

原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子効果

研究代表 電子技術総合研究所 電子デバイス部 小倉睦郎

Coherent Quantum Effects in Quantum Nano-structure with Atomic Layer Precision

Mutsuo Ogura, *Research Director of CREST*

Electronic devices division, Electrotechnical Laboratory

1. はじめに

量子ナノ構造において、その特性サイズを縮小してゆくと、量子準位の離散化が生じ、さまざまな量子効果が期待される一方で、界面の凹凸やサイズ揺らぎによる量子準位の不均一性や散乱効果が問題となる。我々は流量変調MOCVD法や、水素添加MBE法により、吸着原子の表面移動度を向上することにより、原子層レベルで均一な量子細線の形成に努めてきた。近接場顕微鏡(SNOM)やマイクロフォトルミネセンス(μ PL)による高分解能光学評価によると量子細線は、原子層レベルの厚さ揺らぎにより分断され、長手方向に拡張された量子ドット列となることが判明した。この拡張された量子ドットは、長さ約0.5~1 μ mに渡ってコヒーレントな量子状態を保ち、1次元系に特有な偏光や量子レベルの分離を示している。これら有限長の量子細線中のエキシトンは、量子ドットと同様な強いエキシトン結合エネルギーを持つとともに、波動関数の密度に方位依存性があることから、特定の伝搬モードに対してのみ利得等を増強することが可能になる。また、細線中の電子の伝導においては、微細加工技術の発達により、デバイスのサイズを、単一の量子状態の範囲に作り込むことが可能になった。

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。

光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問題となるが、形状揺らぎを増すことなく、量子細線を高密度に周期的に並べることが可能になり、利得結合型DFB量子細線レーザを試作することができた。また、量子細線FETにおいては、実空間遷移による負性抵抗効果が量子井戸よりも量子細線構造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。

本プロジェクトでは、エキシトンポラリトンやコヒーレント体積の拡張による巨大双極子モーメントの利用、あるいは、周期構造の形成による真空場の増強など、エキシトンのコヒーレント振動の解明や量子ナノ構造における光機能材料の創出の観点、電子デバイスにおいては、低次元電子の散乱機構を明らかにする観点から、フェムト秒ポンププローブやEOサンプリングなどの超高速光計測を開始している。

2. 研究計画および実施状況

プロジェクトの推進に必要な構成要素として、結晶成長、計測、デバイス技術およびシミュレーションの4項目を設定し、各技術分野の密接な調整を図りながら研究を進めている。また、計測技術を中心に、パリ大学、スイス連邦工科大学、東京大学生産技術研究所など、国内外の研究機関との共同研究も積極的に展開している。

2-1 結晶成長技術

2-1-1 有機砒素 (TBAs)を用いたAlGaAs/GaAs量子細線

より安全性の高い有機砒素 (TBAs)を用いたAlGaAs/GaAs量子細線により(311)面のステップバンチングが抑制され、アルシン(AsH_3)を用いた場合よりも均一性が向上した。図1は、TBAsを用いた積層量子細線の透過型電子顕微鏡像を示す。V溝基板上に形成された $\text{Al}_{0.425}\text{GaAs}$ は、 78° で交叉しており、 AsH_3 の場合(82°)よりもやや狭い。量子細線の上面は、明瞭に(001)面と(311)A面とに分離している。図2は、TBAsを5族材料に用いた量子細線の、

フォトルミネセンス(PL)及び励起フォトルミネセンス(PLE)スペクトラムを示す。公称厚さ4.5nm、サブバンド間隔58meVの比較的薄い量子細線において、ストークスシフトは3.9meV、PLの発光半値幅8meVを示しており、アルシンをV族材料として用いた場合よりも均一性が向上した。AFMによる観察によると、アルシンを材料に用いた時に観察される(311)面のステップバンチングが抑制されたためである。

