# 論文の内容の要旨

| | |
|---|---|
| 論文題目 | 分子線エピタキシによる高均一InAs量子ドットの自己配列形成 |
| 学位申請者 | 菅藤　徹 |

本論文では、Stranski-Krastanov(SK)成長モードを利用した分子線エピタキシ(MBE)によるGaAs(001)基板上への高均一InAs量子ドットの自己形成において、InGaAsおよびGaAsSbバッファ層の導入によるInAs量子ドットの面内自己配列現象とその形成メカニズムについてまとめたものである。本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、これまでの量子ドットの配列形成に関する研究の展開と現状を述べ、本論文の位置付けならびに目的と構成について述べた。

第2章では、MBE成長による試料作製プロセスについて述べ、また試料の測定評価装置の概略と測定原理について述べた。

第3章では、GaAs/InGaAs/GaAsダブルヘテロバッファ層のInGaAsバッファ層とGaAs第2バッファ層の成長条件を検討し、その上部のInAs量子ドットの1次元(1D)自己配列形成について述べた。$In_{0.2}Ga_{0.8}As$バッファ層の膜厚を増加させると、その表面には$[1\bar{1}0]$方向に沿ったストライプ状のコラゲーション構造が形成され、その長さや幅そして高さが増大することがわかった。さらにGaAs第2バッファ層を成長すると、GaAs第2バッファ層の表面には、{211}Aファセット面を側面にもつ台形状のメサ型ストライプ構造が形成された。このメサ型ストライプ構造の自己形成は、InGaAsバッファ層のコラゲーション頂上部からGaAs第2バッファ層中に発生した積層欠陥によることがわかった。GaAsメサ型ストライプ上の表面には、GaAs第2バッファ層とInGaAs層の界面で発生したミスフィット転位により、ナノスケールの幅の狭い溝構造やステップ構造が形成された。この結果により、$[1\bar{1}0]$方向のステップ端に沿った数$\mu$mの比較的長くて直線的な1D InAsドット鎖を再現性高く自己形成できることを示した。さらに[110]方向に微傾斜の付いたGaAs(001)基板を用いることにより、ラ

ンダムなドット形成を抑制した1Dドット鎖構造が形成されやすいことを明らかにした。

第4章では、GaAsSb/GaAs(001)層上のInAs量子ドットの高密度化と2次元(2D)自己配列化を見出し、その形成メカニズムについて検討を行った。まずGaAsSbバッファ層の成長におけるSbの表面偏析効果の解析により、表面の高いSb組成に起因して約$1\times10^{11}(cm^{-2})$の高密度なInAs量子ドットを形成できることがわかった。また高密度なInAs量子ドットにおいては、部分的に<010>方向に沿った2D的な面内自己配列現象が発生しやすいことを見出し、これらの現象についてInAs成長過程の観察により検討を進めた。InAsの初期成長においては、<010>方向に沿ったステップ構造を持つ微小な2D島構造が形成され、GaAsSbバッファ層の歪の異方性との関連性が示唆された。InAs成長量を増すと、InAs量子ドットは<010>方向のステップ端に沿って形成され、ドット近傍には微小なナノホールの形成も観察された。またドット鎖の形成領域には、ドット鎖と平行にナノ溝構造が観察された。ナノホールおよびナノ溝は、GaAsSbバッファ層内に形成され、InAs成長に伴うGaAsSbバッファ層側への歪量の増大が主な要因として考えられた。さらにInAs成長を続けると、ナノホールおよびナノ溝の密度、そしてドットおよびドット鎖の密度は高密度化し、<010>方向に沿ったドットの面内自己配列形成を見出した。この高密度ドットの面内自己配列形成は、<010>ステップに沿って並んだドット鎖ならびにナノ溝構造を発端とするモデルによって説明された。GaAs層で埋め込まれた面内配列InAs量子ドットの断面TEM像の観察において転位の発生は観察されず、フォトルミネッセンス(PL)による発光強度も高く良好な結晶性であることがわかった。また狭いPL発光半値幅(約30 meV)を示すことから高均一なInAs量子ドットであることがわかった。

第5章では、本研究で得られた結論をまとめるとともに、今後の展望について述べた。

別紙２

# 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名　菅藤　徹

審査委員主査　山口　浩一

委員　河野　勝泰

委員　名取　晃子

委員　田中　勝己

委員　一色　秀夫

半導体量子ドットは零次元電子系に特有のデルタ関数的な状態密度を有し、様々な次世代デバイスへの応用が期待されている。半導体量子ドットの作製法としては、Stranski-Krastanov（SK）成長モードを用いた自己形成法が一般的であるが、基板面内における量子ドットの自己配列形成の制御は極めて難しく、デバイス応用の展開における重要な課題の一つとして残されていた。

本論文は、SK成長モードを用いた分子線エピタキシ（MBE）によるGaAs(001)基板上へのInAs量子ドットの自己形成において、InGaAs/GaAs歪バッファ層およびGaAsSb/GaAs歪バッファ層の導入を検討し、InAs量子ドットの１次元および2次元自己配列形成法について纏めたものである。本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、従来の量子ドットの配列形成に関する研究の背景を述べ、本論文の位置付けならびに目的と構成について述べている。

第2章では、MBE成長による試料作製および試料の測定評価について述べている。

第3章では、InGaAs/GaAsダブルヘテロバッファ層の導入により、その上の第２GaAsバッファ層は[1-10]方向に沿ったメサ型ストライプ構造となる現象を見出している。このストライプ構造の側面には{211}Aファセット面が現れ、InGaAsバッファ層のコラゲーション頂上部とGaAs第2バッファ層の界面で発生した積層欠陥によって形成されることを明らかにしている。さらにGaAs第2バッファ層とInGaAs層の界面で発生したミスフィット転位は、GaAsストライプ表面上にナノスケールの直線的な溝構造やステップ構造を形成し、この表面上にInAs量子ドットをSK成長させると、[1-10]方向のステップ端に沿った数μmの比較的長くて直線的な１次元InAs量子ドット鎖の構造を再現性高く自己形成できることを明らかにしている。さらに[110]方向に微傾斜の付いたGaAs(001)基板を用いることにより、より多くの量子ドット鎖構造の形成が可能であることも示している。

第4章では、GaAs/GaAsSb/GaAsダブルヘテロバッファ層の導入について検討し、Sb表面偏析効果によるInAs量子ドットの高密度化を実現している。そしてInAsの成長過程を詳細に調べた結果、初期成長における<010>ステップ構造を持つ微小な2D島構造の形成や<010>方向のステップ端での部分的な量子ドット鎖構造の形成を観察し、さらにドット近傍には微小なナノホールやナノ溝構造が形成されることを明らかにしている。これらの量子ドット鎖とナノ溝によって量子ドットが面内に自己配列形成される現象を初めて見出し、新しい自己配列形成のモデルを提案している。また、この面内配列InAs量子ドットの構造観察や発光特性の測定により、均一性の高い良質な結晶性を有することも示している。

第５章では、以上の研究成果を総括的に記述し、今後の課題と展望について述べている。

以上のように、本学位申請論文は、歪バッファ層の導入による半導体量子ドットの１次元および２次元の自己配列形成法を開発したことを纏め、そのメカニズムについて新たな提案を行っている。本研究の成果は、従来困難とされていたSK成長による自己配列形成法に新たな知見を与えると共に量子ドットデバイス応用の工学的観点においても重要な価値がある。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として十分な価値を有するものと認める。