトンの光物性、低次元電子伝導などの物性評価を行った。MOCVD による GaAs/AlGaAs 系量子細線においては、原子層レベルで均一な領域が従来手法の $0.1\ \mu\text{m}$ から $2\ \mu\text{m}$ 程度に拡張し、1次元特有のエキシトン状態や明瞭なコンダクタンスステップが現れた。また、MBE により、高次面方位 InP 基板上に $20 \times 10\text{nm}$ (世界最小) の InGaAs/InAlAs 量子細線の形成に成功し、顕著な負性抵抗効果や比較的高温 (10K) における AB 効果を見出した。更に、量子細線レーザにおいては、ファブリーペロー型共振器において、初めて基底レベルからの室温発振を達成するとともに、高密度量子細線を利得結合型グレーティングに用いた分布帰還型量子細線レーザを開発した。また、フェムト秒ポンプ・プローブ技術を用いて量子細線中のエキシトンの位相緩和時間や光パルス伝播における波長分散を評価した。

以下、各研究項目と主な成果を列挙すると。

1. MOCVD による V 溝 GaAs 量子細線の高純度化、均一性の向上および低次元エキシトンの解析

流量変調法、基板再エッチング、有機砒素によるステップバンチングの抑制などにより、当初の $0.1\ \mu\text{m}$ から $2\ \mu\text{m}$ 程度にまで単一量子レベルとして拡張したエキシトン状態を実現した。コヒーレント体積と発光ライフタイム、エキシトンの偏光状態によるエネルギー分裂とスピン状態の検証、エキシトンの相互反発、拡張された 1次元エキシトンの発光半値幅の拡大と多体効果などを走査型顕微 PL、顕微磁気 PL、近接場顕微鏡を開発して検証した。これら 1次元エキシトンの挙動は、本プロジェクトによる高純度量子細線と高度な評価技術が結びついて初めて明らかになってきたものである。更に、量子細線超格子における形状揺らぎや内部電界の効果、不規則量子細線超格子の光学特性についても研究を進めた。

2. MBEによるInP基板上のInGaAs量子細線の形成および低次元電子伝導の解析

クラッキングセルにより発生させた原子状水素やダイマー砒素(As₂)ソースを用いて幅20nm、厚さ10nmの世界最小のInGaAs量子細線を形成した。大きなサブバンド間エネルギーに対応して、量子コンダクタンスが30K付近まで検出された。また、AB効果とユニバーサルコンダクタンス揺らぎによる磁気振動効果を検出し、量子細線中の電子のコヒーレンスが比較的高温(～10K)まで保たれていることを見出した。この現象を温度計に利用して、散乱機構の解析を行うなど、化合物半導体量子細線の散乱機構の解明に貢献している。

3. 量子細線FETの開発

マクロレベルで量子準位が拡張したV溝GaAs量子細線や、高次元指数InP基板上に作製したInGaAs量子細線FETにおいて、明瞭な量子コンダクタンスステップや、極めて低い加速電圧(～0.2V)において量子細線からサイドの量子井戸への実空間遷移による負性抵抗が発生することを見いだした。また、光検出器としても、感度が高いことが判明した。高周波発振器および高周波光ディテクタとしての応用が期待できる。

4. ファブリーペロー型およびDFB型量子細線レーザの開発

ファブリーペロー型レーザにおいては、単一サブバンドのみからの室温発振が可能であることを明らかにした。また、状態密度の急峻化により、発振閾値の温度依存性が非常に小さいことを見出した。更に、基板上のグレーティングの形状を厚さ1μm以上にわたって保存して、その保存されたグレーティング上に量子細線を形成する形状保存成長を開発し、一回の結晶成長により、利得結合型の量子細線DFBレーザを試作することに成功した。更に、両端を指定の長さに終端した閉有限長量子細線アレイを作製し、3次元的なキャリア閉じこめ構造を実現した。再成長による界面劣化がないので、バンドギャップの大きなAlGaAsクラッド層に用いることができ、温度特性、波長選択性の高い通信波長帯の半導体素子や変調器の設計が可能になる。