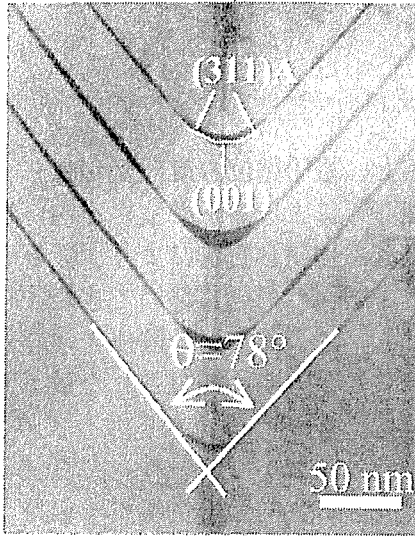


図1. TBAをV族材料として4 μ mピッチV溝GaAs基板の上に形成されたGaAs/Al_{0.425}Ga_{0.575}As積層量子細線 成長温度630 $^{\circ}$ C

2-1-2 グレーティング基板上的高密度量子細線の形成

量子細線レーザや量子細線の高密度積層構造を実現しようとする場合、基板に形成されたグレーティングが、どのような条件のもとにエピタキシャル層に転写されるかが問題になる。

成長温度により、平坦部分が増加(720 $^{\circ}$ C)したり定常的な(680 $^{\circ}$ C)積層構造が得られることに加え、初期の基板グレーティングのアスペクト比がその後の形状を左右することが明らかになった。図3は、元のグレーティング基板の形状が成長前の熱クリーニング(720 $^{\circ}$ C 5分)によるマストラנסポート(MTE)により変形した後に、GaAsバッファにより(111)面が回復し、AlGaAsの定常的なプロファイルが形成される様子を示す。

2-1-3 As₂および原子状水素添加MBEによる(311)InP V溝基板上の量子細線

(311)方位のInP基板をエッチングすると、90 $^{\circ}$ の角度を成す(100)と(011)面が現れるが、このV溝基板の上に表面拡散を抑制する効果のあるAs₂を用いてInAlAsを成長することにより、(100)と(011)面の側面にそれぞれ(111)Aと(331)B面が形成され、約20度の鋭いV溝を形成することが可能になった。更に、原子状水素を添加しながら、GaInAsを成長することにより、10x20nmの断面を持つAlInAs/GaInAs量子細線を作製した。この細線を用いてFETを作製したところ、40Kにおいてソース、ドレイン電圧0.12Vで負性抵抗を示し、この細線が良好な電子伝導特性を持つことが判明した。(ポスター3-4-4)

