

## 1-2 小倉チーム Ogura Team

### 原子層制御量子ナノ構造の コヒーレント量子効果

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

New generation of V-groove GaAs quantum wires (QWRs) have been fabricated using flow rate modulation epitaxy in which coherent electronic states are extended over a few microns. Using tertiarybutylarsine (TBAs) as well as better alignment of the grooves along the crystal directions and additional chemical etching are effective to improve the uniformity of QWRs. A scanning micro-photoluminescence has been proven that it is very effective to study the optical characteristics of low dimensional excitons exchange interactions and many body effects. Well-defined conductance steps are observed in a GaAs QWR FET even at 35K, which indicates the ballistic transport of electrons in one dimensional electron channel. We have also studied the quantum-interference characteristics of 10 x 25 nm trench-type InGaAs QWR-FET realized by selective MBE epitaxy and observed very different behavior to that typically exhibited by disordered wires. The amplitude of the magneto-resistance fluctuations is exponentially suppressed at high field, which is an experimental evidence for an Aharonov-Bohm effect. The temperature-dependent magneto-resistance reveals that electron temperature in the trench-type QWR increased more effectively than quantum well due to less scattering probability. An InGaAs /AlGaAs QWR array with the period of 0.43  $\mu$ m is realized by one step MOCVD growth on a corrugated GaAs substrate. Owing to the stronger quantum confinement effect by AlGaAs cladding region, a strong photoluminescence from QWRs is observed even at room temperature.

## 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 産業技術総合研究所 光技術部門 小倉睦郎

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

Mutsuo Ogura, *Research Director of CREST*

Photonics Research Institute, AIST

### 1. はじめに

従来の化合物半導体系量子細線は、細線に沿ったポテンシャル揺らぎのため正確には、量子ドットアレイと言うべき状態であった。本プロジェクトの進展により量子準位の不均一性が抑制され、 $1\mu\text{m}$ 以上に渡って真に1次元量子細線と呼べる状態が出現している。その結果、1次元エキシトンの特異な光学物性、あるいは1次元電子チャネルにおける負性抵抗および量子コンダクタンスステップなどが明瞭に現れている。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が、‘量子細線中の電子の散乱は抑制されているかどうか’、‘レーザ発振状態におけるエキシトンの関与の有無’などデバイスと量子物理現象との接点で興味深い研究が展開されつつある。更に、低次元エキシトンのコヒーレント振動の解析やエキシトンポラリトン導波モードの解析、量子細線DFBレーザなど光機能材料の創出の観点、また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、磁気抵抗効果の解析やフェムト秒ポンププローブ技術を用いたEOサンプリングなどの超高速光計測を進めている。

### 2. 研究計画および実施状況

#### 2-1 有機砒素 (TBAs)を用いたAlGaAs/GaAs量子細線の結晶成長と走査型顕微分光による光学的評価

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( $\text{AsH}_3$ )を用いた場合よりも均一性が向上することは既に報告したが、傾斜面における不純物の混入も抑制されていることが判明した。図1は、TBAsを用いた場合と $\text{AsH}_3$ を用いた場合のライフタイムの温度依存性を示す。 $\text{AsH}_3$ を用いた場合は、ライフタイムが150Kを境に低下するのに対し、TBAs場合は、250Kまで増加していることから、TBAsにより非発光性再結合準位の発生が抑制されていることが分かる。また、量子井戸においては、砒素材料の差が顕著ではないことから、細線の傾斜面における不純物の取り込まれ方に大きな差異があると考えられる。(ポスター1-2-4)