5. フェムト秒ポンププローブや相互相関技術による光導波路の解析

量子細線や量子井戸をコア層に持つ光導波路におけるフェムト秒光パルスの線形・非線形応答を波長0.8μmのプローブ光と、波長1.5μmのゲート光を用いた2波長相互相関信号(周波数分解光ゲーティング、XFROG)を用いて計測した。光パルス伝搬波形を100fs程度の時間分解能にて可視化するとともに、光波の位相と振幅を復元し、光導波路の波長分散特性を得るなど、超高速光デバイスを設計するために不可欠な情報を得ることができた。また、ダブルパルス光により高次元サブバンドレベルを励起し、基底レベル発光強度の振動をダブルパルスの位相に対して計測することにより、エキシトンの位相緩和時間を計測した。

6. 量子効果デバイスの数値解析

6-1. 量子モンテカルロ法による量子輸送問題の数値解析

(明治大学 富澤一隆教授)

通常のモンテカルロシミュレーションでは、電子をボルツマン輸送方程式に従う座標および波数空間上の粒子とみなしてきたが、現実的な量子効果デバイスを設計する場合、電子を波として扱う必要がある一方で、散乱の効果を取り入れる必要がある。そこで、電子の輸送をシュレディンガー方程式に従うように改めた、量子モンテカルロシミュレーションを開発し、1次元ダブルバリアダイオードにおける負性抵抗効果を再現した。

6-2. ナノ構造光導波路の数値解析

(北海道大学 小柴正則教授、辻寧英助教授)

分布帰還型 (DFB) 量子細線レーザの導波モードを左右においては周期境界条件とし上下においては無反射境界条件を付した有限要素法により解析し、ブラッグ波長においてただひとつの利得ピークを持つ利得結合型モードが形成されることを明らかにした。

6-3. 形状基板上的化合物半導体選択成長の数値解析

(鳥取大学 石井晃助教授)

V溝および4面体状に加工された GaAs 形状基板上的選択成長をモンテカルロシミュレーションにより解析した。結晶面方位やステップ密度依存性は、表面拡散中の原子と結晶表面を構成するそれぞれの原子との結合エネルギーにより表現され、実験的に知られていた [011] と [01-1] などストライプ方向によるモホロジの違いなどが再現された。

2. 研究構想

2-1 提案時の研究構想

量子細線、量子ドット等に特有な量子現象を発現させるためには、それらの構造での1原子層程度のサイズゆらぎが許容できない。そこで (1) MOCVD 成長において3族と5族を交互に成長する流量変調法を用いて1原子層ごとの自己停止効果を利用したり、(2) MBE 成長において原子状水素や砒素クラッキングソースを用いて表面拡散速度を制御することにより形状基板上に原子層オーダーで均一な量子ナノ構造を作成する。また、これらの量子ナノ構造における、光学特性や伝導特性を精密に評価するとともに、量子細線における散乱の抑制や状態密度の急峻性を利用した高性能量子細線 FET や量子細線レーザなどを開発する。更に、数値シミュレーションとの定量的な比較を行うことにより、電子準位間や電子-フォトン間のコヒーレントな相互作用に基づく新奇な量子現象を探索し、それらの原理を利用したコヒーレント量子デバイスを開拓する。

2-2 具体的な研究の推移

従来の量子細線は、不純物の存在やヘテロ界面の不均一性により、溝やリッジ上に不均一に分離された量子ドットの連続体と表現した方がむしろ現実に即していた。そこで、初年度から3年度にかけて、高純度量子細線を作製するための新規 MOCVD や蛍光寿命計測装置を導入し、量子細線の均一性や連続性の向上と基本的な物性評価に取り組んだ。また次年度から最終年度にいたるまで、量子細線 FET や量子細線レーザの試作と評価を継続し、作製された量子細線の光・電子デバイスとしての有効性の検証と低次元輸送問題や低次元エキシトン発光など基本的な物性の検証を行った。更に、第3年度以降を中心に、顕微磁気フォトルミネセンス、極低温における磁気抵抗、XFROG、電気光学サンプリング、位相ロックポンピングなど面分解能や時間分解能を追求したより難易度の高い評価手法を開発した。

