

「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

(電子技術総合研究所 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

この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す。メンバー構成においては、量子細線の結晶成長を軸に、その特性評価、シミュレーションなどの低次元ナノ構造の基礎物性の解明と、量子効果デバイスの開発をバランス良く発展させることを配慮しています。今までの成果としては、有機金属気相成長(MOCVD)法において、3族及び5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、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が基底レベルから発振したこと。分子線エピタキシャル法(MBE)において、As<sub>2</sub>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です。今後は、高密度量子細線を形成し、低次元ナノ構造における量子効果を顕在化させるとともに量子準位のコヒーレントな結合効果を利用した、非線型光学素子や論理演算素子の実現を目指します。

(ホームページ <http://www.etl.go.jp/4658/>)

### 2. 研究実施内容

#### 2-1. 基本構想

量子細線、量子ドット等に特有の量子現象を発現させるためには、1原子層程度のサイズゆらぎが許容できない。そこで1原子層ごとに3族と5族を交互に成長する流量変調法を形状基板に適用することにより、原子層オーダで形状を制御した量子ナノ構造を作製する。これらの量子ナノ構造における、電子準位、光学特性、および伝導特性を精密に評価するととも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、電子準位間や電子とフォトンとのコヒーレントな相互作用に基づく新たな量子現象を探索し、その原理を利用したコヒーレント量子デバイスを開発する。

## 2 - 2. 研究目的

本研究の目的は、量子ナノ構造において特異な物理現象を探索し、有用な機能を発現させることにある。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、非線形効果の増大、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。最近の積層量子細線の発光特性は、細線間に電子準位間の直接の結合が存在しなくても、フォトンの電磁場を介して異なる細線間のエキシトンが結合する効果の存在を示唆している。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。すなわち、コヒーレント結合系における高効率な光から電子状態、あるいはその逆過程を制御することにより、光の放射、異常分散特性等、マクロな効果を引き出す。

## 2 - 3. 平成11年度までの研究の経緯および成果

### 2 - 3 - 1. 結晶成長技術

#### (a) 構造揺らぎの評価および制御

新規MOCVD成長炉において、均一性の優れた量子細線が再現性良く成長できている。特にV族元素として有機砷素(TBAs)を用いた場合にアルシン( $\text{AsH}_3$ )と同等あるいはそれ以上の量子細線ができることを確認した。TBAsを用いた場合のメリットは：①横方向閉じ込めが強い。(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、 $\text{AsH}_3$ を用いた場合は46meVであった。)②細線の均一性を示すStokes shiftが小さい。(AsH<sub>3</sub>=6.2meV, TBAsを用いた場合の3.9meVに対しAsH<sub>3</sub>を用いた場合は6.2meV。)これは、量子細線の(311)A facetにおけるstep-bunchingが抑えられているためである。

#### (b) 高密度量子細線の形成

量子細線をデバイスに応用する上で、細線の均一性ととも細線の充填密度を上げることが重要になる。深さ方向および平面方向に密集させた細線超格子を作製し、分布帰還型量子細線レーザやアクティブな媒質を持つ2次元量子細線アレイを実現した。分布帰還型量子細線レーザを一回の結晶成長で作製するためには、まず、干渉露光によりGaAs基板上に平面方向に光の媒質内波長周期のグレーティングを作り、その凹凸がAlGaAs成長時にレーザのクラッド層に必要な1ミクロン程度に渡って保存される条件を見いだす必要がある。今年度、適切な基板温度においてGaAsバッファを成長することにより1ミクロン以上の厚さに渡ってグレーティングの保持が可能になることを見いだした。更に、2次元量子細線アレイからの明瞭な発光スペクトラ

