

「量子効果等の物理現象」
平成9年度採択研究代表者

小倉 睦郎

(産業技術総合研究所光技術研究部門 主任研究官)

「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

本プロジェクトの目的は、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にある。流量変調法を用いたMOCVDや、原子状水素添加MBE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系量子細線を起点として、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ている。また、MBE により、自然超格子に $20 \times 10 \text{nm}$ (世界最小)の InGaAs/InAlAs 量子細線量子細線を形成し、顕著な負性抵抗効果や比較的高温 (10K) における AB 効果を見出している。更に、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ている。本プロジェクトでは、量子細線 FET、量子細線レーザあるいはフォトニクススイッチなどのデバイス構造における電子やエキシトンの物性を解明することにより、細線中において電子の散乱が抑制されているかどうか、低次元ナノ構造が光デバイスにどのように有効かを明らかにする。

2. 研究実施内容(研究目的、方法、結論などを記述)

2-1. 量子細線の高純度化、均一性の向上およびその評価

従来の量子細線は、細線に沿った原子層ステップやランダムな不純物によるポテンシャル分布のために、量子力学的にはほとんど等方的なドットの集合であった。本プロジェクトでは、GaAs 基板上にストライプパターンを形成した後、再エッチングを施し、有機砒素(TBAs)を用いた流量変調法を適用することにより $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度単一量子レベルとして一次元方向に拡張したエキシトン状態を初めて実現した。図1は、対物レンズをピエゾ素子により細線方向に掃引して得られた、過去および現在の AlGaAs/GaAs 系量子細線の走査型顕微分光像を示す。提案当時の量子細線においては、左上の像のように短い輝線が多数のスペクトラ領域に渡って存在する。これは、 $1 \mu\text{m}$ の励起スポットに多数の量子ドットが存在し、左下の顕微 PL スペクトラムに示すように、多数の鋭いピークが同時に検出されるためである。一方、現在の量子細線においては、右下の顕微 PL スペクトラムに示すように、ほとんど一本の発光スポットのみが検出される領域が存在し、右上の走査型顕微分光像においては、長さ $2 \sim 3 \mu\text{m}$ に渡って単一のスペクトラムが拡張している。すなわち、原子層レベ

ルで均一な量子細線がマクロスコピックな範囲まで拡張しており、低次元エキシトンの物性や、単一量子準位をソース、ゲート、ドレイン電極により分割した量子遷移型のFETへの展開が期待できる。

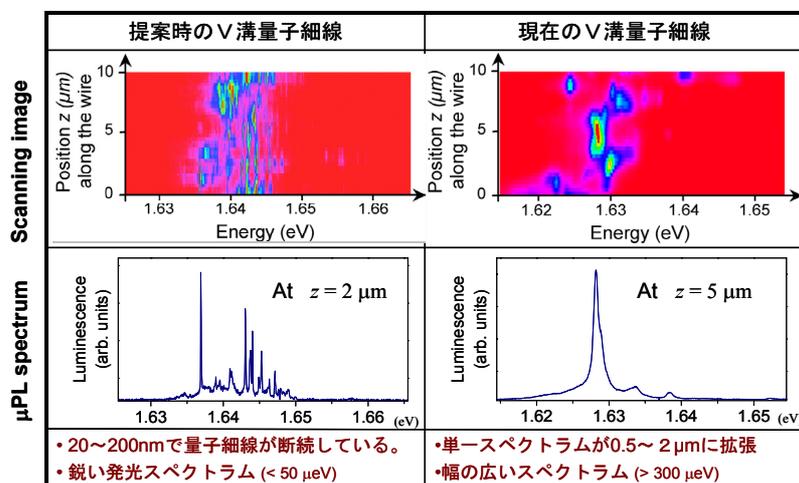


図1 走査型顕微分光による均一性の評価。走査型顕微分光像においては、横軸がスペクトラム、縦軸が細線に沿った座標を示す。均一性が向上した現在の量子細線では、単一のスペクトラムが細線方向に2~3 μ m拡張している。