2-3 新展開から生まれた目標

1. 低次元伝導量子細線 FET

量子細線の均一性を向上した結果、単一の量子準位が $2 \sim 3 \mu\text{m}$ という電子デバイスの本質的な部分と同程度のサイズまで拡張した状況を実現することができた。このような系における電子の伝播は、電子波束の有効質量に応じた加速とフォノンの放出過程とも、FET 構造では、ゲート電極により分割されたソース、ドレイン領域間の量子力学的な状態遷移とドレイン領域での緩和過程とも解釈することができる。また、量子細線 FET の負性抵抗は、互いに隣接した量子細線と量子井戸間の実空間遷移とも結合した量子細線と量子井戸により形成されるサブバンド遷移とも解釈することができ、従来のドリフト、拡散に基づく古典的デバイスから状態遷移に基づく量子効果デバイスへの過渡の様相を示している。本プロジェクトで作製した量子細線は、ヘテロ界面により、 $10\text{nm} \sim 20\text{nm}$ の狭い断面に電子を閉じこめており、広いサブバンド間隔を持つ結果、数十 K という比較的高い温度においても、量子コンダクタンスステップが観測できている。但し現状の量子細線 FET のコンダクタンスステップは、 $\text{xxx} \mu\text{S}$ と理論値 ($77 \mu\text{S}$) の数%と低く、量子細線の末端をなめらかに広げるなどして中間遷移層として量子井戸を利用したり、オーミックコンタクトとの接続を改善する必要がある。更に、電子の走行速度や、ゲート電圧に対して、ソースからドレイン領域への電子の応答速度を計測することにより、理想的な電子デバイスの性能限界を予測する必要がある。

2. 量子細線レーザ

低次元構造を利得媒質に用いることにより、状態密度が急峻になり、利得が特定のエネルギーに集中する結果、レーザ発振の低閾値化につながることは、古くから予測されていたが、実際の材料では、この効果が構造の形状揺らぎにより、現れにくい事情があった。本プロジェクトにおいて、形状の均一性が向上した結果、室温付近において量子井戸より

も発光半値幅が狭い量子細線が形成され、現実の利得媒質として、低次元構造の優位性が示された。低次元構造においては、電子、正孔が同一箇所閉じこめられる結果、エキシトンの束縛エネルギーが増大し、室温付近においてもエキシトン発光が認められる。但し、エキシトン状態や、低次元状態で増強された多体効果が、利得や、非線形効果の増強に有効かどうかは、議論の余地がある。均一性を向上した AlGaAs/GaAs 系量子細線においては、エキシトン発光が残存する励起強度でレーザ発振している兆候はないが、閉じこめ効果を増強した AlGaAs/InGaAs 系などでエキシトンがレーザ発振に寄与する可能性は高いので今後も研究を継続する必要がある。

量子細線は、量子ドットに比べて偏光選択性が高い、活性層体積が大きい、位置制御が容易であるなどの利点がある。本プロジェクトでは、それらの特質を活かすために、利得結合分布帰還型の量子細線レーザを開発し、一回のグレーティング基板上の選択成長による高密度量子細線の形成や活性層としての量子細線の光学特性を評価した。光学材料としては、純粋な量子細線や量子ドットよりもそれらの中間的な状態の方が有利である。すなわち、無限長の量子細線の場合は、キャリアやエキシトンの拡散が速く、活性領域に反転分布を形成することが困難となる。一方等方的な量子ドットの場合は、キャリアなどの拡散は有効に抑制されるものの、位置や形状の制御が困難である。そこで、本プロジェクトでは、1方向に量子ドットを拡張した有限長量子細線アレイを作成した。この構造では、量子ドットの特質である埋め込み構造が形成されるとともに、偏光制御、波長制御、均一性など量子細線の特徴が引き継がれている。今後は、光通信に対応する長波長系の量子細線の開発が重要であると考えている。本プロジェクトによる選択成長技術を用いることにより、アルミニウムを含む材料をクラッド層に使用することが容易になり、活性層との閉じこめを強くすることができ、温度特性などを改善することができる。発光波長に対して透明な InP 基板を用いることにより、GaAs 基板を使用した場合のようにグレーティング形状を $1\ \mu\text{m}$ に渡って保持する必要がなくなり製造がさらに容易になる。また、強い閉じこめ構造によりエキシトン状態が室温付近まで保たれる利点や拡張された量子状態による巨大双極子モーメントを利用した光ディテクタや変調器などの応用が期待できる。