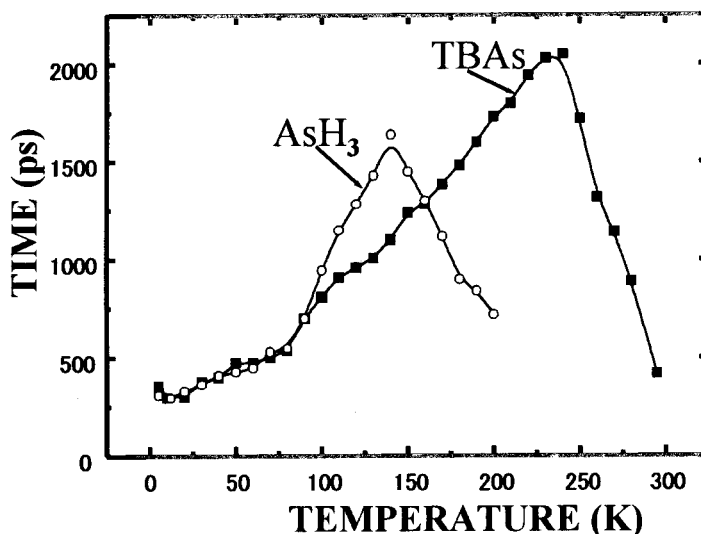


図1 量子細線の発光寿命の温度依存性

GaAs系量子細線の均一性は、アルシンからTBAsソースへの変更に加え、ストライプのアライメント精度の向上およびパタン形成後の再エッチングにより大きく向上した。図2は、本プロジェクト提案時および現時点における2種類の量子細線の10K付近における走査顕微分光像と特定スポット（ $1\mu\text{m}\Phi$ ）からの発光スペクトラムを示す。走査顕微分光像においては、顕微鏡対物レンズをピエゾステージにより移動させることにより、位置（縦軸）に対してスペクトラム（横軸）を取得した。提案時の量子細線は、長さ20nmから200nmに分断されているため、量子ドットと同様な鋭い多数のスペクトラが観測されたのに対し、均一性の向上した新しい世代の量子細線においては、 $2\sim 3\mu\text{m}$ に渡って単一の発光波長を示す領域が現れている。また、均一な量子細線においては、発光の半値巾がむしろ広がっている。これは細線に沿った方向での量子化エネルギーが $10\mu\text{eV}$ 程度に減少したためである。

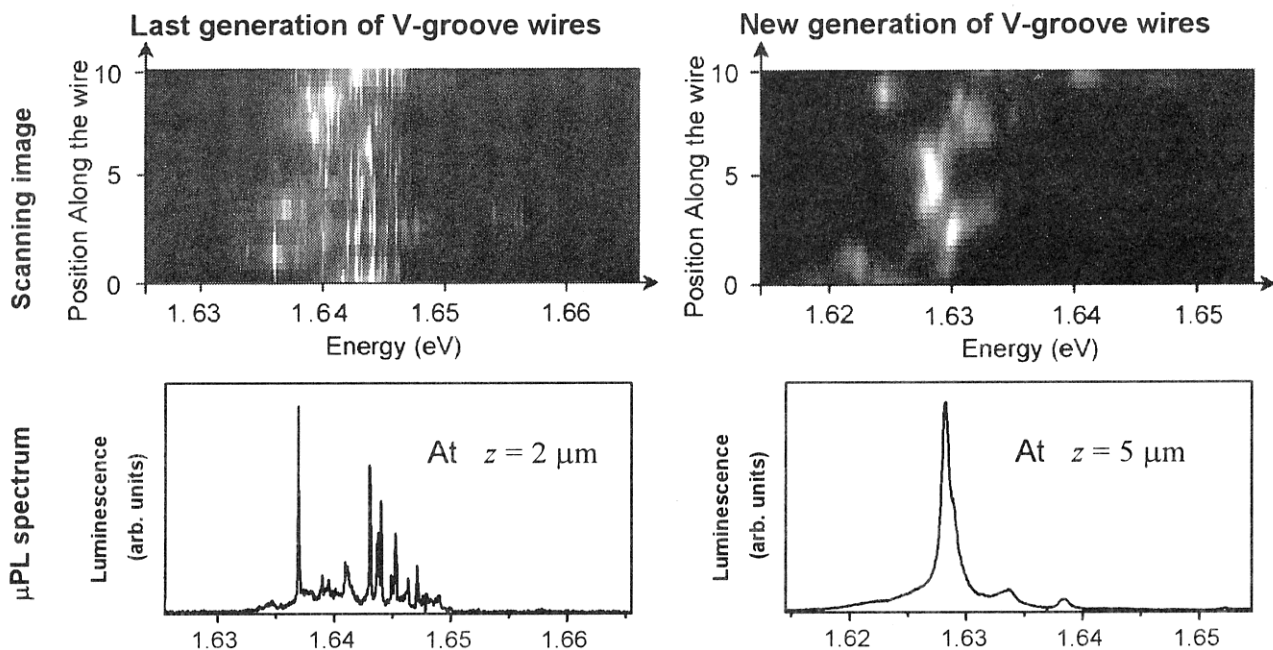


図2 提案時(左)と現在(右)における量子細線の走査顕微分光像(上段)およびスペクトラム像(下段)

