

ナノ構造顕微分光ラボ

(Nanostructure Microscopic Characterization Lab.)

研究項目：半導体量子ナノ構造の顕微分光評価

研究期間：平成10年年度～12年年度

1. 研究背景

半導体量子細線、量子箱などの低次元量子ナノ構造において、エネルギー準位離散化の結果、従来のバルク結晶、量子井戸にない特異な量子現象が現れることが20年ほど前に理論的に予測されている。これらの量子現象を利用すれば、既存の化合物半導体デバイス性能の飛躍的向上や新規の量子効果デバイスの実現が期待できる。しかし、上記のような高性能デバイスを実現するためには、原子層のオーダーでサイズの揃った量子ナノ構造を十分な密度で作製し、また、作製した量子構造の構造的品質（例えば、量子構造間のサイズのばらつき、ヘテロ界面の均一性など）および発現した量子現象についてきちんと評価することが必要不可欠である。我々は1994年頃からAlGaAs/GaAs系量子細線の作製の研究に取り組んできており、「流量変調法を用いた形状基板への選択成長」という新しい作製技術を開発し、世界で最高品質の量子細線の作製に成功している。量子構造の評価方法として、非破壊性、便利性などの点で優れている光学的手法が広く用いられているが、従来の光学評価法の空間分解能が低く、量子細線、量子箱などの極微細な量子構造の評価に適さない。近年、この問題を解決するため、光の回折限界以下（ $< 1\mu\text{m}$ ）に集光されたレーザー光をプローブ光として用いた空間分解の非常に高い顕微分光評価法が開発された。本研究では、顕微分光評価の分野で高い実績を持つパリ大学のグループと共同で、流量変調法で作製したAlGaAs/GaAs系量子細線の構造的、光学的品質と作製条件との相関関係を明らかにし、デバイス品質の量子ナノ構造を実現することを目的としている。

2. 研究成果および現状

次に、本研究が開始して以来、得られた代表的な成果を紹介する。

1) 量子細線界面均一性の定量的評価¹⁾

まず、流量変調法で作製した量子細線の界面均一性について顕微分光法により定量的に評価した。実験に用いた試料は周期 $4\mu\text{m}$ のV溝型GaAs基板上に成長した厚さ 4.5nm の単一AlGaAs/GaAs量子細線である。顕微分光測定は、安定性を重視してパリ大学が独自に開発した低振動型He冷凍機を用い、 10K で行った。レーザーのスポット径は約 $1\mu\text{m}$ 。図1に1本の量子細線を励起したときに得られた代表的な発光スペクトルを示す。この図から、細線の顕微発光スペクトル（青い点線）は数本から10本程度の鋭い発光線に分離していることが分かる。発光ピークの分離は、量子細線のヘテロ界面において細線の方向に沿って励起子のボア半径より大きな原子ステップ島構造、すなわち細長い量子箱構造、の存在によって説明できる。量子細線のヘテロ界面での原子ステップ島の存在を明らかにしたのは本研究が初めてで、その後ベル研究所、スイス連邦工科大学などのグループが同様の研究に取り組むよ