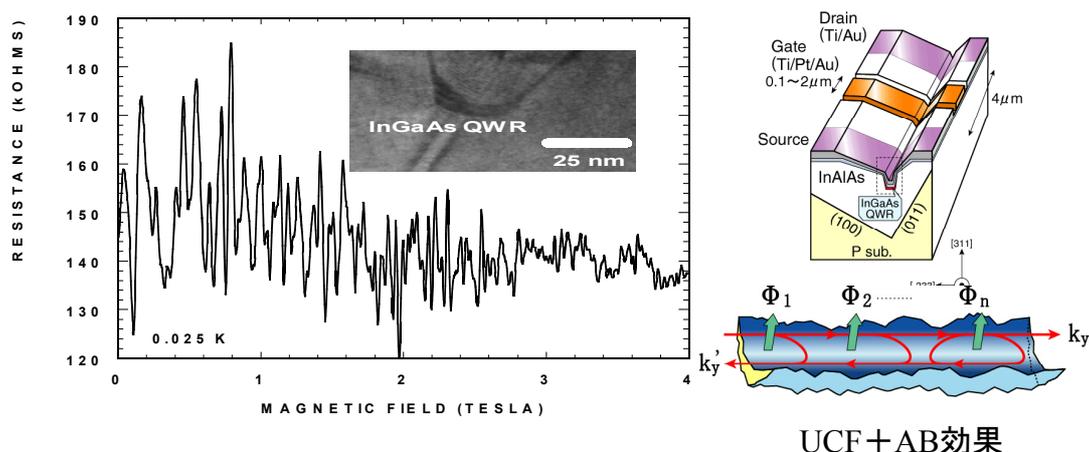
2-2. 高密度量子細線の形成と評価、光素子への応用

光機能デバイスにおいては、占有体積の小さい量子ナノ構造と光との相互作用をいかにして増強させるかが重要であるが、まず、均質な量子細線を高密度に集積することが前提となる。今年度は、量子細線にInを添加することにより寄生量子井戸の影響の少ない高密度量子細線を形成した。また、電子線露光法を用いることにより幅数 μ mのV溝アレイを作製し、再成長を行うことによりそれぞれの細線の長さが有限の量子細線グレーティングを形成した。この構造は、量子細線の両端でのキャリアの散逸が防止されるため、量子細線の体積効果もあいまって、極めて低い閾値を持つ分布帰還型半導体レーザの実現が期待される。

2-3. 量子細線FETの試作および評価

均一性を向上させたGaAs量子細線を用いてFETを作製し、35Kと比較的高温においても顕著な負性抵抗効果や量子コンダクタンス効果を得た。

また、原子状水素源とクラックAs₂ソースを装備したMBE成長炉を用いて作成した(311)InP基板上のトレンチ型InGaAs/AlInAs系量子細線において、磁気抵抗を測定したところ、AB効果とユニバーサルコンダクタンス揺らぎ(UCF)に基づく磁気抵抗振動を見いだした(図2)。この磁気抵抗振動は、断面積の小さな量子細線において顕著であることから、1次元電子の散乱が抑制される効果の存在を示している。



UCF+AB効果

図2 InGaAs/AlGaAs 量子細線FETの磁気抵抗振動。電子の進行波と散乱後の後退波で磁場の及ぼす力が逆向きになるため、AB効果による磁気抵抗の振動が発生する。この振動は、9Kまで検出され、その振幅から電子温度や散乱効果を見積もることができる。

2-4. フェムト秒ポンププローブ技術

量子ナノ構造における非線形光学効果を用いた光機能素子を念頭にエキシトンの位相緩和時間の評価やアップコンバージョンを利用したフェムト秒秒ポンププローブ技術を開発し、100 フェムト秒の時間分解能で量子細線光導波路の光パルス透過スペクトラムを測定した。

