

化合物半導体量子細線および量子ドットの製作

長谷川英機^{***}・橋 詰 保^{**}・藤倉 序章^{**}
福井 孝志^{*}・陽 完 治^{*}

近年、半導体を用いた極微細低次元構造である量子細線や量子ドット（量子箱）に関する研究が盛んに行われている。これらは、図1に、その構造とポテンシャルエネルギー分布の模式図を示すように、キャリアに対するポテンシャルが低く、かつナノメートル・サイズの微細な線状ないし点状の「閉込め」部分を、ポテンシャルの高い「障壁」部分により取り囲む構造である。これらの構造が目されるのは、それが、次世代の電子デバイスや光デバイスの基本構成要素となる可能性が高いからである。すなわち、電子や正孔を図1のような構造に閉じ込めるとき顕著に発現する種々の量子効果を利用し、これまでにない優れた機能や性能をもつデバイスを実現しようというわけである。具体的な例としては、単電子デバイス、量子波干渉デバイス、量子細線・量子ドットレーザーなどが挙げられる。

量子細線やドットを実現するための「量子材料」としては、III-V族化合物半導体が有望視されている。それは、この材料が、(1)シリコンにない優れた電子輸送特性や発光特性を実現する、(2)完成の域に達した分子線エピタキシー(MBE)や有機金属気相成長(MOVPE)技術により、1原子層(0.3 nm程度)を単位とする精密な多層薄膜成長を可能とする、(3)2元、3元、4元の元素の組合せやその混晶組成など材料選択にきわめて大きい自由度をもつ、(4)精密かつ高品質のヘテロ界面を形成する、(5)結晶成長に付随する選択成長や自己組織化

などの機構を利用すると、加工損傷のないナノメートル寸法の構造（ナノ構造）の形成を可能とする、などのユニークな特色を備えているからである。

本稿の目的は、III-V族化合物半導体材料を用いて、量子細線・量子ドットを製作する方法の概要を、最近の実例を挙げつつ述べることにある。従来の集積回路の微細加工技術を延長するアプローチに限界があることを指摘するとともに、閉込め部分自身に直接加工を施さない新しい「自己組織的」アプローチが急速に進展しつつあることを述べている。

1. 化合物半導体量子構造製作のアプローチと特徴

量子細線・ドットの製作技術には、一般に、(1)半導体中の電子波長（通常10 nm程度）と同程度あるいはそれ以下の閉込めの寸法（図1(a), (b)の L_0 など）が実現できる、(2)十分大きくかつプロフィールが原子尺度で急峻な閉込めポテンシャル（図1(c)）を実現できる、(3)閉込め領域の表面・界面を原子的尺度で平坦にできる、(4)閉込め領域の表面・界面や内部に欠陥準位を形成しない、(5)実用的な工程時間内に、所望の位置に、特性のそろった量子細線やドットのアレイを高密度に実現できる、などの条件を満たさなければならない。これからわかるように、すぐれた量子構造を作るためには、現在の最先端の半導体技術の水準をはるかに凌駕する原子・分子レベルの精密さと超高密度集積化能力とが、ともに求められる。

実際に化合物半導体を用い、この困難な課題に挑戦する主なアプローチは、次の3つに分類できる。

- 1) 化合物半導体の単層ないし量子井戸構造エピタキシャル薄膜に、シリコン超LSIの微細加工技術を

Fabrication of compound semiconductor quantum wires and quantum dots (1996年6月4日受理)
Hideki HASEGAWA, Tamotsu HASHIZUME, Hajime FUJIKURA, Takashi FUKUI, Kanji YOH 北海道大学 *量子界面エレクトロニクス研究センター、**工学部電子情報工学専攻 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

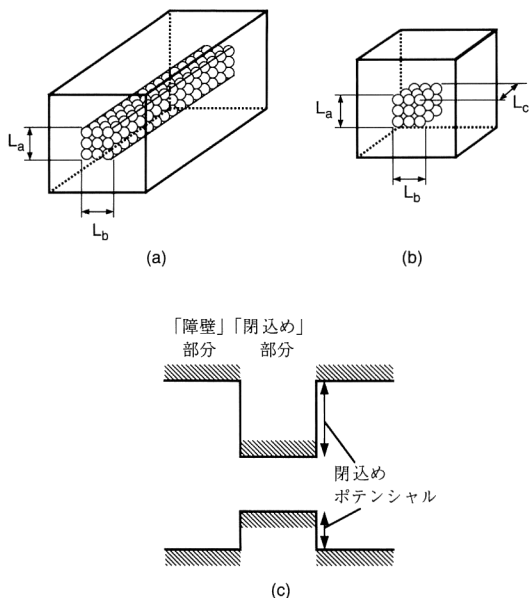


図1 量子細線、量子ドット構造とポテンシャル分布の模式図。

適用し、閉込め部分を直接的に形成する方法。

- 2) ショットキー接合などを利用し、半導体の表面ポテンシャルを変調し、結晶内部に形成された二次元電子ガス (2DEG) を選択的に空乏化して、量子構造を実現する方法。
- 3) 結晶成長機構を巧みに利用して、閉込め部分を結晶成長そのものにより形成する方法。これには、基板表面に特殊な工夫を施し、基板の特定な場所に選択的に結晶成長を促進する「選択成長」と、結晶成長中における原子ステップの運動や、格子定数の異なる材料の成長に伴う歪みに基づく原子の移動等を利用して、平坦な基板上に量子構造アレイを直接形成する「自己組織化」のアプローチがある。