2-4 研究体制

本プロジェクトを推進するために必要な構成要素として、1. MOCVD および MBE による高品質量子細線の結晶成長、2. 量子細線の光学的、電子的評価、3. 量子細線 FET や量子細線レーザなどの量子デバイス、および4. 光や電子波の伝播シミュレーションや結晶成長シミュレーションを掲げ、それらを有機的に結ぶことにより、化合物系量子細線の形成、評価、デバイス応用など、広範な可能性を追求した。研究代表が所属する産業技術総合研究所において、量子ナノ構造の結晶成長、評価、およびデバイス製作を一体的に行った。図 2.4. 1 に示すように、1. MOCVD 結晶成長と基礎的な評価に関しては、王学論、劉興権、韓哲九 2. MBE 結晶成長に関しては、菅谷武芳、張起連、篠田明人、田沼

保彦、松本和幸 3. 量子細線の光学的、電子的評価に関しては、永宗靖、時崎高志、王学論、劉興権、菅谷武芳 4. フェムト秒計測技術に関しては、小森和宏、岡田工、諸橋功、鶴町徳昭、渡辺直樹、板谷太郎、彦坂憲宣 5. 量子細線 FET の開発に関しては、韓哲九、張起連、金成珍、高橋俊充 6. 量子細線レーザの開発に関しては、金泰根、孫昌植、高須賀庸行、小倉睦郎 が担当した。

これに並行して、量子輸送問題、周期境界条件における電磁波の導波モード、電子との相互作用等の個別に重要な問題に関して、明治大学 富沢一隆教授および北海道大学 小柴正則教授、辻寧英助教授の協力を得た。また、平成 13 年度から結晶成長のシミュレーションに関して、鳥取大学 石井晃教授との研究協力を開始している。更に、主に物性計測や、理論的などの検討を行う研究協力機関として、フランス固体物理学研究所のグロウソン博士、ポリオティス教授 (Dr. R.Grousson, Prof. V.Voliotis, Group de Physique des Solides, CNRS, France), スイス連邦工科大学物理学科のデボー教授 (Prof. B. Deveaud, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Switzerland), アリゾナ州立大学電子工学科のフェリー教授およびバード教授 (Prof. D.K.Ferry, Prof. J.P.Bird, Arizona state university, USA), 東京大学先端技術研究所の榊裕之教授、大阪電気通信大学の佐々木昭夫教授との研究協力を推進した。