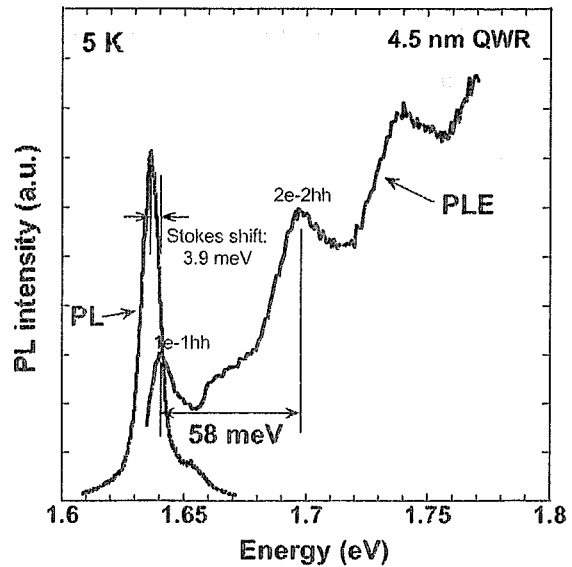


図2. TBAをV族材料として形成された、GaAs/Al_{0.425}Ga_{0.575}As単一量子細線のPLおよびPLEスペクトラム

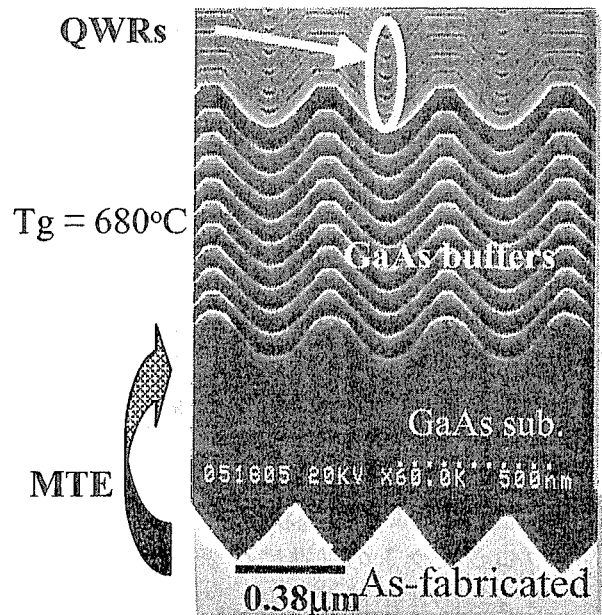


図3 形状保存MOCVDにおける基板形状とGaAsバッファの影響

2-2 計測技術

2-2-1 近接場顕微鏡(SNOM)による量子細線の評価

量子細線中の孤立エキシトンのうち、細線方向に拡張しているものは、明瞭な偏光依存性があるのに対し、不均一部分では、大きな偏光依存性が無いことが判明した。図4は、励起強度を変化させたときの発光スペクトラムを示す。強励起時に約meV低エネルギー側に発光ピークが現れている。このピークは励起パワーの2乗に比例することからバイエキシトンであると結論できる。

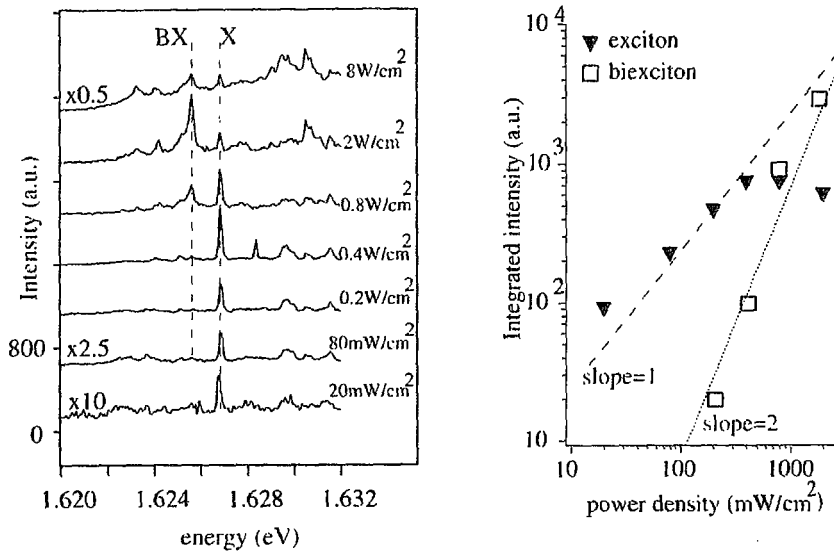


図4 SNOMによる拡張されたエキシトンからの発光の励起強度依存性。バイエキシトンの存在を示す。

2-2-2 顕微PLによる量子細線の評価

量子細線中のエキシトンは、細線中のポテンシャル揺らぎにより局在しているが、その発光レベルが偏光方向により $100\mu\text{eV}$ 程度分離していることが判明した。これは、1次元エキシトンにおいて交換相互作用の縮退が解けるためと考えられる。図5は、顕微PLによる量子細線中のエキシトン発光の偏光依存性を示す。顕微PLの場合は複数の場所におけるエキシトン発光を同時に観察しているが、エネルギー分離が小さい挿入図(a)と $120\mu\text{V}$ と比較的大きな分離を示す(b)の部分が混在している。