新しい世代のGaAs系量子細線の励起強度依存性は、図3に示すように、量子細線内に数個のエキシトンが励起された状態では約 $2\text{meV}$ 長波長側に移動し、励起強度を数十個に上げると約 $0.5\text{meV}$ 短波長側に戻る。長波長側への発光エネルギーの移動は、細線内のエキシトン間にクーロン相互作用が働いたため、更に励起強度を上げることにより、その相互作用が遮蔽されたためと考えられる。また、励起強度を上げて行くと $2.4\text{meV}$ 低エネルギー側にバイエキシトンの発光が現れている。なおこのような発光スペクトラムの励起強度による変化は、均一性の十分でない試料においては現れない。更に、低次元エキシトンの交換相互作用による微細構造などを解明するため、顕微磁気PLを企画している。(ポスター1-2-1)

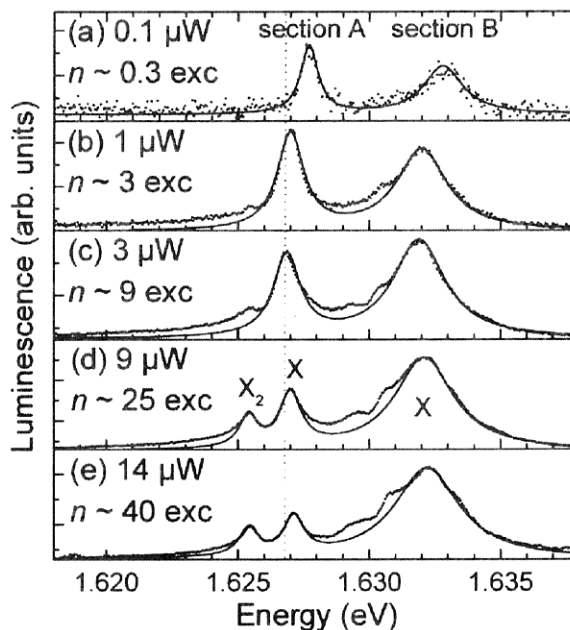


図3 均一な量子細線の励起強度依存性

## 2-2 GaAs/AlGaAs量子細線FET

均一性が改善された新しい世代のGaAs/AlGaAs量子細線を用いて、量子細線FETを作製した。4  $\mu\text{m}$  間隔で形成したV溝GaAs基板上に0.8  $\mu\text{m}$  のAlGaAs層、50nmのSi-AlGaAs, 10nmのスペーサ層、厚さ10nmの量子細線、10nmのAlGaAsスペーサ層、50nmのSi-AlGaAs、50nmのn+GaAs層をTBAsを用いて成長し、リセスエッチによりn+GaAs層オーミックコンタクト層を除いた後Ti/Auゲート電極を形成した。細線の厚さは10nmでサブバンド間隔は、25meV程度である。図4に平面SEM像を示す。ソース・ドレイン電極間の距離は4  $\mu\text{m}$  であるが、ゲート近傍までn+GaAs層で覆うことにより、表面空乏効果による1次元キャリアの減少を防いでいる。図5に示すように、室温における量子細線FETは通常のディプレッション型モスFETの静特性を示す。ソースドレイン電圧が1 Vの時5  $\mu\text{A}$  程度のドレイン電流が流れている。図6は、38Kにおける量子細線FETの静特性を示す。チャネルコンダクタンスのキックがゲート電圧に依存して発生している。また、ソースドレイン電圧が低い時のドレイン電流は、図7に示すように明瞭なコンダクタンスステップが現れている。このステップは、ゲート電圧により、高次のサブバンドレベルが順次伝導に寄与するためと考えられる。ゲート長が1  $\mu\text{m}$  と比較的長く、また35Kという高温で明瞭なステップが出現したことは、量子細線の均一性が向上し、散乱が抑制されていることを示唆している。