以下では、1), 2), 3)のアプローチについて、その原理や特長、欠点について、より詳細に述べるとともに、実例として、筆者らの北海道大学量子界面エレクトロニクス研究センター（以下、「筆者ら」と略記）で得られているいくつかの最新の成果について紹介する。

2. 結晶の微細加工による量子構造の形成

このアプローチでは、化合物半導体薄膜にシリコン超 LSI と同様の微細加工を加える。具体的には、電子ビーム (EB) 露光法や X 線露光法により微細パターンを形成

の後、ドライエッチングにより加工する方法や、集束イオンビームにより半導体の原子を削り取り、直接パターンを形成する方法などが知られている。加工後に、必要に応じて閉込め部分の上部や端部に結晶を再び成長させ (再成長)、閉込め部分を障壁材料で覆う。

このアプローチは、完成された化合物半導体の精密な結晶成長技術と、最先端のシリコン超 LSI 微細加工技術とを組み合わせるものであり、うまくいくならすぐにも実用化できるという点できわめて実用性が高い。しかし、この方法で実現される量子構造の面内寸法とその精度は、現在のサブミクロン微細加工技術の加工能力で制限され、これは強い量子効果を発揮するためには必ずしも十分ではない。また、加工は半導体結晶の原子の配列を乱しつつ強制的に行われるため、界面に原子尺度の平坦性を求めるのは難しく、また、加工損傷が発生することは避けて通れない¹⁾。また、微細加工後に再成長を行うと、一般に連続成長に比べ界面の特性が劣ることも問題点となる。このため、当初は盛んに検討されたこのアプローチは現在あまり有望視されておらず、今後のブレークスルーが望まれる。

3. 二次元電子ガスの選択的空乏化による量子構造の形成

3.1 量子構造形成の原理と特長

このアプローチでは、化合物半導体ヘテロ接合により形成される量子井戸中の二次元電子ガスを、離れた場所に設けたショットキー電極等からの電界により、選択的に空乏化して量子構造を形成する。その代表的例である「スプリットゲート構造」の原理を図2(a)に示した。半導体表面に金属がある部分とそれが無いゲートのスプリット部分での表面ポテンシャルの差が利用されている。表面の金属パターンの形成には、電子線や X 線のリソグラフィーが用いられる。また、集束イオンビームで表面に損傷を生じさせると、その部分のポテンシャルが変化することを利用して、直接描画によりパターンを形成する方法もある。

この方法の特色は、前項と同様に微細加工技術を用いながらも、キャリアーの存在する領域に直接加工を加えないので、加工損傷がきわめて少ない。しかも、プロセスはきわめて簡単かつ標準的である。また、微細なパターンを用い、そこでの空乏電界を強めれば、原理的には寸法ゼロの、また現実的にも数十～数百 nm 程度の寸法の量子構造が実現できる。また、クーロン力が方向性のない長距離力であるため、表面のパターンに乱れがあつて

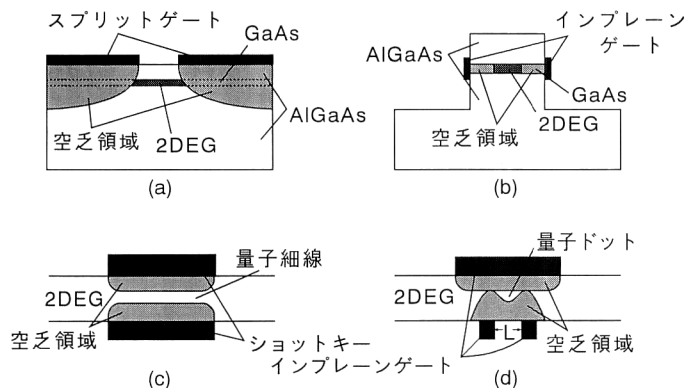


図2 (a)スプリットゲート構造, (b)ショットキーインプレーンゲート構造の原理図, (c)ショットキーインプレーンゲートによる量子細線, (d)ショットキーインプレーンゲートによる単電子トランジスター.