3. 研究実施体制

研究代表が所属する経済産業省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行う。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、明治大学富沢教授および北海道大学小柴教授の研究グループの協力を仰ぐ。また、主に物性計測や、理論的な検討を行う研究協力機関として、フランス、パリ大学固体物理学研究所(Group de Physique des Solides, CNRS-Universit), 東京大学先端技術研究所などとの研究協力を引き続き推進する。

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

- A. Crottini, J.L. Staehli, B. Deveaud, X. L. Wang, M. Ogura “Near-field imaging of one-dimensional excitons delocalized over mesoscopic distances” Physical Review B Vol. 63, 121313 (March. 13, 2001)
- T. Guillet, V. Voliotis, R. Grousson, R. Ferreira, X.L. Wang, M. Ogura, “Exchange-induced splitting of radiative exciton levels in a single quantum wire” Physica E 9 p686 – p693 (April 2001)
- K-Y. Jang, T. Sugaya, T. Shimizu, K. Matsumoto, M. Ogura, Y. Sugiyama “Negative Differential Resistance in Trench-Type Narrow InGaAs Quantum Wire” Proc. 13th Int. Conf.

Indium Phosphide and Related Materials pp517-520

- J. Bellessa V. Voliotis, T. Guillet, D. Rodfitchev, R. Grousson X. L. Wang, and M. Ogura “Carrier scattering by Auger mechanism in a single quantum wire” The European Physical Journal B 21(2001) 499
- S-J. Kim, T. Sugaya, M. Ogura, Y. Sugiyama “Gate-length dependence of negative differential resistance in ridge-type InGaAs/InAlAs quantum wire field-effect transistor” Solid-State Electronics Vol. 45, No. 7, pp1099-1105 (July 2001)
- T. Sugaya, M. Ogura, Y. Sugiyama, T. Shimizu, K. Yonei, J.P.Bird, D. K. Ferry “Quasi-one-dimensional transport characteristics of ridge-type InGaAs quantum-wire field-effect transistors” Appl. Phys. Lett. Vol 79, No.3, pp371-373 (July 16. 2001)
- Xing-Quan Liu, Xue-Lun Wang, and Mutsuo Ogura, “Reduction of nonradiative recombination centers in V-grooved AlGaAs/GaAs quantum wires grown using tertiarybutylarsine” Appl. Phys. Lett. Vol.79, No.11, 1622 (Sep. 11, 2001).
- X.Q.Liu, A.Sasaki, and N.Ohno, Xue-Lun Wang and M. Ogura “High thermal stability of photoluminescence in a disordered quantum wire superlattice” J.Appl.Phys. Vol. 90, No.12 p1 (Dec.15,2001)
- T. Sugaya, J.P.Bird, M. Ogura, Y. Sugiyama, D.K.Ferry, K-Y. Jang, “Quantum-Interference Characteristics of a 25-nm Trench-Type InGaAs/InAlAs Quantum-Wire Field-Effect Transistor” Appl. Phys. Lett. Vol. 80, No.3, pp434-436 (Jan. 21. 2002)
- X-Q. Liu, X-L Wang, M.Ogura, T. Guillet, V.Voliotis, R. Grousson, “Modification of optical properties by strain-induced piezoelectric effects in ultrahigh-quality Vgroove AlGaAs/GaAs single quantum wire ” Appl Phys. Lett. Vol.80 No.11 pp1894-1896 (Mar.2002)
- A.Crottini, R.Idrissi Kaitouni, JL.Staehl, B.Devead, X.L.Wang, and M.Ogura, “Level Repulsion of Localized Excitons Observed in Near-Field Photoluminescence Spectra”, phys.stat.sol.(a) 190, No3. 631-635 (2002)
- A.Crottini, J.L.Staehli, B.Deveaud, X.L.Wang, M.Ogura, “One-dimensional biexcitons in a single quantum wire” Solid State Communications 121 pp401-405 (March 2002)

(2) 特許出願

国内1件、外国1件