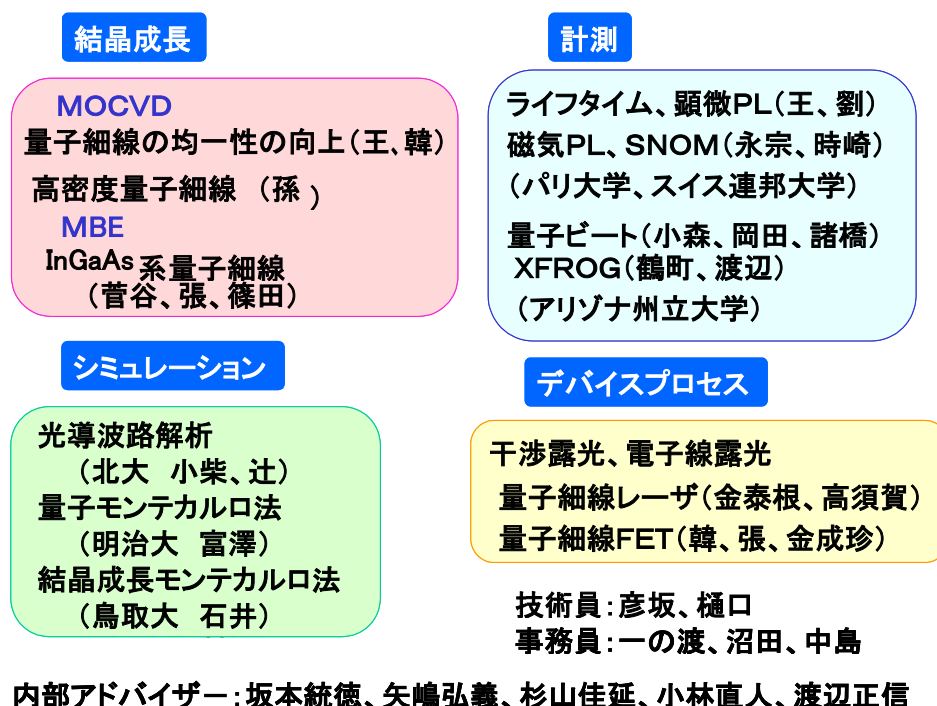


図 2-4-1 プロジェクトを構成する技術テーマと研究チーム構成

研究目的

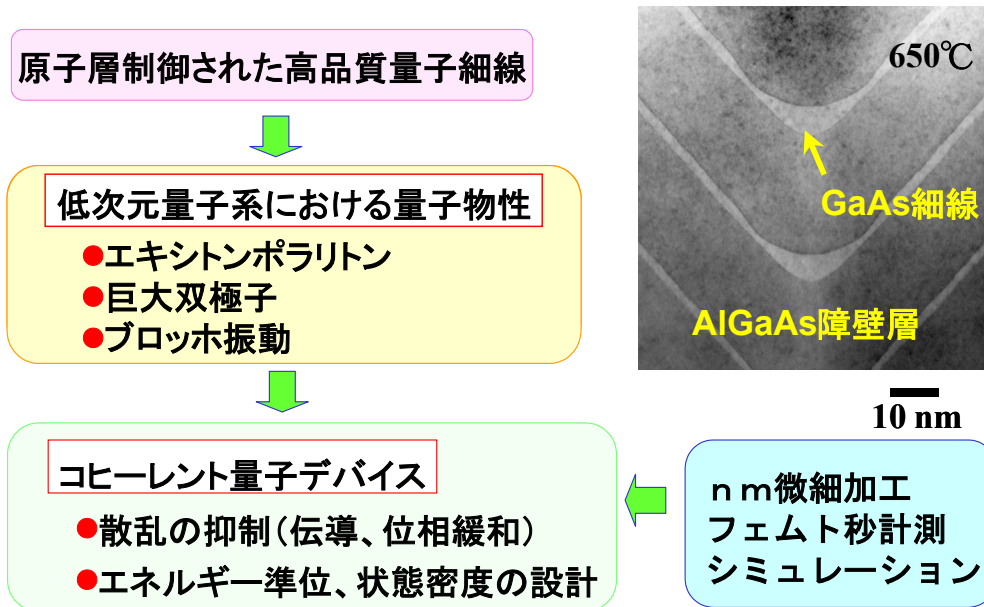
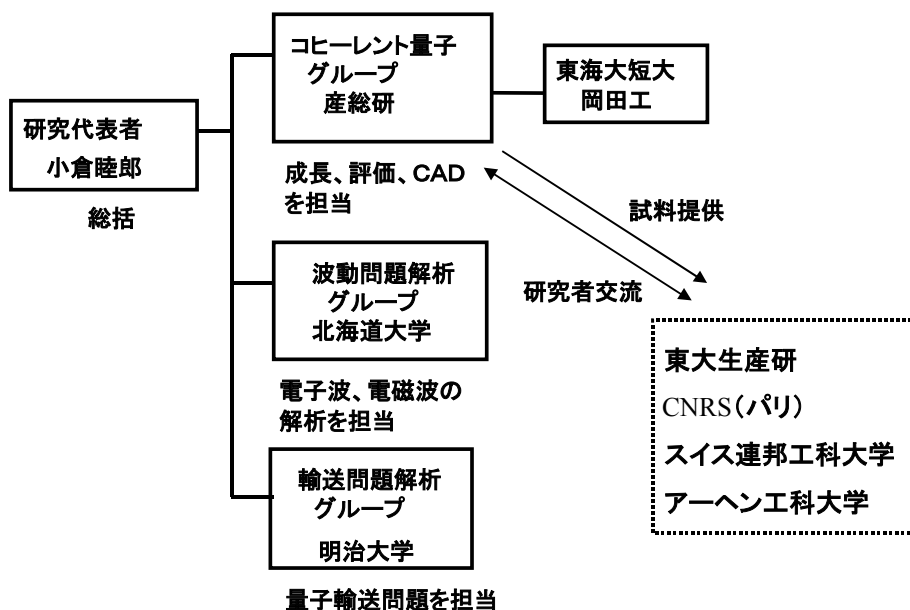


