

審査の結果の要旨

氏名 八子 基樹

シリコン (Si) チップ上に光回路と電子回路を集積する Si フォトニクス技術は、次世代の基盤情報デバイス技術として有望視されている。Si チップ上にモノリシック集積可能な発光素子、とりわけレーザーの開発が長らく課題となってきた。近年、Si と同じ 14 族元素であり、引っ張り格子ひずみの導入と n 型不純物の添加により光通信波長帯で光放出するゲルマニウム (Ge) 層が有力な Si 上レーザー材料と考えられている。しかし、Si と Ge には 4.2%もの格子定数差が存在するため、Si 基板上の Ge エピタキシャル層には貫通転位が高密度で存在する。貫通転位は Ge 中で電子-正孔対の非発光再結合中心となり、発光効率を悪化させる。Ge 中の貫通転位密度を低減させる試みは 2000 年頃から盛んに行われてきたが、従来は、Ge の融点に迫るほど高温の熱処理を行う、数ミクロンもの厚さの緩衝層を挿入する、といったデバイス集積化の観点からは好ましくない方法であった。

上記の現状を踏まえ、本論文は高温の熱処理や厚い緩衝層に代わる新たな貫通転位密度低減法として、転位にはたらく鏡像力と Ge 層の選択成長技術を用いた方法を提案・実証している。さらに、発光素子への応用に向け、提案した方法により貫通転位密度が低減された Ge 層の発光特性を評価している。本論文は 9 章からなる。

第 1 章は序論であり、Si フォトニクスの現状、Si 基板上発光素子開発の試み、発光素子材料としての Ge の特性をまとめ、Si フォトニクス技術における本論文の意義を述べている。

第 2 章では貫通転位密度低減の検証に先立ち、Ge をレーザー材料として用いる際に貫通転位が与える影響を評価している。Ge 層の内部及び表面で生じる電子-正孔対の非発光再結合についてまとめ、Ge 層の表面を熱酸化することで表面での非発光再結合が抑制され、Ge 層内部の貫通転位を低減する効果が支配的になることを初めて定量的に示している。さらに、既存の貫通転位密度低減法を発光素子への応用という観点から整理し、現状の課題および発光素子に必要な条件を述べている。

第 3 章では転位にはたらく鏡像力と選択成長技術に基づいた新たな貫通転位密度低減法を提案し、理論的に有効性を示している。Si をはじめとする半導体基板上へ線状のヘテロエピタキシャル層を隣接して選択成長すると、ヘテロエピタキシャル層が横方向に成長することで合体した膜構造が形成される。ヘテロエピタキシャル層と基板の境界付近に形成される空隙表面において、鏡像力

による転位の屈曲により転位が終端され、ヘテロエピタキシャル層中の転位の貫通が抑制される結果、貫通転位密度が低減される。ヘテロエピタキシャル層の成長部の面積割合を小さくすることにより、貫通転位密度を 1/100 以下に低減できることを理論的に示している。

第4章は超高真空化学気相堆積法による Ge エピタキシャル層の Si(001)基板への選択成長の実験結果を述べている。前半では、[110]方向に平行な線状 Ge 層を孤立形成した結果を述べており、横方向成長が{113}面の成長速度に正の相関を持つことを明らかにしている。後半では、選択成長 Ge 層同士が合体する様子を実験により示し、前章の計算で仮定した構造を有する Ge 層が作製可能であることを実証している。

第5章では合体した選択成長 Ge 層の貫通転位密度をエッチピット法により測定し、理論的に予想される貫通転位密度の低減が実際に生じていることを示している。理論計算によって予測される転位の空間分布も観察され、鏡像力に由来する貫通転位密度低減効果を実証している。

第6章では透過型電子顕微鏡を用いて Ge 中の貫通転位を直接観察した結果を述べている。(110) 断面観察において理論的に予測される転位の屈曲および空隙による転位の終端が観察されること、(001) 平面観察において前章のエッチピット法と良く一致するような貫通転位密度の減少が確認されることを述べている。すなわち、鏡像力と選択成長技術の応用による貫通転位密度低減効果の実証に成功している。

第7章では合体した選択成長 Ge 層中に引っ張り格子ひずみが導入されること、さらに熱拡散法により Ge を n 型化することでレーザー材料に適した材料特性を得られることを実験的に示している。Ge と Si 基板の界面付近に空隙が導入されることで光のモードが Ge の上部に偏り、一層良好な発光特性を期待できる構造となっていることも明らかにしている。

第8章に合体した選択成長 Ge 層の発光特性を示し、貫通転位密度の減少及び光のモードが Ge 上部に偏ることによって Ge からの発光特性が改善されることを明らかにしている。さらに、ファブリ・ペロー型の共振器構造を作製して光励起による発光評価を行い、従来構造の Ge 層に比べて発光特性が向上することを明らかにしている。

第9章は上記成果の総括である。

以上のように、本論文は鏡像力と選択成長技術に基づく新たな貫通転位密度低減法を提案し、Si 上 Ge 層において新手法の有効性を実証するとともに、Ge 層の発光特性の向上を示しており、発光素子に向けた新しい道筋を指し示す成果を得ている。本論文はマテリアル工学の発展に多大な貢献をするものであり、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。