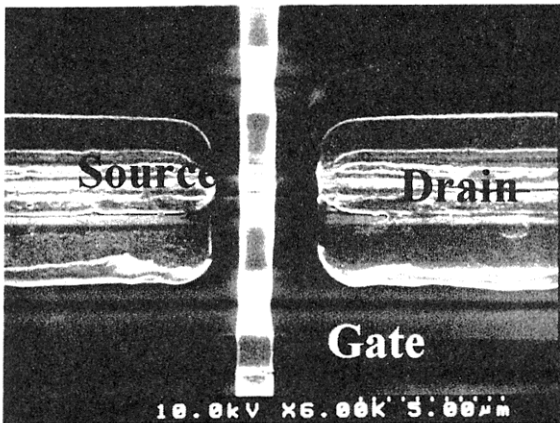


図4 GaAs量子細線FETの平面SEM像

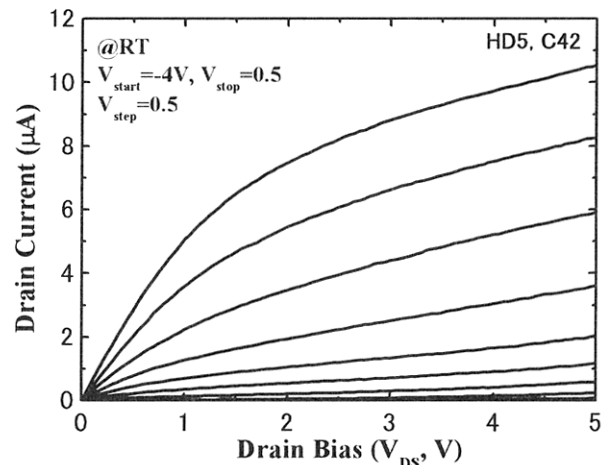


図5 GaAs量子細線FETの室温における静特性 (ゲート長1  $\mu\text{m}$ )

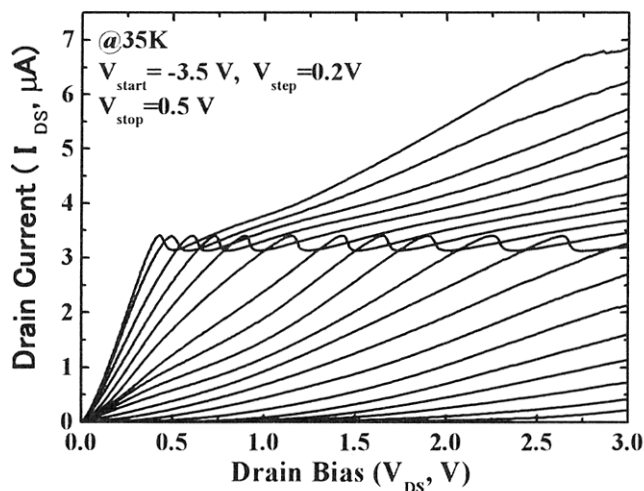


図6 GaAs量子細線の35Kにおける静特性 (ゲート長1  $\mu\text{m}$ )