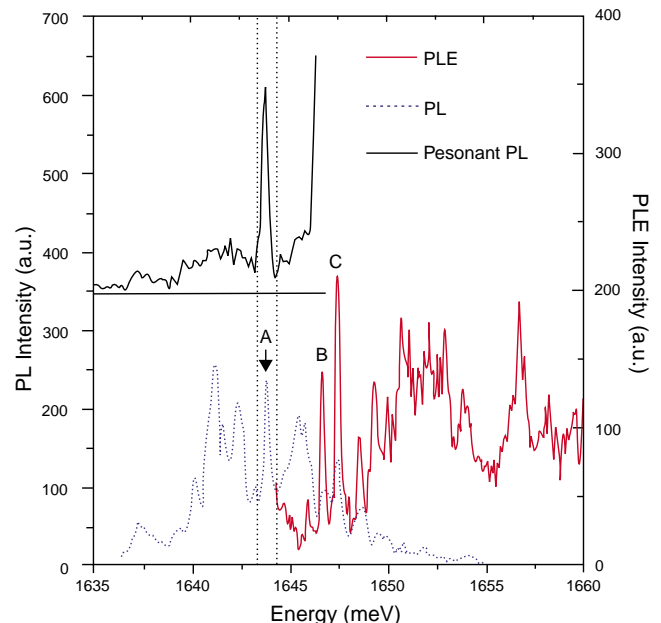


図1 厚さ 4.5nm のAlGaAs/GaAs量子細線の顕微発光（青い点線）、顕微励起発光（赤い実線）および顕微共鳴励起発光（黒い実線）スペクトル

うになった。

さらに、原子ステップ島の長さについて、顕微励起発光測定(PLE)により定量的に評価した。図1の赤いスペクトルはピークAの顕微PLEスペクトルで、量子箱の励起準位によるPLE ピーク(ピークB ,ピークC)がはっきりと観測されている。第一励起準位(ピークB)と基底準位(ピークA)のエネルギー差から、この試料の原子ステップ島の長さは数10-100nm程度であると計算されている。

2) フォノンボトルネック現象の系統の実証²⁾

量子箱構造においては、エネルギー準位離散化の結果、フォノンを介したキャリアのサブバンド間緩和が抑制されるという現象、すなわちフォノンのボトルネック現象が理論的に指摘され、レーザなどの光デバイスへの応用時の問題点として取り上げられている。しかし、実験的には、この現象が存在する結果と存在しない結果が両方報告されており、統一した見解が得られていない。本研究では、我々は量子細線中に自然に形成された量子箱を利用し、フォノンボトルネック現象の系統の検証に初めて成功した。実験方法としては、まず、顕微PLE測定によって量子箱の励起準位のエネルギー位置を求める。次に、励起準位と共鳴するレーザパルスで励起光として用い、基底準位発光の時間分解スペクトルを測定する。時間分解スペクトルの立ち上がり時間から、励起準位から基底準位へのキャリアの緩和時間を求めた。図2に緩和速度の励起準位と

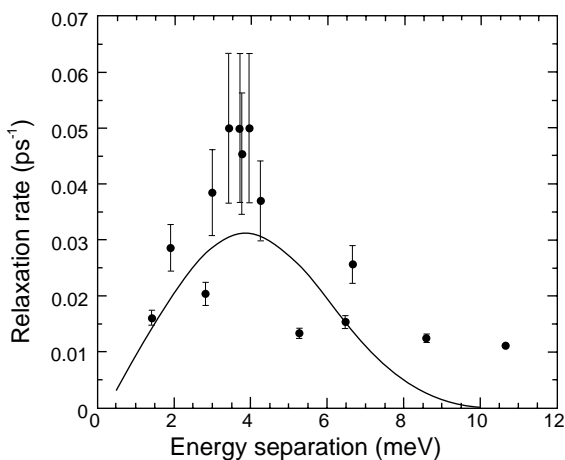


図2 自然形成量子箱(原子ステップ島)のキャリア緩和速度の励起準位、基底準位間エネルギー間隔依存性。実線はLAフォノンを介したキャリア緩和速度の理論計算曲線である。

基底準位のエネルギー間隔依存性を示す。緩和速度はエネルギー間隔がLAフォノンエネルギー(4.3meV)付近で最大値を示し、それ以外のところで緩和が遅くなっていることが分かり、LAフォノンによるボトルネック現象の存在が明らかになった。ただし、LAフォノンエネルギーから外れても、緩和速度はゼロにならず、オージェ効果などによって十分早い緩和を保っていることも判明している³⁾。

3) 界面均一性の改善⁴⁾

以上の説明から、流量変調法で作製した量子細線のヘテロ界面には長さ数10-100nm程度の原子ステップ島が存在することが分かった。しかし、デバイス応用を考える場合、特に電子デバイスおよび量子状態のコヒーレント的な性質を利用する光デバイスの場合、原子ステップ島のできるだけ長い量子細線が望まれる。本研究では、GaAs基板の成長前処理方法の改善により、原子ステップ島を μm オーダーまで伸ばすことに成功した。図3に $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (=1:3:50)でエッチング処理した基板と処理していない基板の原子間力顕微像を示す。 NH_4OH エッチング処理のない場合、V溝パターンの形成過程で発生した細かいラフネスが多数観測されたが、 NH_4OH エッチング処理を施すことによってこのようなラフネスがほとんど消えていることが分かった。図4に NH_4OH エッチング処理の有無による量子細線の顕微発光スペクトルの違いを示す。 NH_4OH エッチング処理のある場合、顕微発光ピークの数も平均的に減っており、図4(b)のベストスペクトルでは一本の強いピークと二本の弱いピークしか観測されていない。発光ピークの数とレーザのスポット径から、原子ステップ島の長さは数100nm-1 μm 程度まで伸び

