

審査の結果の要旨

氏名 車圭晩

単一の自己組織化InAs量子ドットを、マイクロ共振器やナノギャップ電極など極微細構造中の所定の場所に配置し、単一光子発生器や単一電子トランジスタなどの量子情報処理デバイスを実現しようとする研究が近年注目を集めている。しかし、一般に自己組織化量子ドットは空間的にランダムに分布するため、これまで単一量子ドットを用いたデバイスの歩留まりは典型的には数%以下と、極めて低かった。本論文は、”Site- and shape-controlled growth of self-assembled InAs quantum dots and their device applications”（「自己組織化InAs量子ドットの位置・形状制御とデバイスへの応用」）と題し、走査型原子間力顕微鏡（AFM）を用いた陽極酸化を利用し、位置と形状を制御したInAs量子ドットを分子線エピタキシーにより成長し、さらにそれを用いて単一量子ドットトランジスタを作製した結果について論じている。論文は6章より構成されており、英文で記されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べられている。まず自己組織化量子ドットの特徴と量子情報処理デバイスへの応用について紹介した後、これまで行われてきた自己組織化量子ドットの位置制御の試みについて説明している。一般に量子ドットの位置制御では、ナノメートル寸法の極微細ピット（ナノホール）を形成し、その中に量子ドットを成長するが、なかでも最も量子ドットの寸法の制御性がよいと報告されているAFM陽極酸化法を用いた量子ドットの位置制御に注目し、そのプロセスの最適化の必要性と本研究を遂行した動機が述べられている。

第2章では、AFMを用いた陽極酸化プロセスにより形成されるGaAsの陽極酸化物の組成や特性が、陽極酸化時のバイアス電圧や酸化時間、環境湿度などのパラメータに以下に依存するかを系統的に調べている。特に、分子線エピタキシーにおいて問題となるGaAs陽極酸化物の熱的安定性が、陽極酸化時のバイアス電圧に依存し、バイアス電圧が40 Vを境界とし、熱的安定性が大きく変化することを見いだした。その原因を明らかにするために、光電子分光法により陽極酸化物の化学組成を調べ、バイアス電圧が40 V以上では酸化物中にGa₂O₃が形成され、熱的安定性が増すことを明らかにしている。さらにAFMによる陽極酸化時に、AFMチップからの端電界の効果で意図しない場所に導入される酸化物の問題などについても紹介している。

第3章では、上記の問題を解決するため、位置制御量子ドットの成長プロセス、特にAFM陽極酸化における酸化電圧、酸化時間、湿度や基板表面のクリーニング手順などについて、最適化を行っている。その結果、AFM陽極酸化の後、酸化物をエッチングにより除去してナノホールを形成するプロセスが最も適切であることを見いだすと同時に、酸化電圧を制御するだけで直径30-180 nmの位置制御ドットが形成できること、また成長した量子ドットは明瞭なファセットを有し、優れた結晶性を有していることを示している。さらに、間隔を変化させて2つのナノホールを形成するようなAFM陽極酸化を行うと、結合度の異なる2重量子ドットが形成できることも示した。

第4章では、AFM陽極酸化とエッチングで形成したナノホール中での、量子ドットの初期成長過程について論じている。ナノホール上にGaAsバッファ層を成長すると、[110]方向に

伸びた楕円状のナノホールに形が変わる。さらにInAsを供給し、量子ドットを成長すると、基板温度が480 °Cの時にはナノホールの[1-10]方向の側面に2つの量子ドットの核が形成され、さらに[110]方向の側面にも核が形成され、やがて1つの量子ドットになるのに対し、基板温度が500 °Cではナノホールの[110]方向の側面に2つの量子ドットの核が形成され、それらが成長して1つのドットとなることを見いだしている。この成長モードが変化する基板温度が、GaAs表面の再構成が $c(4\times 4)$ から (2×4) に変化する温度に一致することから、成長モードの違いはGaAs表面の再構成と深い関係があると推測している。

第5章では、成長した位置制御量子ドットの評価を行っている。まず、基板温度480 °Cと520 °Cで成長した位置制御量子ドットのサイズを比べると、520 °Cで成長したドットの方が小さく、かつサイズがより均一であると述べている。また、得られた量子ドットをGaAsキャップ層で埋め込んだ構造でフォトルミネッセンスを測定したところ、480 °Cで成長したドットからは発光が観測されず、現在の測定系の感度域よりも長い波長で発光しているか、大きな量子ドットを埋め込んだことによる欠陥の導入の効果ではないかと推測している。一方、520 °Cで成長したドットからは複数のほぼ等間隔のピークを有するフォトルミネッセンスが観測され、ディスク状のInAs量子ドットを仮定した量子準位の間隔におおよそ等しいことから、良好な光学的特性を持つ、比較的サイズのそろった位置制御量子ドットが成長できていると結論している。

第6章では、位置制御量子ドットの単一電子トランジスタ応用について論じている。まず最初に単一電子トランジスタの動作原理について解説している。引き続き、本研究で作製手法を確立した位置制御InAs量子ドットにTi/Auナノギャップ電極を形成し、その特性を評価したところ、明瞭なクーロン梯子、クーロンダイヤモンドが観測され、作製した単一量子ドットトランジスタが、単一電子トランジスタとして動作することを示している。さらにクーロンダイヤモンドの大きさから、量子ドット中の電子軌道には殻構造が形成されていると結論している。

第7章は結論であり、博士論文全体を通してのまとめが記されている。

以上のように本論文は、AFMによるGaAs表面の陽極酸化を用いて量子ドットの位置と形状の制御を目指したものであり、AFM陽極酸化条件、陽極酸化で作製されたナノホール内に量子ドットが成長するときの初期過程や成長した量子ドット形状の成長条件依存性について系統的に調べ、単一電子トランジスタなど自己組織化量子ドットのデバイス応用に新たな展開をもたらしたものであり、電子工学に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。