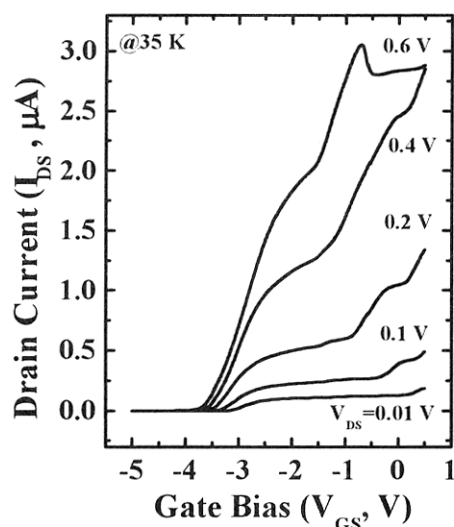


図7 GaAs量子細線の35Kにおけるコンダクタンスステップ

### 2-3 InGaAs/AlInAs量子細線FET

(311)方位のInP基板をエッチングすると、90°の角度を成す(100)と(011)面が現れるが、このV溝基板上に表面拡散を抑制する効果のあるAs<sub>2</sub>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度の交叉角を持つ鋭いV溝（トレンチ）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、図8に示すような25nm×10nmの断面を持つAlInAs/GaInAsトレンチ型量子細線を作製した。InAlAsバリア層に成長方向に沿って細かな縞が観察されていることから、自然超格子が形成され、量子細線の均一性を向上させていると予想される。この細線を用いてFETを作製したところ、図9に示すように、40Kにおいてソース、ドレイン電圧0.12Vで負性抵抗を示した。負性抵抗は、実空間遷移によるものと考えられることから、チャンネル中の電子が加速されやすいことを示唆しており、この細線が極めて良好な電子伝導特性を持つことが判明した。また、極低温における磁気抵抗の解析から、AB効果による磁気抵抗の振動が9Kまで存在し、μmオーダーで電子のコヒーレンスが保たれていることを示唆している。振動の振幅から電子温度を推定することが可能になり、InGaAsトレンチ型量子細線における散乱機構が量子井戸とは異なることを見いだした。（ポスター1・2・5）

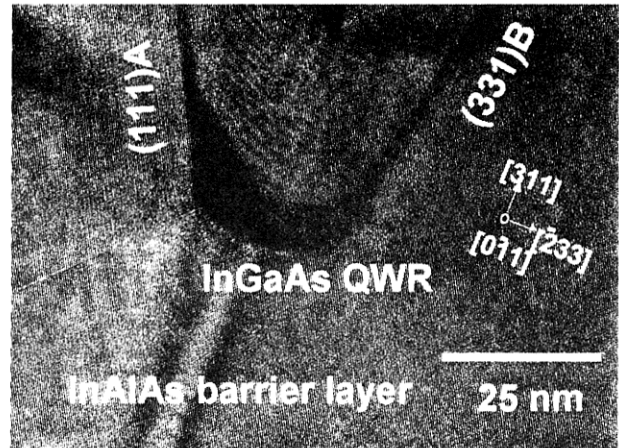


図8 (311)方位のInP基板の上に形成したInGaAs/AlInAs量子細線のTEM像

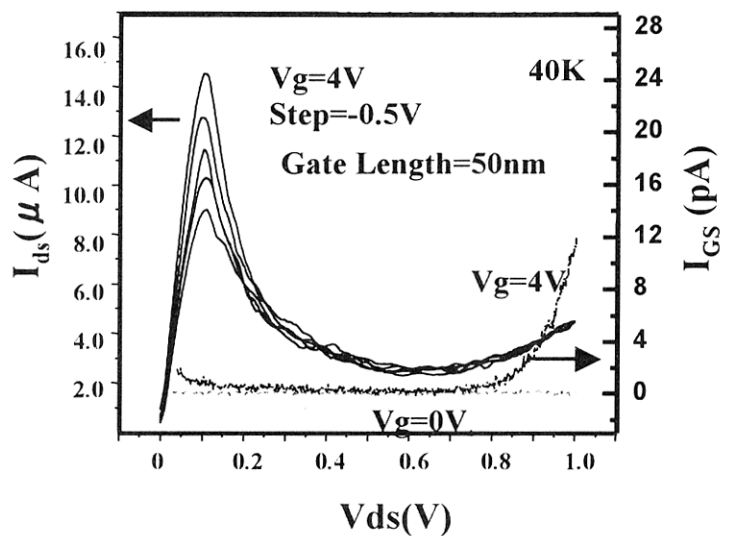


図9 InGaAs/AlInAs量子細線FETにおける急峻な負性抵抗効果

### 2-4 グレーティング基板上的高密度InGaAs/AlGaAs量子細線

InGaAsを量子細線のコアに用いることにより量子閉じこめが強くなるとともに斜面に形成された寄生量子井戸の影響が軽減されるため、室温においても、量子細線からの発光のみが優勢な高密度量子細線が形成できた。（ポスター1・2・3）また、In組成を増加するにつれ、V溝の底の部分で量子ドットが形成され、発光スペクトラムの不連続な長波長側への推移や大きなストークスシフトの原因となっている。今後光通信が家庭や車に普及すると、発光波長のみならず使用温度範囲の広い材料が必要となり、クラッド層にAlを入れた材料系が有利となる。一方、従来Alを含む材料では、表面の酸化により再成長に伴う界面の劣化が問題となってきたが、昨年度報告したように、グレーティング基板上から1 μm以上グレーティング形状を保持する成長条件を得ているので、この問題を回避することが可能である。高密度量子細線の場合、リソグラフの揺らぎによる基板グレーティングの不均一性が問題となり、物性的には古い世代の量子細線、すなわち不連続な量子ドットの集合と見るべき段階であるが、そのために、少数キャリアの散逸が抑制され、半導体レーザの低閾値動作に寄与するという側面も存在する。波長のオーダーで位置が制御された量子ナノ構造という意味からも、応用上の価値が高いと思われる。