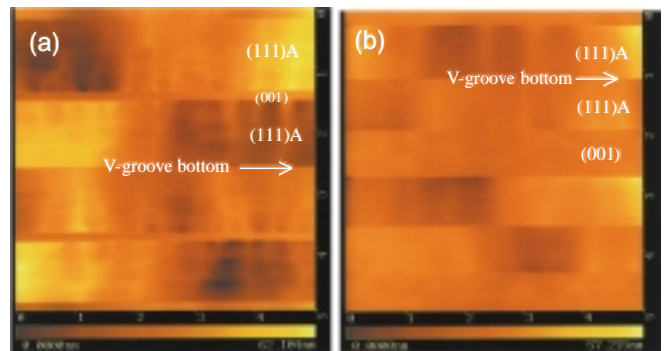


図3 成長前V溝基板の平坦化処理されたAFM像。(a)および(b)はそれぞれ NH_4OH エッチング処理のない場合とある場合のAFM像である。

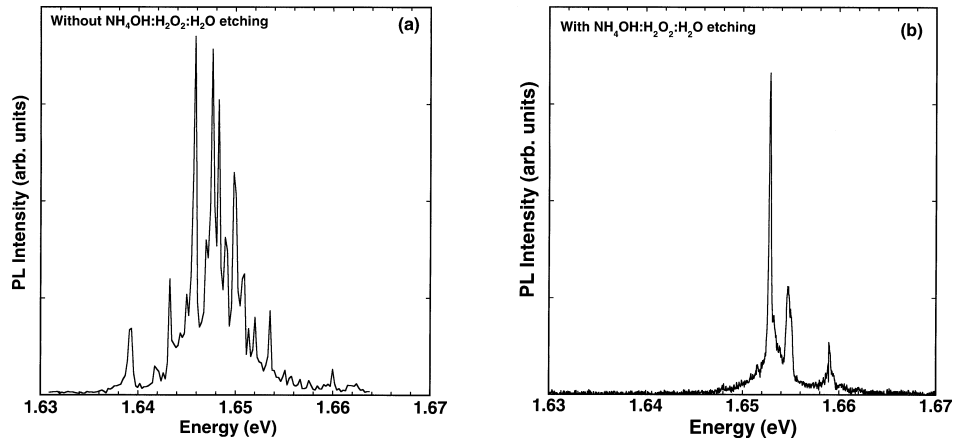


図4 NH₄OHエッチング処理を施した(a)と施していない(b)基板上に成長した厚さ4.5nmのGaAs量子細線の顕微発光スペクトル

ていることが推測される。さらに、最近の近接場光学顕微鏡による評価から、長さ600nmを超える原子ステップ島の存在は画像化によって直接確認されている。

3. 今後の研究展開の方向

これまで、主に単一量子細線の評価を行ってきたが、実際のデバイス応用を考えると、十分な光パワーあるいは駆動電流を得るため、積層した多重量子細線構造を用いる必要がある。今後は、このようなデバイス応用に近い構造の評価へと展開していきたいと考えている。

また、新法人移行後は主に光技術領域を拠点にこれまでの研究を発展させていきたいが、構造作製および量子現象などの基礎的な部分に関してはナノテクノロジー領域と共同研究を行うことも考えられる。

参考文献

- 1) J. Bellessa, V. Voliotis, R. Grousson, X.L. Wang, M. Ogura, and H. Matsuhata : Appl. Phys. Lett.71 (1997) 2481.
- 2) J. Bellessa, V. Voliotis, R. Grousson, X.L. Wang, M. Ogura, and H. Matsuhata : Phys. Rev. B58 (1998) 9933.
- 3) J. Bellessa, V. Voliotis, T. Guillet, D. Rodichev, R. Grousson, X.L. Wang, and M. Ogura : Phys. Rev. (投稿中)
- 4) X.L. Wang, V. Voliotis, R. Grousson, and M. Ogura : J. Cryst. Growth 213 (2000) 19.

当該研究担当者等

1) ラボ構成員(4名)

職員(4名) 王 学論* 小倉睦郎 松畑洋文(電子デバイス部) 小森和弘(光技術部)

2) その他の研究協力者

Roger Grousson, Valia Voliotis(パリ大学)

* ラボリーダー