も、内部ではその乱れは急速に平均化して消失する。一方、この方法の欠点は、ヘテロ接合を使うのに比して急峻で強い閉込めポテンシャルが実現しにくいこと、電子と正孔を同時に閉じ込めることが難しいなどである。

この方法によれば、現在の結晶成長技術により極低温で $100 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ 以上の超高移動度が実現できるAlGaAs/GaAs二次元電子ガスを用いて、手軽に欠陥の少ない量子構造を実現できることから、極低温で精密に量子輸送現象を解明する手段としてよく用いられてきた。実際、これを用いた量子ポイントコンタクトにより、コンダクタンスの量子化^{2,3)}や、クーロンブロックード振動⁴⁾がはじめて観測されている。しかし、スプリットゲート構造では、上述のように、電子を急峻で、強いポテンシャルで閉じ込めることが困難である。このため、量子現象の観測はたかだか数百 mK 程度に限られてきた。

3.2 インプレーン型ショットキーゲートをもつ量子構造

筆者らは、最近、スプリットゲートと同じ原理に基づきながら、より強い量子閉込めを実現するショットキー型インプレーンゲート (IPG) 構造を開発した⁵⁾。その原理を図2(b)に示す。スプリットゲート構造ではヘテロ界面に垂直な電界で空乏化するのに対し、この構造では、図2(b)のようにヘテロ界面と平行な電界により電子閉込めを実現する。このため空乏層端の電界が強く、スプリットゲート構造に比べて効果的な電子閉込めが実現できる。

この基本構造を用いて、量子細線や単一量子ドット型単電子トランジスターを実現する原理を図2(c), (d)に示した。二次元電子ガスを含む棒状試料を作り、その端面にインプレーンゲート型ショットキーゲートを形成する。この構造では、量子細線の細線幅や量子ドットの寸

法、付随するトンネル障壁のプロフィールをゲートに印加する電圧によって調整したり、クロック信号などで時間的に変化できる利点がある。一例として、 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の電子密度をもつ無限長の細線の場合、空乏層端の位置を、 0.14 nm/mV の割合で電圧制御できることが示される。

この方法では二次元電子ガス端に直接、微細なショットキー接合を形成する技術がポイントとなる。筆者らは、この方法として、最近、新しい *in-situ* 電気化学プロセスを開発した⁶⁾。このプロセスでは、金属を含む電解液中で、まず、パルス陽極酸化を行い半導体表面の自然酸化膜を溶解し、次にパルスの極性をかえ、金属を堆積する。界面は酸化物をふくまず、かつ、プロセスエネルギーがきわめて小さいため、損傷の少ない界面が実現でき、非常にすぐれたショットキー特性が実現できる。

量子構造の製作には、AlGaAs/GaAs量子井戸をMBE成長し、EBリソグラフィと化学エッチングで棒状に加工し、電気化学プロセスにより、Ptゲートを形成した。一例として、このプロセスによって製作した単一量子ドットをもつ単電子トランジスターの電子顕微鏡 (SEM) 写真を、図3に示す⁷⁾。電気化学プロセスにより、線幅 200 nm のショットキー電極がきちんと形成されていることがわかる。

このようにして形成された量子細線の電子輸送特性を極低温・強磁場下で調べたところ、 $1 \mu\text{m}$ 以上と比較的長い細線長にもかかわらず、明確なコンダクタンスの量子化や磁場によるそのシフト、Shubnikov-de Haas (SdH)振動の挙動から、一次元バリスティック量子輸送特性の存在が確認された⁸⁾。ことに細線幅を $1 \mu\text{m}$ まで絞った試料では、 100 K まで量子化コンダクタンスの第1ステップを観測することができたが、これはAlGaAs/GaAs系細線では、これまでの最高の値であ

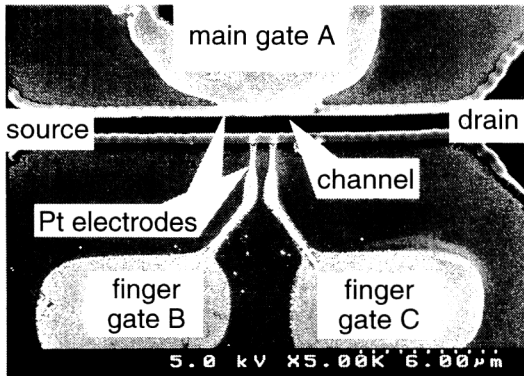


図3 ショットキーインプレーンゲート構造単電子トランジスタのSEM像。

る⁹⁾。また、試作された単一ドットをもつ単電子トランジスタは、すべて、低温で明確なクーロン振動およびクーロンブロッケード特性を示し⁷⁾、ことに図2(d)の $L=200\text{ nm}$ のデバイスでは、クーロン振動を、30 K まで認めることができた。これは従来のスプリットゲートデバイスの数百 mK という値を大幅に改善するものである。シミュレーションによればこの構造で、図2(d)の L の値を 50 nm 程度にすると、77~300 K での動作が期待できる。

4. 加工基板上への選択成長による量子構造の形成

4.1 量子構造形成の原理と特長

「選択成長」には、リソグラフィとエッチングによりあらかじめ結晶表面に凹凸の加工を施した基板を用いる方法と、基板結晶上に絶縁膜マスクを付け部分的に膜を除去した開口部を形成し、そこに結晶を選択的につける方法がある。ここでは簡単のため、前者の基板を「加工基板」、後者を「マスク基板」と呼ぶことにする。