図 2-4-4 プロジェクトの起点とその目的

3. 研究実施体制

(1) 体制



4. 研究期間中の主な活動

(1) 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
平成 11 年 11 月 4 日	内部発表会	電子技術総合研究所 視覚室	30 名	川路統括をお迎えして研究実施グループの研究成果および研究方針を議論した。
平成 13 年 7 月 2 日～ 7 月 4 日	第 1 回形状基板上の量子ナノ構造およびナノエレクトロニクスに関する国際ワークショップ The First International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics' 01 (QNN'01) 新世代研究所 ナノエレクトロニクス研究委員会 (松本和彦委員長) と共催	産業技術総合研究所 つくば共用講堂	199 名 講演数 65 件 (内口頭発表 32 件、ポスタ講演 33 件)	形状基板上、高次面方位基板および劈開面上に形成された、化合物系量子細線、量子ドットの結晶成長、電子および光学的物性。量子ナノデバイス、走査型プローブ顕微鏡関連技術についての国際会議。 量子ナノ構造の結晶成長と、走査型プローブ顕微鏡において、内外の優れた研究が発表されるとともに、当戦略プロジェクトの成果もまじえて活発で示唆に富む討論がなされ、将来、ナノエレクトロニクスにおける新たな展開に貢献する成果が得られた。
平成 14 年 9 月 9 日～ 9 月 11 日	第 2 回形状基板上の量子ナノ構造およびナノエレクトロニクスに関する国際ワークショップ The Second International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics' 02 (QNN'02) 新世代研究所 ナノエレクトロニクス研究委員会 (松本和彦委員長) と共催	産業技術総合研究所 つくば共用講堂	193 名 講演数 72 件 (内口頭発表講演 32 件、ポスタ講演者 40 件)	半導体ナノ構造の形成と量子効果、及び電子・光デバイス、カーボンナノチューブ、走査型プローブ技術、スピエレレクトロニクスなど、情報処理を念頭においた量子ナノデバイスおよびその基礎となる物理、材料、評価技術など、ナノテク ノロジ分野の融合的、学際的な交流を図るための国際会議。 プロジェクト協力機関を中心に量子細線の基礎物性およびデバイス応用に関して集中した議論を行うとともに、走査プローブやカーボンナノチューブなどナノエレクトロニクスの新たな展開を紹介した。

5. 主な研究成果

(1) 論文発表 (国内 1 件、海外 35 件)

1. X-L Wang, M.Ogura H.Matsuhata, “Self-limiting effects of flow rate modulation epitaxy of GaAs on patterned substrate”, J.Crystal Growth 195 (1998) 586-590.
2. X-L Wang, M. Ogura H. Matsuhata, “Absence of ground state PLE peak in crescent-shaped AlGaAs/GaAs quantum wire superlattices”, Materials Science and Engineering B51 (1998) 233-237.
3. T.G. Kim, X.L. Wang, K. Komori, K. Hikosaka, and M. Ogura, “AlGaAs/GaAs Quantum Wire Lasers Fabricated by Flow Rate Modulation Epitaxy” Electron. Lett. 35 (1999) 639-640.
4. M. Ougura, Tae Geun Kim, X.L. Wang, K. Komori, K. Hikosaka, M. Shimizu, and Y. Suzuki, “流量変調方による量子細線レーザーの基底レベル発振” 信学技法 Technical report of ieice OPR99-43, LQE99-37, (1999)
5. X.L. Wang, M. Ogura, “Optical Characterization of the Self-limiting Effect in Flow Rate Modulation Epitaxy of V-shaped GaAs Quantum Wire” Appl. Phys. Lett. 75 (1999) 4148-4150.
6. T. Sugaya, T. Takahashi, T. Nakagawa, M. Ogura, Y. Sugiyama, “Quasi-quantum-wire-field-effect transistor fabricated by composition-controlled selective growth in molecular beam epitaxy”, Journal of Crystal Growth 201/202 (1999) 833-836.
7. T.G. Kim, X.L. Wang, and M. Ogura, “First Room Temperature Lasing from the Fundamental State (1e-1hh) of V-grooved Quantum Wire Lasers” Physica E 7 (2000) 508-512.
8. T.G. Kim, M. Ogura, “High characteristic temperature ($T_0=322\text{K}$ near room temperature) of V-grooved AlGaAs-GaAs quantum wire diode lasers”, Solid State Electronics 44 (2000) 185-187.
9. X.L. Wang, V. Voliotis, R. Grousson, and M. Ogura, “Improved Heterointerface Quality of V-shaped AlGaAs/GaAs Quantum Wires Characterized by Atomic Force Microscopy and Micro-photoluminescence” J. Cryst. Growth 213 (2000) 19-26.
10. I. Morohashi, K. Komori, T. Hidaka, T. Sugaya, X.L. Wang, M. Ogura, and T. Nakagawa,