ムを確認した。

## 2 - 3 - 2. 評価技術

- ① 横方向閉じこめの強化された量子細線において、厚さ4.5nmの細線のPLEピーク(基底準位)の幅が250Kまで温度にほとんど依存しないことが分かった。これは量子細線においてLOフォノンによる励起子の散乱が押さえられていることを示唆している。
- ② また、V溝基板形成後、フォトレジストを除去した後に追加エッチングすることにより、細線の平滑性が向上し、海外を含めた特性評価研究において、本プロジェクトによるAlGaAs/GaAs系量子細線が世界で最高のレベルに達していることが明らかになった。
- ③ 量子細線の反磁性シフトからエキシトンの束縛エネルギーを算出した。その結果エキシトンのバインディングエネルギーが細線の厚さ8nmの場合9.7meVであることが判明した。
- ④ 遠赤外光を用いたサイクロトロン共鳴により、変調ドープ量子細線アレイの吸収率を測定した。量子細線の電子密度： $1.92 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 、電子移動度： $64,100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と算出された。電子移動度は、サイクロトロン振動による吸収ピークの半値幅から求めたものであるが、同程度の厚さの量子井戸に比べても遜色が無いことが判明した。
- ⑤ 積層量子細線にフェムト秒光を照射することにより、テラヘルツ電磁波を検出した。
- ⑥ 低温近接場顕微鏡により、量子細線中のエキシトンが200～600nm程度コヒーレントに拡張していることが明らかになった。

## 2 - 3 - 3. デバイス技術

### (a) GaAs系量子細線FET

- ① GaAs量子細線の均一性の向上と実効的なチャネル長を短くすることにより、良好な静特性を持つ量子細線FETを作製することができた。また、ソース電流、ゲート電圧特性にコンダクタンスの明瞭なステップが観察された。これは、ソース・ドレイン電圧に大きく依存しないところから量子細線の横モードに対応するコンダクタンスステップを反映しているものと考えられる。
- ② また、結合GaAs量子細線の垂直方向の伝導利用した、低次元共鳴トンネルダイオードを試作し、共鳴トンネル効果に基づく微分負性抵抗を観察した。

### (b) InGaAs/AlInAs系量子細線FET

InGaAs系リッジ量子細線FETにおいて、実空間遷移に基づく負性抵抗が、

低ソースドレイン電圧で起こることを初めて見いだした。

また、量子細線のチャネル幅依存性から、ホットキャリアの散乱が低次元量子構造において抑制される効果が存在することを示唆している。

### 3 - 3 - 4 シミュレーション技術

3次元有限要素法により、AlGaAs/GaAs量子ドットの固有値および磁場依存性を計算した。また、2次元フォトリック結晶の解析を行った。(北大小柴研)

化合物半導体を対象にした集合モンテカルロシミュレーションにおいて、トンネル過程を含む解析手法の開発を行い、1次元ダブルバリアトンネル素子において負性抵抗を再現した。(明治大富澤研)

### 3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

金泰根、王学論、小森和弘、彦坂憲宣、小倉睦郎 "AlGaAs/GaAs quantum wire lasers fabricated by flow rate modulation epitaxy" Electronics Letters 15th April Vol.35, No.8 pp.639-640, 1999.

小倉睦郎、金泰根、王学論、小森和宏、彦坂憲宣、清水三聡、鈴木克弘 "流量変調法による量子細線レーザの基底レベル発振" 信学技法 Technical report of IEICE OPE99-43, LQE99-37, 1999.

菅谷武芳、高橋俊充、中川格、小倉睦郎、杉山佳延 "Quasi-quantum-wire field-effect transistor fabricated by composition-controlled, selective growth in molecular beam epitaxy" Journal of Crystal Growth 201/202 pp.833-836, 1999.

王学論、小倉睦郎 "Optical characterization of the self-limiting effect in flow-rate modulation epitaxy of V-shaped GaAs quantum wire" Applied Physics Letters Vol.75 pp.4148-4150, 1999.

金泰根、小倉睦郎 "Ultrahigh characteristic temperature ( $T_0 = 322\text{K}$  near room temperature) of V-grooved quantum wire lasers" Solid State Electronics, Vol.44. No.1 pp.185-187, 2000.

金成珍、菅谷武芳、小倉睦郎、杉山佳延、"InGaAs量子細線 F E T から明瞭な負性抵抗の観察"、電子通信学会技報 E D 99 - 304、S D M 99-197 (2000 - 02) .

孫昌植、金泰根、王学論、小倉睦郎、"V-groove AlGaAs/GaAs multilayers grown on patterned GaAs substrates with submicron gratings", 電子通信学会技報 E D 99 - 318、S D M 99-211 (2000 - 02) .