「加工基板」を用いる方法では、まずリソグラフィとエッチング技術により、表面に様々なファセット（小結晶面）からなる凹凸をもつ基板を準備する。次に、この上へ半導体を結晶成長すると、面方位の異なるファセット面での原料原子のマイグレーション、再蒸発、選択的取込み等を反映して、特定のファセット上への選択的成長や新しいファセットの形成等が行われ、条件をうまく設定すると、成長のみによって極微細な量子構造を形成できる。このため、例えば、図4に示すようなV字形の溝の底¹⁰⁾、メサ構造の端面¹¹⁾、あるいは、メサの頂上（リッジ）部分¹²⁾への量子細線・量子ドットの形成等、様々な手法・構造が現在までにMBE法や

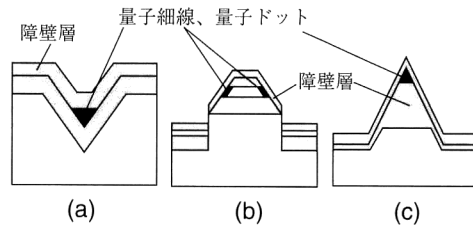


図4 種々の加工基板を用いた量子構造。

MOVPE法を用いて検討され報告されている。

次に、「マスク基板」を用いる方法では、まず基板結晶上に SiO_2 や Si_3N_4 膜等の絶縁膜を堆積させ、通常のリソグラフィ技術とエッチング技術を用い、膜を選択的に除去し、ある結晶方位にそったマスクパターンを形成する。次に、絶縁体マスクで覆われた基板の上に結晶成長を行わせると、適切な条件下では下地の露出したマスク開口部のみに成長が起こり、しかもそれはマスクパターンの形状や配向を反映したファセット面をもつ立体構造となる。そこで、異なる材料を適切に連続成長させると、結晶成長のみにより量子構造が形成される。これまでにMOVPE法を用いて、ファセット量子細線^{13,14)}、多面体量子ドット¹⁵⁾などが形成されている。一方、MBE法でこのアプローチを用いようとするとき、絶縁物マスク上への多結晶の析出が起こり困難であったが、成長時に原子状の水素を照射すると多結晶の析出がぐいとめられ、量子構造の形成が可能であることが判明し¹⁶⁾、MBE法も適用可能となった。

これら選択成長を用いたアプローチの特長としては、(1)加工による損傷や汚染がなく、無欠陥の量子構造が作れる可能性がある、(2)適切な条件下では十分に微細な寸法が実現できる、(3)原子レベルで凸凹のない界面が形成できる、(4)量子構造の形成位置が基板上のパターンによって指定できる、(5)量子構造の寸法が結晶成長の素過程のファセット面上での動的平衡で決定される際には、リソグラフィによる加工のばらつきとは無関係に均一な寸法が実現され、ばらつきが少ない、(6)構造が自由エネルギー最小ないしそれに近い条件を満たして作られると、熱的に安定で信頼性の高い構造となる、等が挙げられる。欠点としては、基板に対する特殊な加工や、成長条件の注意深い最適化が必要とされるため、行程が複雑となることが挙げられる。

4.2 MBE 選択成長による InGaAs 量子細線の形成

「加工基板」を用いた量子構造形成の具体的な例として、筆者らの最新の成果である、MBE法を用いた

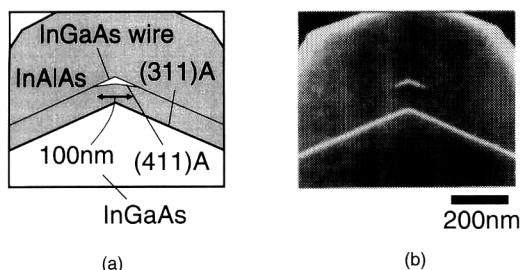


図5 MBE 選択成長による InGaAs 量子細線の断面 SEM 像と模式図。

InGaAs/InAlAs 量子細線の形成について述べる。InGaAs/InAlAs 系は伝導帯不連続量が大きく、電子の有効質量が小さい等の特徴を有しており、非常に有望な量子デバイス材料系である。

製作された量子細線の構造の模式図と SEM 写真を図 5 に示した¹⁷⁾。(0 0 1) InP 基板の上に、フォトリソグラフィとウェット化学エッチングを用い、(1 1 1) A 面を側壁とするメサパターンを形成した加工基板上を準備する。この上に適切な条件下で InGaAs および InAlAs を MBE 成長すると、新ファセットの形成と選択成長により、(3 1 1) A ファセットおよび(4 1 1) A ファセットで囲まれたリッジ量子細線が形成でき、図 5 ではその細線幅は 100 nm である。

この InGaAs リッジ量子細線は、4~290 K の温度範囲で強いフォトルミネセンス発光を示し、しかも空間分解カソードルミネセンス測定によりこの発光が量子細線からの発光であることが確認された。さらに、InGaAs リッジ量子細線に電極を形成し、量子細線トランジスターを製作したところ、ピンチオフ近傍で単電子トンネル現象に基づくクーロン振動が 50 K という高温まで観測された¹⁸⁾。結晶成長により形成した高品質な量子細線を用いることが、単電子デバイスを含めた量子デバイスを実現するために非常に有望な方法であることを示唆している。