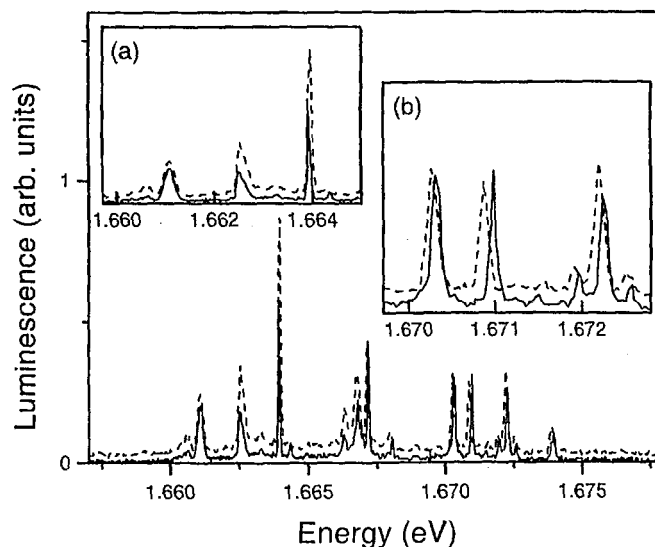


図5 顕微PLによる量子細線中のエキシトン発光の偏光依存性。実線は、細線に垂直、破線は細線に水平の場合。

2-2-3 細線超格子の光学特性

量子細線を垂直に積層した1次元超格子構造においては、孤立した量子細線では存在しなかった発光ピークの出現や、PLEスペクトラムの消失が観測され、その機構の詳細は明らかでない。

電子波動関数の結合効果に加えて、フォトンやフォノンを介した相互作用、エキシトンの局在効果などを想定し、吸収や発光の過渡特性、光励起実験などを進めている。(ポスター3-4-1)

2-2-4 磁気PLおよび磁気抵抗測定

PL反磁性シフトの磁場方向依存性によりGaAs/AlGaAs低次元エキシトンの形状を評価した。また、量子細線の低電界移動度や電子濃度磁気抵抗効果により算出した。(ポスター3-4-2)

2-2-5 コヒーレント位相緩和計測

低次元量子ナノ構造において、フォノン散乱や電子間散乱が抑制されることにより、エキシトンの位相緩和時間が長くなることが期待される。そこで、フェムト秒ポンププローブ技術を応用して、量子細線構造特有のエネルギー緩和現象の計測や、三日月状の非対称構造による自己分極によるテラヘルツ電磁波の検出を行った。更に量子細線におけるエキシトンを、遅延時間を変化させた位相ロックダブルパルスで励起し、非線形結晶による光ゲーティングによる時解発光によりコヒーレント緩和時間を計測する準備を進めている。(ポスター3-4-3)

2-3 デバイス技術

2-3-1 量子細線FET

水素添加およびAsダイマースソースを用いたMBE成長により形成した(311)InP基板上の量子細線にソース、ドレインおよびゲート電極を形成し、量子細線FETを作製した。このFETは、0.12Vという低いソースドレイン電圧において負性抵抗を示し、この系の電子の加速が2次元系よりも容易であることを示している。(ポスター3-2-4)

2-3-2 量子細線レーザー

量子細線レーザーは、量子井戸レーザーに比べて、微分利得が大きく、低しきい値電流動作や高速変調に有利であることが期待されているが、閉じこめ係数が小さく、モード利得が得られないという問題が存在していた。そこで、高密度量子細線アレイを光共振器と垂直に形成した利得結合型分布帰還型量子細線レーザーを開発した。このレーザーは、基板にグレーティングを形成した後、一回の結晶成長でガイド層、細線アレイを形成するもので、通常の再成長をとまなう手法に比べて界面欠陥が少ない利点がある。(ポスター3-2-5)

2-4 シミュレーション技術

DFB量子細線レーザーの具体的な形状(ポスター3-2-5)に基づいて、左右に周期境界条件を施した有限要素法により、伝播モードを計算した。量子細線の部分に利得(屈折率の虚部)を導入して、波長に対して実効屈折率の実部および虚部を計算した所、ブラッグ波長の中心付近で実効屈折率がステップ状に変化し、同時に利得のピークが得られた。すなわち、形状保存MOCVDで形成した細線グレーティングが利得結合型DFBレーザーの要件を満たしていることを確認した。(北海道大学)

多粒子モンテカルロシミュレーションにおいて電子のコヒーレンス性とその緩和過程を取り込んだ量子輸送問題の数値計算手法の2次元化に関する開発を行っている。(明治大学)