

氏名(本籍)	鈴野光史(愛知県)			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	博甲第6021号			
学位授与年月日	平成24年3月23日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	高品質ヘテロ界面・低残留キャリア密度鉄シリサイドによる高効率赤外発光受光デバイス			
主査	筑波大学教授	博士(工学)	末益 崇	
副査	筑波大学教授	理学博士	秋本 克洋	
副査	筑波大学教授	工学博士	山部 紀久夫	
副査	筑波大学教授	理学博士	関口 隆史	
副査	茨城大学准教授	博士(工学)	鶴殿 治彦	

論文の内容の要旨

近年、シリコン大規模集積回路において、金属配線での消費電力増大、通信速度遅延、線間ノイズ増大などの問題が顕在化し始めている。これら諸問題を解決すべく、金属配線による電気通信を導波路による光通信に置き換える、光インターコネクションが提唱され、注目を集めている。しかし、光インターコネクション用発光受光素子は未だ基礎研究段階であり、どのような材料が適切か、定まっていない。このような背景の中、候補材料の1つとして半導体 $\beta\text{-FeSi}_2$ が注目されている。資源が豊富で無毒なFeとSiからなり、Siが透明な波長帯である $1.6\mu\text{m}$ で発光し、さらに、 1.0eV 以上の光に対して 10^5cm^{-1} 以上の大きな光吸収係数を持つためである。しかし、発光素子、受光素子ともに室温での外部量子効率 0.01% 以下と非常に小さい。この原因として、Si/ $\beta\text{-FeSi}_2$ ヘテロ界面に多数の欠陥が存在すること、マルチドメインのエピタキシャル膜になっていて結晶粒界に欠陥が多数存在することが挙げられる。本研究では、これら3つの課題に取り組み、高効率発光素子および受光素子を実現することを目標とした。

まず、高品質なSi/ $\beta\text{-FeSi}_2$ ヘテロ界面の形成に取り組んだ。Si(111)面と配向関係にある $\beta\text{-FeSi}_2(110)/(101)$ 面との間には、最大 5.5% の格子不整合率が存在する。ここでは、 $p^+\text{-Si}/\beta\text{-FeSi}_2/n^+\text{-Si}$ ダブルヘテロ構造発光ダイオード(LED)において、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 活性層の膜厚を変化させることで、その発光特性に界面欠陥の及ぼす影響を調べた。具体的には、 $p^+\text{-Si}/\beta\text{-FeSi}_2/n^+\text{-Si}$ ダブルヘテロ構造LEDにおいて、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 活性層の膜厚を 80nm 、 200nm 、 1000nm と変化させることで、その発光特性に界面欠陥が及ぼす影響を調べた。上記3種類のLEDから、室温において $1.6\mu\text{m}$ をピーク波長とする明瞭なエレクトロルミネッセンス(EL)を得た。 $\beta\text{-FeSi}_2$ 層の膜厚増加と共に、発光に必要な注入電流密度が指数関数的に減少し、さらに、活性層の膜厚の増加とともに、同じ電流値で発光強度が大幅に増加した。このため、Si/ $\beta\text{-FeSi}_2$ ヘテロ界面に存在する欠陥が、非発光再結合中心として働いていると考えられる。活性層の膜厚増加とともに発光強度は増加し、活性層活性層膜厚が 1000nm のとき、 450mA の注入電流で、 0.4mW の出力を得た。このときの外部量子効率は 0.12% であった。この値は、Si系LEDの中で最大の値であった。次に、ヘテロ界面での格子不整合の影響を緩和するため、格子整合 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 緩衝層を用いて $n\text{-Si}/\text{SiGe}/\beta\text{-FeSi}_2/\text{SiGe}/p\text{-Si}(001)$ 構造LEDを作製し、光学特性

を評価した。 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 緩衝層と $\beta\text{-FeSi}_2$ 層の格子不整合率は約 0.2% であり、Si(111) 面上での格子不整合率である約 5.5% から 1/10 以下にまで低減されると考えられる。EL は、従来の 1/10 の注入電流密度である約 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 以上で $1.6\mu\text{m}$ 帯において明瞭な EL スペクトルが得られた。このように、実験により、ヘテロ界面の欠陥が発光素子の非発光再結合中心として働いていることを明確にした。続いて、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 薄膜形成時に原子状水素を供給することで、残留キャリア密度低減を目指す実験を行った。その結果、水素背圧 $8 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 、 $8 \times 10^{-5}\text{Pa}$ で成長した試料においては、伝導型が p 型から n 型へと変化し、電子密度は、 10^{18}cm^{-3} 台から 10^{16}cm^{-3} にまで 2 桁以上低下し、移動度は、 $300\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ と 100 倍近く向上した。このようなキャリア密度の低減は、少数キャリア寿命時間の測定でも確認された。このように、原子状水素を導入することで、電気特性が大幅に改善することが分かった。

最後に、開口部を設けたマスクを成長膜下部に用いることにより、マスクにより欠陥の膜上部への伝搬を遮断し、結晶情報のみを膜上部へ伝搬する高品質薄膜成長法であるマイクロチャンネルエピタキシーを、有機金属気相成長法 (MOCVD) で実証しようとした。RDE 法で Si(001) 基板上に成長した $\beta\text{-FeSi}_2$ 結晶を初期核に用いて、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 薄膜の MOCVD 成長を行い、その結晶性・結晶粒サイズを評価した。その結果、はじめに θ - 2θ XRD 測定より、全ての試料で $\beta\text{-FeSi}_2$ (100) 配向が支配的であることを確認した。SiNx マスクに設けた開口部における初期核と MOCVD 成長後の表面 SEM 像を比較したところ、微細パターン内に数個の $\beta\text{-FeSi}_2$ 結晶核が成長していることが確認された。MOCVD 成長後においては、成長速度が遅く成長温度が高い試料ほど、微細パターンのみへの選択的な成長が支配的となった。従って、マイクロチャンネルエピタキシー法に適用可能な選択成長を実現したといえる。

審査の結果の要旨

半導体鉄シリサイド ($\beta\text{-FeSi}_2$) は、資源の豊富な Si と Fe で構成される半導体であり、 $1.6\mu\text{m}$ 帯での EL 発光が得られ、且つ、 1.0eV で 10^5cm^{-1} に達する大きな光吸収係数をもつことから、新しい赤外発光受光材料として注目されている。しかし、発光強度および受光感度が非常に弱く、両者とも量子効率 0.01% 以下であった。この研究では、Si/ $\beta\text{-FeSi}_2$ ヘテロ界面欠陥の改善および $\beta\text{-FeSi}_2$ の残留キャリア密度低減に取り組んだ。特に、p-Si/ $\beta\text{-FeSi}_2$ /n-Si ダブルヘテロ構造 LED において、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 膜厚増加とともに発光強度が増し、 1000nm のときに量子効率が 0.12% 、発光出力が 0.4mW を超えた。この値は、Si 系 LED では最大の値である。また、原子状水素援用 MBE 法で成長した $\beta\text{-FeSi}_2$ では、キャリア密度を従来よりも 2 桁下げること成功し、 $1.31\mu\text{m}$ の光に対し、 $13\text{mA}/\text{W}$ (量子効率 1.2%) を実現した。この値は、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 薄膜の中で最大の値である。 $\beta\text{-FeSi}_2$ 薄膜の結晶成長、電気特性および光学特性について明確な説明があり、質問にも的確に回答した。以上の結果から、 $\beta\text{-FeSi}_2$ は新しい赤外発光受光材料として、今後の実用化が大いに期待されるといえる。

平成 24 年 2 月 13 日、数理学系学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。