4.3 MOVPE 選択成長による GaAs 量子ドットの形成

マスク基板を用いた MOVPE 選択成長の最新の実例として、ここでは、筆者らが正方形の開口部を周期的に配列したパターンをもつ SiN_x マスクを用い、減圧 MOVPE 選択成長法により、(0 0 1) GaAs 基板の上に、AlGaAs/GaAs 量子ドットアレイを実現した例を紹介する¹⁹⁾。減圧横型 MOVPE 装置を用い、成長原料は、III 族原料としてトリメチルガリウム(TMG)、トリエチルアルミニウム(TEAL)、V 族原料にアルシン(AsH₃)、

成長温度は 650~850 °C である。

まず、適切な成長条件下で GaAs を成長すると、正方形の開口部のみに、{0 1 1} ファセットで囲まれた頂上部に平坦部をもつピラミッド構造が選択的に形成される。次にそれを下地として、ピラミッド構造全体を AlGaAs により覆う。その後、GaAs 閉込め層を形成すると、成長の選択性により GaAs は頂上の平坦部のみに成長する。最後に AlGaAs 障壁層を成長することによりピラミッド構造頂上部分に量子ドットが形成される。

この方法の最大の特徴は、形成される量子ドットの寸法が通常のリソグラフィ技術では達成できないほど微細でしかも均一であることにある。これは、最初の GaAs ピラミッドの成長において、ピラミッドの頂上に、出発する開口部の寸法やそのぼらつきとは無関係に、微細かつ一定な形状・寸法をもつ平坦部が形成された後に成長が「自己停止」するからである。ただし、この「自己停止効果」を得るためには、ひとつのマスクの寸法を最大 100 μm 四方程度とし、そのパターンの周囲には GaAs の露出した領域が存在することが必要である。

図 6 にこの成長の自己停止効果を示すデータ¹⁹⁾の例を示した。図 6 は、SiN_x パターンの端部、中央部におけるピラミッド構造の平均頂上幅を原子間力顕微鏡 (AFM) で測定し、成長時間に対してプロットしたものである。成長の初期には中央部における頂上幅が端部よりも狭いが、ある時間の後は、頂上幅はパターン内部のどの位置においても約 30 nm の均一な値をとる。より詳細な検討の結果、自己停止は、過剰な反応種のパターン外部への拡散、および反応種のピラミッド構造への吸着、解離の過程の動的平衡により達成されることが判明した。

この技術を利用した高密度量子ドットの SEM 写真の例を図 7 に示す。電子ビーム露光による 0.2 μm の周期をもつ矩形開口マスクパターン上に、密度 2×10⁹ cm⁻² 程度の均一な量子ドットアレイが実現され、これらドットからの発光も確認されている。

5. 量子構造アレイの自己組織的形成

5.1 量子構造形成の原理と特長

前節で述べた選択成長の特長は、リソグラフィによる加工を出発点として用いるものの、本質的に重要な量子構造の閉込め部分そのものは、結晶が自分自身で形成することにある。その意味で、このアプローチには「自己組織的」要素が含まれているといえよう。これをさら

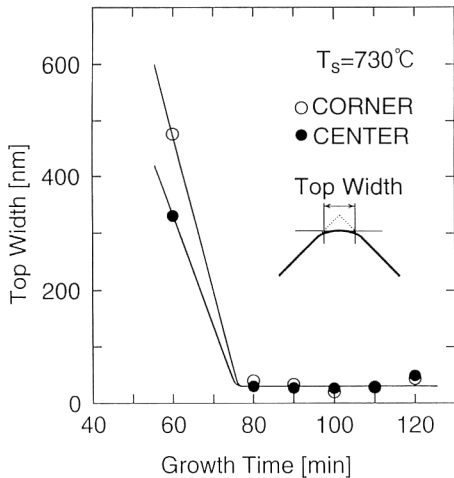


図6 ピラミッド構造の頂上幅の成長時間依存性。

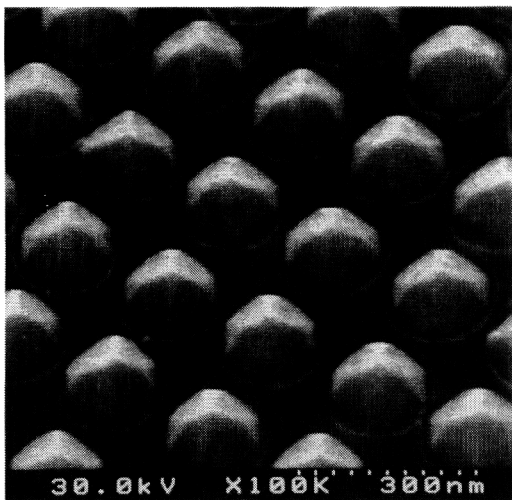


図7 自己停止機構を利用して成長した高密度量子ドットのSEM写真。

に進めると、まったくリソグラフィーの助けを借りずに、成長のみで量子構造アレイを形成するという概念に到達する。すなわち、従来、均一な薄膜結晶を成長するときには、むしろ不均一性の発生する機構として注目を集めてきた固体表面や結晶成長、薄膜堆積における原子・分子の動力学過程を、工学的に制御し積極的に利用して、意図する構造を原子・分子に自己形成させるという考えである。具体的に利用できそうな基礎過程としては、結晶成長表面における選択的化学反应、表面再構成や表面緩和、ファセット面や高指数面での原子・分子のマイグレーションや選択的取込み、再蒸発、置換反応、サーファクタント効果、原子ステップの運動やバンチン