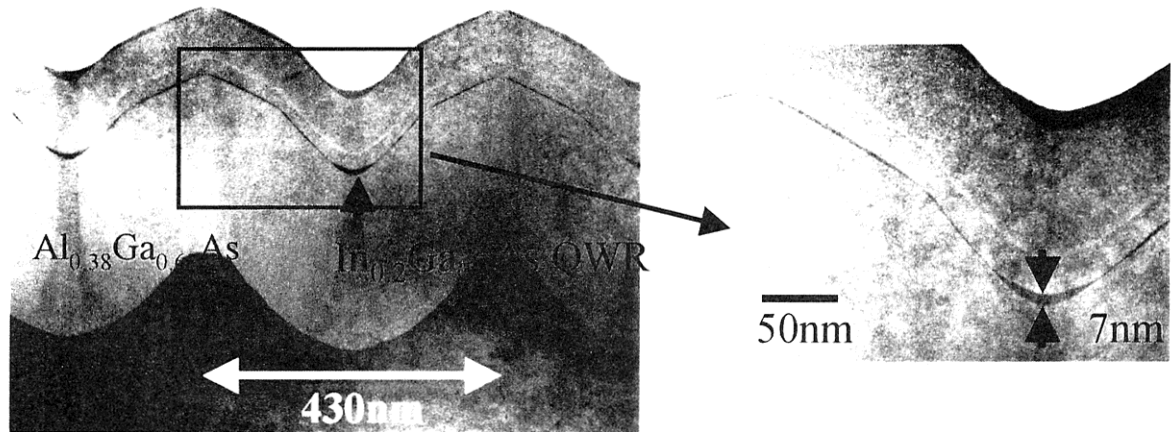


図10 InGaAs/AlGaAs高密度高密度量子細線のTEM像。Inの表面拡散速度が大きく、斜面の量子井戸が薄い。

### 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ける、フォノン散乱や電子間散乱機構を研究するために、細線からのテラヘルツ電磁波の検出（ポスター1-2-2）や顕微鏡下で位相ロックされたダブルパルスによる励起を一本の量子細線に行い、その発光強度の遅延（位相）依存性を測定している。1ps以下の極めて早い緩和しか得られていないのが現状であるが、励起強度が強く電子-電子散乱が大きい可能性、フェムト秒パルスが、広範なエネルギー範囲の電子正孔対を発生している可能性、また、励起レベルの位相緩和を基底レベル発光の強度依存性で検出するスキームであるため、基底レベルの緩和時間が計測できないなどの問題が存在するので、2波長アップコンバージョンによるサブピコ秒発光計測と位相ロックポンプを組み合わせ、基底レベルにおこる緩和効果を計測することを企画している。

### 2-6 シミュレーション技術

DFB量子細線レーザの具体的な形状に基づいて、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。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レーザの要件を満たしていることを確認した。更に、基板と表面側に無反射終端条件を設けることにより、疑似伝播モードを抑制することができた。

（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において、その2次元化の目処が立った。（明治大学）

## 3 特記事項

去る7月1日から7月4日まで、産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂において、クレスト科学技術振興事業団および新世代研究所のご支援のもとに本クレストプロジェクトの中間報告を兼ねて、「量子ナノ構造およびナノエレクトロニクスに関する国際ワークショップ」

[QNN01]を開催した。量子ナノ構造の結晶成長と、走査型プローブ顕微鏡において、内外の優れた研究が発表されるとともに、活発で示唆に富む討論がなされた。なお、会議参加総数199名、講演数は、65件（口頭発表32件、内招待講演25件、ポスタ講演33件）であった。