

コヒーレント量子効果ラボ (Coherent Quantum Effect Lab.)

研究項目：原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子効果
研究期間：平成9年～14年

1. 研究の背景

量子細線、量子箱などの低次元半導体量子ナノ構造においては、状態密度が急峻になる効果や、量子準位のコヒーレントな相互作用が強化されるために、新しい量子デバイスの出現や現在の光・電子デバイス的大幅な性能向上が期待されている。しかし、理論的に予測されている量子ナノ構造の特質を現実の高性能デバイスとして実現するためには、十分な密度の量子ナノ構造を2～3%以内のサイズ揺らぎで製作する必要がある。100Åの量子構造を仮定すると、許容されるサイズ揺らぎは3Å程度、すなわち約1原子層(GaAs(001)面の場合2.83Å)に相当する精度が要求されることになる。このような原子レベルでの制御性は、現在のリソグラフィおよびエッチング技術ではとうてい不可能である。

我々はこれまでにV溝基板上の流量変調エピタキシー法(Flow Rate Modulation Epitaxy : FME)を用いて横方向サイズの小さなAlGaAs/GaAs系量子細線の作製を行ってきたが、FME成長において原子の表面マイグレーションを制御することにより、全く新しい原理に基づく結晶成長の自己停止機構を発見した。この自己停止機構を利用すると、原子層レベルで均一な量子細線を自己形成的に作製することが初めて可能になり、量子ナノ構造の作製方法として、精度、品質およびスループットの点で極めて優れている。本プロジェクトの目的は、電子をナノメートルスケールで閉じこめた量子細線、量子ドットにおいて、どのような物理現象が顕著になり、どのような有効性が期待できるかを明らかにすることである。

2. 研究経過と現状

今までの成果としては、有機金属気相成長(MOCVD)法において、III族及びV族の原料ガスを交互に供給す

る流量変調(FME)法を用いたAlGaAs/GaAs系量子細線において、原子層レベルで均一な領域が1ミクロン程度まで拡張し、顕微PL、磁気PLなどにより低次元エキシトンの理解が進んだこと。室温において量子細線レーザーが基底レベルから発振したこと。V族元素として有機砒素(TBAs)を用いた場合に、横方向閉じ込めが強化されること(4.5nmの細線の基底準位と第一励起準位のエネルギー差がTBAsを用いた場合58meVに対し、AsH₃を用いた場合は46meV)また、細線の均一性を示すStokes shiftが小さいことを見出したこと。(TBAsを用いた場合の3.9meVに対しAsH₃を用いた場合は6.2meV)。テラヘルツ分光およびEOサンプリング技術により、量子細線中の電子準位のコヒーレントな緩和現象の検出を開始したこと。0.3ミクロンピッチの高密度量子細線を形成し、分布帰還型量子細線レーザーに応用したこと。分子線エピタキシャル法(MBE)において、As₂や原子状水素添加により形状制御されたInGaAs/AlInAs量子細線を作製し、負性抵抗量子細線FETを開発したこと、などが挙げられる。

図1は、分布帰還型量子細線レーザーのSEM断面写真を示す。干渉露光法により0.36μm周期のV溝を形成したGaAs基板の上に1回の選択成長により0.8μmのN型Al_{0.38}Ga_{0.62}Asクラッド層、0.1μmのAl_{0.2}Ga_{0.8}Asガイド層形成した後、厚さ10nmの3重量子細線を形成したものである。このレーザーは、しきい値13mAで室温発振している。

3. 効果

本研究により、発光半値幅5meV程度の、世界的に見て最高水準の量子細線を製作することができた。これにより、低次元における、エキシトンや電子状態について、今までよりも、精密な議論の展開が可能になった。また、量子細線レーザーにおいて初めて基底レベル発振を得たこと、高性能細線FETを作成したことなど、

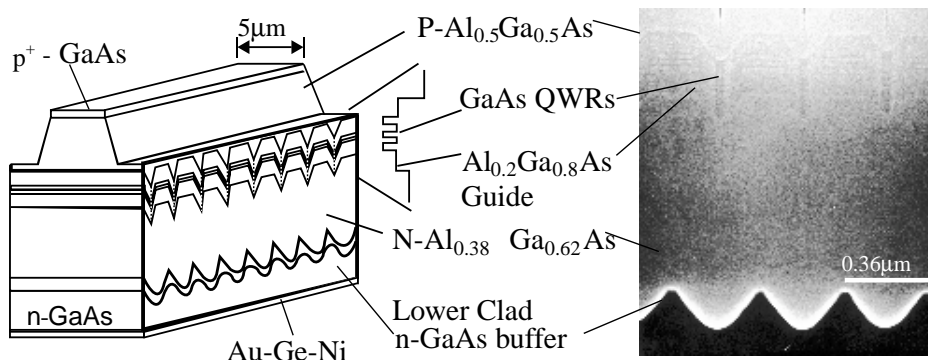


図1 分布帰還型量子細線レーザの模式図およびSEM断面図
一回の再成長により量子細線アレイが $0.8\mu\text{m}$ のNAIGaAsクラッド層上に形成されている。

量子構造を用いたデバイスの可能性を実証することができた。

4. 今後の研究展開の方向

低次元構造により電子の散乱過程が大幅に抑えられ、量子状態が時間的、空間的にコヒーレントに結合することが可能になると、結合量子細線からの量子ビートによるテラヘルツ電磁波放射やブロッホ振動が期待できる。また、量子ナノ構造においては、電子と正孔との相対距離が減少するため、相互作用が増大し、エキシトンのエネルギーが安定化することが予測されている。実際、厚さを4～5ナノメートルに縮小した量子細線のエキシトンが室温付近でも安定である兆候がある。エキシトンにより材料と光との相互作用が増大し、光学利得や非線形効果の大きな新たな光学材料の創製が期待できる。更に、半導体ナノ構造においては、電界等の引加により量子レベルを変化させることが可能であることから、コヒーレントな量子効果を能動的に制御することができる。例えば、低次元エキシトンとフォトンの電磁場が結合しポラトリンモードを用いて、高性能な光スイッチを実現できる可能性がある。光領域においては、光通信ネットワークを構築するための、光ルーティングデバイスの開発が重要であるが、光との強い相互作用を有し、その作用を能動的に変化することが可能な量子ナノ構造を光制御デバイスとして応用する可能性を検証する。また、形状制御された量子細線を用いて、低次元電子伝導や、低次元エキシトン物性の研究、コヒーレンス緩和時間

の検証などに関しては、ナノ領域とも連携して進めて行く。

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数35名)

職員(15名) 小倉睦郎* 杉山佳延 王 学論 菅谷武
芳 松畑洋文 中川 格 和田敏美 板谷太郎 松本和彦
(電子デバイス部) 渡辺正信 伊藤日出男 小森和弘
清水三聡 永宗 靖 鍛冶良作(光技術部)

職員以外(20名) 辻川智子(大工試) 樋口博文 彦坂憲宣
一ノ渡純子(科学技術振興事業団) 金 泰根 金 成珍
孫 昌植 鶴町徳昭(NEDOフェロー) 張 起連
(科学技術特別研究員) 劉 興権(戦略研究員) 岡田 工
(東海大短期大学) 小柴正則 辻 寧英(北海道大学)
富沢一隆 阪井和男 堤 利幸 田村耕一
郎(明治大学) 諸橋 功 金井裕貴(湘南工科大学)
松本和幸(芝浦工大)

(ホームページ <http://www.etl.go.jp/4658/>)

*ラボリーダー