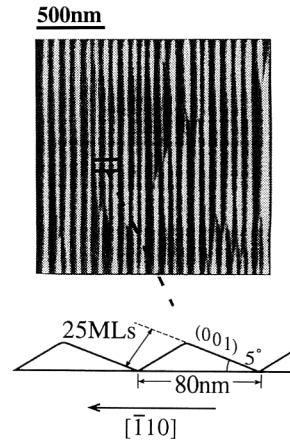


図8 微傾斜基板上に形成した多段原子ステップのAFM像。

グ、種々の歪みの効果などが挙げられる。このようなアプローチを、選択成長も含めて「自己組織的」形成と呼ぶことにすると、これにはまだ一般的な原理があるわけではないが、いくつかその方向の可能性を指し示す興味ある結果が出つつある。ここでは、その具体例として筆者らが試みているいくつかの例を紹介する。

5.2 多段原子ステップを利用した量子細線の形成

微傾斜基板上にMOCVD法によりGaAsを成長する際に、原子ステップが自己組織的に集合する現象があり、「ステップバンチング」と呼ばれる。これを用いると数nmの段差をもつ多段原子ステップの周期的な列を自然に形成することができる。(001)面より[110]方向へ5°傾斜したGaAs基板での、成長後の原子間力顕微鏡による観察例を図8に示した²⁰⁾。高さ7nmのステップが周期80nmで配列し、周期の揺らぎは10%程度である。詳細な検討により、このバンチングの機構は、テラス上を拡散する原子が上段の原子ステップに取り込まれる際に、高いポテンシャルバリアが存在することで説明できることが判明し、モンテカルロシミュレーションでも確認された。

次に、この上に、AlGaAs/GaAs量子井戸構造を成長すると、ステップ端で部分的にGaAsが厚くなる多重量子細線構造が形成され、一次元閉込めを示すことが、透過電子顕微鏡(TEM)およびフォトルミネセンス測定により見出された²¹⁾。さらに、この多段原子ステップの周期構造を変調ドープ構造のチャンネル層に利用した電子波干渉デバイスを作製したところ、極低温で電子の干渉に起因したトランスコンダクタンスの振動を観測できた²²⁾。

5.3 S-Kモード成長によるInAs量子ドットの形成

平坦基板上に異なる格子定数をもつ結晶を成長すると、ある臨界膜厚までは二次元的に均一な薄膜が形成されるが、それ以後、Stranski-Krastanowモード(S-Kモード)と呼ばれる三次元的成長に転じることは従来からよく知られ、従来は、均一な薄膜成長を妨げる「困った問題」であった。しかし、S-Kモード成長の初期は、微粒子的成長が生じるので、見方を変えると、簡便に極微細かつかなり均一な量子ドットが形成できるという利点がある。そこでMBE法を用い、GaAs基板上にInAsやInGaAsドットを成長させる試みが多く行われ、ドットの形状およびサイズの分布と結晶成長条件との関係が明らかにされている²³⁻²⁵。それによれば、横方向の大きさ200~300Å、高さ50Å程度の、偏平ではあるが比較的均一なドットが得られ、その電子デバイスへの応用等も試みられている。

しかし、当然ながら、この方法には基本的にドットの位置制御が困難であるという欠点がある。そこで、ドットの位置制御を可能とする方法が種々試みられているが、筆者らは「加工基板」を用いることを検討し、かなり有望な結果を得た²⁶。例えば、図9に示すように、 $[0\bar{1}1]$ 方向にV溝を形成した加工基板上に成長されたInAsドットは、溝の底部および頂上のみで周期的に配列する。また、作製したInAsドットは、立体的な球に近い形状の多面体構造をしていることも判明し、今後の発展が期待できる。

5.4 InGaAs量子ディスクアレイの自己組織的形成

GaAs(311)B面上に、減圧MOVPE法によりAlGaAs/InGaAsひずみ系を成長すると、フラットなディスク形状をもつInGaAsを閉込め部分とし、その周り