- “Terahertz Electromagnetic Wave Generation from Quantum Nanostructure” *J. J. Appl. Phys.* Vol.40 Part1, No.4B 3012-3017.
11. A. Crottini, J.L. Staehli, B. Deveaud, X.L. Wang, and M. Ogura, “Probing Excitonic Nonlinearities in Quantum Wires” *Physica Status Solidi* 221 (2000) 277-280.
 12. T.G. Kim, X.L. Wang, Y. Suzuki, K. Komori, R. Kaji, M. Shimizu, K. Hikosaka, and M. Ogura, “Characteristics of the Ground State Lasing Operation in V-grooved Quantum Wire Lasers” *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* 6 (2000) 511-521.
 13. X.Q. Liu, A. Sasaki, N. Ohno, X.L. Wang, and M. Ogura, “Temperature Dependent Carrier Trapping Process in Short-period Quantum Wire Superlattices Grown by Flow Rate Modulation Epitaxy” *Appl. Phys. Lett.* 77 (2000) 1481-1483.
 14. S.J. Kim, T. Sugaya, M. Ogura, and Y. Sugiyama, “Gate-Length Dependence of Negative Differential Resistance in InGaAs/InAlAs Quantum Well Field-Effect Transistor” *Jpn. J. Appl. Phys.* 39 (2000) 6152-6156.
 15. X.L. Wang and M. Ogura, “Flow Rate Modulation Epitaxy of High-quality V-shaped AlGaAs/GaAs Quantum Wires Using Tertiarybutylarsine as the Arsenic Source” *J. Cryst. Growth* 221 (2000) 556-560.
 16. C. S. Son, T. G. Kim, X.L. Wang, and M. Ogura, “Constant Growth of V-groove AlGaAs/GaAs Multilayers on Submicron Gratings for Complex Optical Devices” *J. Cryst. Growth* 221 (2000) 201-207.
 17. T. Sugaya, M. Ogura, Y. Sugiyama, K. Matsumoto, K. Yonei and T. Sekiguchi, “Trench-type narrow InGaAs quantum wires fabricated on a (311)A InP substrate” *Applied Physics Letters* Vol.78, No.1 (2001) 76-78.
 18. J. Bellessa, V. Voliotis, D. Roditchev, R. Grousson, X.L. Wang, M. Ogura, “Carrier Scattering by Auger Mechanism in a Single Quantum Wire” *the European Physical Journal B* vol.21 (2001) 499.
 19. Andrea Crottini, Jean-Louis Staehli, Benoit Deveaud, Xue-Lun Wang, Mutsuo Ogura, “Near-field Imaging of 1D Exciton Delocalised over Mesoscopic Distances” *Phys. Rev. B*

vol.63 (2001) 121313.

20. T. Guillet, V. Voliotis, R. Grousseau, R. Ferreira, X.L. Wang, and M. Ogura, "Exchange-induced Splitting of Radiative Exciton Levels in a Single Quantum Wire" *Physica E* **9** (2001) 686-693.
21. T. Sugaya, M. Ogura, Y. Sugiyama, K. Matsumoto, and K-Y Jang, "Observation of negative differential resistance of a trench-type narrow InGaAs quantum-wire field-effect transistor on a (311)A InP substrate" *Applied Physics Letters* Vol.78 No.16 (2001) 2369-2371.
22. T.G. Kim, C.S. Son and M. Ogura, "Fabrication of AlGaAs-GaAs Quantum-Wire Gain-Coupled DFB Lasers by a Single MOCVD Growth Step" *IEEE Photonics Technology Letters* Vol.13, No.5 (2001) 409-411.
23. K-Y. Jang, T. Sugaya, K. Matsumoto, T. Shimizu, M. Ogura, and Y. Sugiyama, "Negative Differential Resistance in Trench-Type Narrow InGaAs Quantum Wire" 2001 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings 13th IPRM (2001).
24. S-J. Kim, T. Sugaya, M. Ogura, and Y. Sugiyama, "Gate-length dependence of negative differential resistance in ridge-type InGaAs/InAlAs quantum wire field-effect transistor" *Solid-State Electronics* **45** (2001) 1099-1105.
25. T. Sugaya, M. Ogura, Y. Sugiyama, T. Shimizu, K. Yonei, K-Y. Jang, J.P. Bird, and D.K.Ferry, "Quasi-one-dimensional transport characteristics of ridge-type InGaAs quantum-wire field-effect transistors" *Applied Physics Letters* Vol.79, No.3 (2001) 371-373.
26. A. Crottini, J.L. Staehli, B. Deveaud, X.L. Wang, and M. Ogura, "One-dimensional biexcitons in a single quantum wire" *Solid State Communications* **121** (2002) 401-405.
27. X-Q Liu, X-L Wang, and M. Ogura, "Reduction of nonradiative recombination centers in V-grooved AlGaAs/GaAs quantum wires grown using tertiarybutylarsine" *Applied Physics Letters* Vol.79 No.11 (2001) 1622-1624.
28. X.Q. Liu, A. Sasaki, N. Ohno, X.L. Wang, and M. Ogura, "High thermal stability of photoluminescence in a disordered quantum wire superlattice" *Journal of Appl. Phys.* vol. **90** No.12 (2001) 6363-6366.

