

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 三浦 真

本研究の目的は、Si (001) 基板上に自己形成した Ge 三次元島の形成メカニズムを解明すると共に、Si に埋め込まれた Ge による量子ドット実現に向け、島のサイズの微小化及びサイズ、位置の均一化に指針を与えることである。論文は6つの章から成り立っている。

第一章では背景として、Si に発光特性を持たせることの有用性を、集積回路など Si を用いた電子デバイスに新たな機能を付け加える、また機能を大幅に向上させるといった観点から述べる。また、間接遷移型半導体である Si の発光効率向上のためには、量子ドットによるキャリアの三次元閉じ込めが必要であること、そして人工的な加工を必要としない自己形成三次元構造が、発光効率を考慮した上で量子ドットの実現に向け、極めて大きな可能性をもつことを示す。

第二章では、自己形成半導体三次元構造について、形成プロセス、形態等、構造の形成にかかわる理論的な議論に関して、今までに行われてきた研究を述べる。熱平衡状態における三次元構造の形成に対するエネルギー的な理論と共に、分子線エピタキシー(MBE)法などによる実際の成長の際に生じる、表面拡散等 kinetics の影響についても簡略に述べる。自己形成した三次元構造のサイズ、及び位置を均一化させる最も適した方法である積層構造の作製についても簡単に説明し、埋め込まれた三次元構造の歪みの効果により、積層された三次元構造が徐々にサイズ、位置の均一化を行う過程を示す。また、Si 中に Ge 量子ドットが実現された場合のキャリアの閉じ込めによる擬似直接遷移化、歪みの効果によるバンド構造の変化について、Si の発光効率向上という観点から述べる。

第三章では実験手法を述べる。Ge 島を作製した分子線エピタキシー (MBE) 法について、Si 基板準備から成長過程、装置の概要について述べる。測定法について、フォトルミネッセンス法、原子間力顕微鏡 (AFM)、透過型電子顕微鏡 (TEM)、X 線回折装置について簡略に述べる。

第四章では Si (001) 基板上の Ge 島の形成プロセスについて調べた。Ge 島のサイズ、形状は、成長温度・成長速度等の成長のパラメータに大きく依存するという、今までに知られている傾向をより詳しく調べると共に、不安定でサイズが小さい島の形成プロセスの制御が成長の kinetics の調整により可能であることを示した。成長の kinetics の影響が強い 600 度の成長温度においては、サイズが小さく不安定な島が、より安定でサイズの大きな島よりも選択的に形成され、Ge 膜厚の調整により、サイズの小さな島が高密度で得られ

ることが分かった。また、Ge 島を SiGe に混晶化する、歪みを有効に利用した構造の作製で、島の下部の Ge 二次元層厚を薄くする、といった工夫を施すことにより、Ge 島への Ge 原子の取り込みを抑制し、微小な Ge 島が高密度で作製可能であることを示した。

第五章では、島の積層構造がもたらす島のサイズ均一化について調べ、さらに積層構造は埋め込まれた島上への Ge 島の選択的成長、微小な島の安定化等をもたらすことを見出した。異なる温度での Ge 島のサイズ、位置の均一化について、成長温度 600 度では、Ge 島層の間の Si 層がある一定の膜厚を有するときのみ島のサイズ、位置の均一化が起こり、均一化は島のサイズの増大、密度の減少を必然的に伴うことを示した。一方、成長温度が 525 度と低い場合においては、同様にサイズ、位置の均一化は起こるものの、成長の kinetics の影響で島のサイズは減少し、密度は増加することが分かり、微小かつ均一で高密度の島の作製に有効であることを示した。Ge 島積層構造において Si 中間層を薄くすることにより、埋め込まれた Ge 島のサイズ、密度の正確な再現を上部の Ge 層において可能にし、さらにサイズが小さく、熱的に不安定な島が上部 Ge 層では安定化することを示した。この現象を利用して、低温で成長した微小な Ge 島の上に、Si 中間層を介して高温で成長した Ge 島を作製するという新しい構造を提案し、埋め込まれた低温成長微小 Ge 島が、上部 Ge 島の大幅なサイズの減少、密度の増加をもたらすことを示した。このことにより、結晶欠陥の少ない高温領域における微小で均一、かつ高密度な Ge 島の作製に指針を与えた。

第六章では総括として、Si 上への Ge 島の形成プロセスを、成長の kinetics の影響という観点から明らかにし、さらに島の積層構造を利用することにより、島のサイズ、位置の均一化と共にサイズの減少、密度の増加を可能にした。

以上を要するに、本論文では、Si を母体とする量子構造材料として Ge 量子ドットを取り上げ、その形成機構の解明と、実用化に向けた制御性の向上に関して、極めて有意義な知見を得ており、物性工学の進展に寄与するところが大きい。

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。