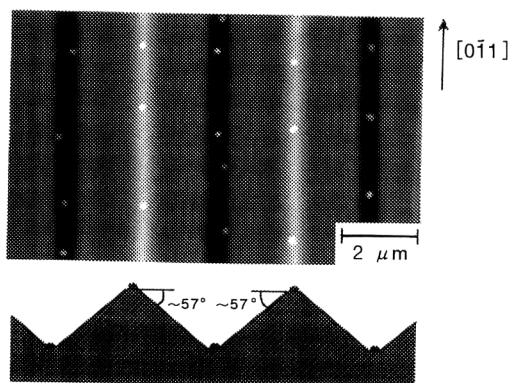


図9 V溝加工基板上に成長したInAsドットのSEM像。

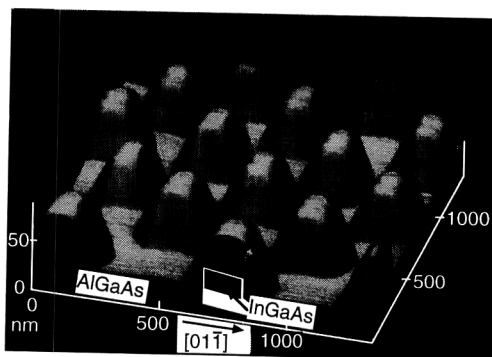


図10 自己組織的成長により形成した量子ディスクアレイのAFM像。

をAlGaAsが覆った量子ディスクアレイがマスクなどをまったく用いることなく自己組織的に形成されることが最近見出された^{27,28}。この成長の方法や条件、アレイの構造や性質は本号の天明らの記事に詳しい²⁹。筆者らは、成長条件と量子ディスクアレイの構造の関連をAFMを用いて調べた²⁸。その観察例を図10に示す。検討の結果、構造のサイズと平均距離(密度)を成長条件によって独立に制御することができ、構造のベース幅の最小値として30nm、密度として $8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 程度が得られることが判明した。この自己組織化による量子構造アレイの形成はInP系材料でも可能である²⁹。できあがったアレイは、室温においても非常にシャープ(半値幅12meV)かつ強いフォトルミネセンス発光を示し、これに基づくレーザーも作られている³⁰。

III-V族化合物半導体を用いて、量子細線・量子ドットを製作する方法の概要と最近の実例を述べた。ことに選択成長を含め、従来、集積回路プロセスで利用されなかった固体表面や結晶成長、薄膜堆積における原子・分子の動力学的過程を工学的に制御し、意図する構造を原子・分子自身に「自己組織的に形成」させるアプローチはきわめて魅力的である。

これはいささか夢物語に思われるかもしれないが、原子の運動の基礎過程を解明しつつ、このようなアプローチを追求していくと、最終的には生物体が適切にコード化された遺伝情報に基づき自己を組織化するのに類似した、真の意味での「自己組織化集積プロセス」を作り出すことも可能となるかもしれない。ここで述べたいいくつかは、すでにこのアプローチの将来に明るい希望を与えているようにも思われる。

文 献

- 1) B. E. Maile, A. Forchel, R. German and D. Grutzmach:

- "Impact of side well recombination on the quantum efficiency of dry etched InGaAs/InP semiconductor wires," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (1989) 1552.
- 2) B. J. van Wees, H. van Houten, C. W. J. Beenakker, J. G. Williamson, L. P. Kouwenhoven, D. van der Marel and C. T. Foxon: "Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas," *Phys. Rev. Lett.*, **60** (1988) 848-850.
 - 3) D. A. Wharam, T. J. Thornton, R. Newbury, M. Pepper, H. Ashmed, J. E. F. Frost, D. G. Hasko, D. C. Peacock, D. A. Ritchie and G. A. C. Jones: "One-dimensional transport and the quantisation of the ballistic resistance," *J. Phys. C*, **21** (1988) L 209-214.
 - 4) L. P. Kouwenhoven, A. T. Johnson, N. C. van der Vaart, A. van der Enden, C. J. P. M. Hartmans and C. T. Foxon: "Quantized current in a quantum dot turnstile," *Z. Phys. B Condens. Matter*, **85** (1991) 381-388.
 - 5) H. Okada, K. Jinushi, N.-J. Wu, T. Hashizume and H. Hasegawa: "Novel wire transistor structure with in-plane gate using direct Schottky contacts to 2DEG," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) 1315-1319.
 - 6) T. Hashizume, J. Schweeger, N. Wu and H. Hasegawa: "Novel *in-situ* electrochemical technology for formation of oxide- and defect-free Schottky contact to GaAs and related low-dimensional structures," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B12** (1994) 2660-2666.
 - 7) K. Jinushi, H. Okada, T. Hashizume and H. Hasegawa: "Novel GaAs-based single-electron transistors with Schottky in-plane gates operating up to 20 K," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) 1132-1139.
 - 8) H. Okada, T. Hashizume and H. Hasegawa: "Transport characterization of Schottky in-plane gate AlGaAs/GaAs quantum wire transistors realized by *in-situ* electrochemical process," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) 6971-6976.
 - 9) T. Hashizume, H. Okada and H. Hasegawa: "Quantum transport in a Schottky in-plane-gate controlled GaAs/AlGaAs quantum well wires," *Proc. 3rd Conf. New Phenomena in Mesoscopic Structures* (1995) pp. 359-361; to be published in *Phys. B* (1996).
 - 10) E. Kapon, D. M. Hwang and R. Bhat: "Stimulated emission in semiconductor quantum wire heterostructures," *Phys. Rev. Lett.*, **63** (1989) 430-433.
 - 11) Y. Nakamura, M. Tsuchiya, J. Motohisa, H. Noge, S. Koshiba and H. Sakaki: "Formation of n-AlGaAs/GaAs edge quantum wire on (111)B micro facet by MBE and magnetic depopulation of quasi-one-dimensional electron gas," *Solid-State Electron.*, **37** (1994) 571-573.
 - 12) H. Akiyama, S. Koshiba, T. Someya, K. Wada, H. Noge, Y. Nakamura, T. Inoshita, A. Shimizu and H. Sakaki: "Thermalization effect on radiative decay of excitons in quantum wires," *Phys. Rev. Lett.*, **72** (1994) 924-927.
 - 13) T. Fukui and S. Ando: "New GaAs quantum wires on (111)B facets by selective MOCVD," *Electron. Lett.*, **16** (1989) 410.
 - 14) Y. Nagamune, S. Tsukamoto, M. Nishioka and Y. Arakawa: "Growth process and mechanism of nano-meter scale GaAs dot-structures using MOVPE selective growth," *J. Cryst. Growth*, **126** (1993) 707.
 - 15) T. Fukui, S. Ando and Y. Tokura: "GaAs tetrahedral quantum dot structures fabricated using selective area metal organic chemical vapor deposition," *Appl. Phys. Lett.*, **18** (1991) 2018.
 - 16) T. Sugaya, M. Kanako, Y. Okada and M. Kawabe: "Fabrication of GaAs quantum wire structures by hydrogen-assisted molecular beam epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) L 1834-L 1836.
 - 17) H. Fujikura and H. Hasegawa: "Photoluminescence and cathodoluminescence investigation of optical properties of InP-based InGaAs ridge quantum wires formed by selective molecular beam epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) 549-555.
 - 18) H. Okada, H. Fujikura, T. Hasizume and H. Hasegawa: "Observation of coulomb blockade oscillations up to 50 K from InP-based InGaAs ridge quantum wires grown by selective molecular beam epitaxy," presented at Extended Abstract of 1996 International Conference on Solid State Devices and Materials (1996).
 - 19) K. Kumakura, K. Nakakoshi, J. Motohisa, T. Fukui and H. Hasegawa: "Novel formation method of quantum dot structures by self-limited selective area metal organic vapor phase epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) 4387.
 - 20) J. Ishizaki, K. Ohkuri and T. Fukui: "Simulation and observation of the step bunching process grown on GaAs (001) vicinal surface by metalorganic vapor phase epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** (1996) 1280-1284.
 - 21) S. Hara, J. Motohisa and T. Fukui: "Formation and characterization of InGaAs strained quantum wires on GaAs multiaatomic steps grown by metalorganic vapor phase epitaxy," to be published in *J. Cryst. Growth*.
 - 22) J. Motohisa, M. Akabori, S. Hara, J. Ishizaki, K. Ohkuri and T. Fukui: "Theoretical and experimental investigation of an electron interference device using multiaatomic steps on vicinal GaAs surfaces," to be published in *Physica B*.
 - 23) J. M. Moisson, F. Houzay, F. Barthe and L. Leprince: "Self-organized growth of regular nano-meter InAs dots on GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1993) 196.
 - 24) P. M. Petroff and S. P. DenBaars: "MBE and MOCVD growth and properties of self-assembling quantum dot array in III-V semiconductor structures," *Superlattices Microstruct.*, **15** (1994) 15.
 - 25) Y. Sugiyama, Y. Sakuma, S. Muto and N. Yokoyama: "Novel InGaAs/GaAs quantum dot structures formed in tetrahedral-shaped recesses on (111)B GaAs substrate using metal organic vapor phase epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, **67** (1995) 256.
 - 26) T. Saitoh, H. Takeuchi, J. Konda and K. Yoh: "Optical characterization of InAs quantum dot fabricated by molecular beam epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) 1370-1374.
 - 27) R. Nötzel, J. Temmyo and T. Tamamura: "Self-organized growth of strained InGaAs quantum disks," *Nature*, **369** (1994) 131.
 - 28) R. Nötzel, T. Fukui, H. Hasegawa, J. Temmyo and T. Tamamura: "Atomic force microscopy study of strained InGaAs quantum disks self-organizing on GaAs (*n*11)B substrate," *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) 2854-2856.
 - 29) 天明二郎, 倉持栄一, 須郷 満, 西谷昭彦, R. Nötzel, 玉村敏昭: "GaAs(3 1 1) B 基板上的 InGaAs 自己組織化現象と極微細レーザーへの応用", *光学*, **25** (1996) 465-466.
 - 30) J. Temmyo, A. Kozen, T. Tamamura, R. Nötzel, T. Fukui and H. Hasegawa: "Self-organization phenomenon of strained InGaAs growth on InP(311) substrates by metal organic vapor phase epitaxy," *Proc. 7th Int. Conf. InP and Related Materials* (1995) p. 766.