29. T. Sugaya, J.P. Bird, M. Ogura, Y. Sugiyama, D.K. Ferry, and K.-Y. Jang, “Quantum-interference characteristics of a 25 nm trench-type InGaAs/InAlAs quantum-wire field-effect transistor” *Applied Physics Letters* Vol.80 No.3 (2002) 434-436.

30. X-Q. Liu, X-L. Wang, M. Ogura, T. Guillet, V. Voliotis, and R. Grousion, “Modification of optical properties by strain-induced piezoelectric effects in ultrahigh-quality V-groove AlGaAs/GaAs single quantum wire” *Applied Physics Letters* Vol.80, No.11, (2002) 1894-1896.

31. A. Crottini, R.I. Kaitouni, J.L. Staehli, B. Deveaud, X.L. Wang, and M. Ogura, “Level Repulsion of Localised Excitons Observed in Near-Field Photoluminescence Spectra” *physica status solidi (a)* Vol.190, Issue 3, (2002) 631-635.

32. N. Tsurumachi, C-S.Son, T-G. Kim, Y. Takasuka, and M. Ogura, “Photoluminescence and Photoluminescence Excitation Spectra of Strained High-Density InGaAs/Al_xGa_{1-x}As Quantum Wire Structures on Submicron Grating” *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol.41 (2002) 2679-2682.

33. X-L Wang, X-Q Liu, M. Ogura, T. Guillet, V. Voliotis, and R. Grousion, “Electronic states and optical properties of V-shaped AlGaAs/GaAs quantum wire superlattices” *Physical Review B* 66, (2002) 035319.

34. I. Morohashi, K. Komori, X-L Wang, T. Hidaka, M. Ogura and M. Watanabe, “Excitation Wavelength Dependence of Terahertz Electromagnetic Wave Generation from Quantum Wire” *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol.41 Part 1 No.4B, (Apr. 2002) pp.2710-2713.

35. N. Tsurumachi, C.S. Son, T.G. Kim, M. Ogura, “High-density V-groove InGaAs/AlGaAs quantum wires on submicron gratings by constant growth technique” *J. Cryst. Growth*, Vol.237-239 (Apr.2002) 1486-1490.

36. Cheol-Koo Hahn, T. Sugaya, Kee-Youn Jang, Xue-Lun Wang, and M. Ogura, “Electron Transport Properties in a GaAs/AlGaAs Quantum Wire Grown on V-Grooved GaAs Substrate by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy”, to appear *Jpn. J. of Appl. Phys.*

(2) 特許出願（国内 3 件、内海外出願中 2 件）

①国内

- (1) 発明者：小倉睦郎 金泰根 孫昌植
発明の名称：量子細線または量子井戸層の形成方法、及び該形成方法により形成された量子細線または量子井戸層を用いた分布帰還半導体レーザ
出願番号：特願 2000-404645
出願日：平成 12 年 12 月 27 日
- (2) 発明者：菅谷武彦 松本和幸 張 起連 杉山佳延 小倉睦郎
発明の名称：負性抵抗電界効果素子
出願番号：特願 2001-94464
出願日：平成 13 年 3 月 29 日
(PCT 出願中)
- (3) 発明者：小倉睦、
発明の名称 量子ナノ構造半導体レーザ、及び量子ナノ構造アレイ
出願番号：特願 2002-51548
出願日 平成 14 年 2 月 27 日
(PCT 出願中)