

氏名(本籍)	おおつかてるひさ 大塚照久(神奈川県)		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第4605号		
学位授与年月日	平成20年3月25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	環境半導体 β -FeSi ₂ 受光デバイスの研究		
主査	筑波大学教授	工学博士	村上浩一
副査	筑波大学教授	理学博士	秋本克洋
副査	筑波大学教授	理学博士	関口隆史
副査	筑波大学准教授	工学博士	岡田至崇
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	末益崇

論文の内容の要旨

半導体鉄シリサイド (β -FeSi₂) は、資源が豊富で毒性の無い Si と Fe から構成されるため、環境半導体と呼ばれる。禁制帯幅は 0.78eV であり、光通信に用いられる 1.5 μ m 帯に相当する。一方、この波長領域で従来から用いられているのは InGaAs であり、資源の少ない In と有毒な As で構成されている。また、 β -FeSi₂ の光吸収係数は InGaAs の約 10 倍あり、Si 基板上にエピタキシャル成長が可能である。このため、 β -FeSi₂ は InGaAs に代わる受光材料、発光材料として注目され、特に、低温でエレクトロルミネッセンスが初めて報告された 1997 年以降、盛んに研究されてきた。これまで多くの研究が、Si 基板上への β -FeSi₂ 膜の形成と特性評価を中心に行われてきている。しかし、受光素子を例にとると、受光感度を定量的に評価した報告例はなく、そのため、他の材料と優劣を比較することができなかった。また、 β -FeSi₂ 膜を Si 基板上に形成する際に Si 中に Fe が拡散し、Si 禁制帯中に深い準位が形成されることが知られている。そのため、これまで Si 基板上の β -FeSi₂ 薄膜で報告されてきた特性が、本当に β -FeSi₂ 由来のものか、疑念が残る。

このような背景のもと、本研究では β -FeSi₂ バルクの受光特性を評価し、 β -FeSi₂ の可能性を明らかにすることを目的に研究を行った。バルク結晶を用いることで、 β -FeSi₂ のみの特性を評価できる。これまで、 β -FeSi₂ バルクの結晶成長は多数行われているが、受光感度を定量的に評価した報告例は無い。

まず、化学気相輸送法を用いて、プレート状の β -FeSi₂ バルク単結晶を形成した。成長時の Si および Fe 原料の温度を 1000°C に、また、成長側を 750°C 程度とした。ホール測定の結果、 β -FeSi₂ は n 型でキャリア密度は 10¹⁸cm⁻³ 台、移動度は 1-2cm²/Vs であった。次に、 β -FeSi₂ にボンディング法により Al 線を固定してショットキー接合を表面に、裏面に In でオーミック電極を形成した。電流電圧特性から、リーク電流は存在するものの、Al 電極が正の時に電流が大きくなり、明確な整流性が得られた。光の照射位置をスキャンしたところ、Al 電極の周囲で最も Responsivity が大きくなった。このことは、光照射によって生じた電子・正孔対が、Al 電極下の内蔵電位により分離され、外部回路に電流として検出されたことを示している。さらに、波長を変えて光を照射し Responsivity を測定したところ、波長 1.3 μ m 付近で最大となった。特に、成長温度を超える 800°C で 8 時間アニールした試料では、58mA/W となった。これは、この波長で量子効率 5.5% に

相当し、従来 $\beta\text{-FeSi}_2$ 膜で報告されてきた値の 100 倍を超える。この測定では、Al 電極下の $\beta\text{-FeSi}_2$ には光が照射されないため、仮に、Al 電極下の $\beta\text{-FeSi}_2$ 全面に光が照射された場合に期待される Responsivity を見積もったところ、約 0.26A/W になることが分かった。これは、量子効率で 20% 以上に相当する。このように、 $\beta\text{-FeSi}_2$ バルク結晶は、赤外領域の受光材料として大きな可能性を持っていることが分かった。Responsivity の向上は高温アニールによるが、化学気相輸送法での成長温度である 750°C よりも低温では効果がなく、それよりも僅かに高い 800°C が最も効果があり、さらに高温の 850°C では逆効果であることが判明した。800°C で 8 時間アニールすると、as-grown の試料に比べて、Responsivity が約 2 倍に大きくなった。このように $\beta\text{-FeSi}_2$ を成長温度よりも僅かに高温でアニールすることで、Responsivity が向上する理由を検討するため、EBIC (Electron Beam Induced Current) 法を用いて、 $\beta\text{-FeSi}_2$ の拡散長を測定した。これまで、 $\beta\text{-FeSi}_2$ の拡散長は報告例が無い。EBIC では、電子線入射により $\beta\text{-FeSi}_2$ 中に電子・正孔対が生成され、これが内蔵電位のある領域まで拡散することで、外部回路に電流 (EBIC 電流) として検知される仕組みを利用する。この時、外部回路を流れる EBIC 電流の大小を電子線の入射位置により画像化したのが EBIC 像になる。EBIC 電流の大きさは、Al 電極からの距離に対し、指数関数的な依存関係があり、これから、拡散長を求めた。その結果、as-grown の試料では拡散長が約 20 μm 、アニールを 800°C で 8 時間行った試料では約 30 μm となり、予想よりも桁違いに大きい値であることが判明した。また、電子線の加速電圧を 5kV から 20kV まで変化して測定したところ、5kV の時には拡散長がやや短くなるものの、加速電圧が大きくなるにしたがって、EBIC で得られる拡散長は一定になった。これは、加速電圧が小さいときは、電子線の侵入が浅いため欠陥の多い表面の影響を受けて拡散長が低下し、また、加速電圧が大きいときは $\beta\text{-FeSi}_2$ 内部まで電子線が侵入するが、ここでは結晶が高品質のため、加速電圧に余り依存しない拡散長が得られたものと推測できる。成長後のアニールにより、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 内部で実際にどのようなことが生じているのかを解明する必要があるが、少なくとも本研究により、 $\beta\text{-FeSi}_2$ の Responsivity が現状の $\beta\text{-FeSi}_2$ 結晶でも実用に迫る値であることが初めて明らかになった。今後、反射防止膜等を表面に形成して、 $\beta\text{-FeSi}_2$ への光の取り込みを改善することで、量子効率が 50% を超える受光デバイスが遠くない将来に実現できると思われる。また、バルク結晶で培った知見を薄膜に応用することで、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 薄膜においても大きな Responsivity を示す受光デバイスの作製が期待される。

審査の結果の要旨

$\beta\text{-FeSi}_2$ は資源が豊富で毒性の無い Si と Fe で構成され、非常に大きな光吸収係数をもつため、これからの時代に適合した受光デバイス用の半導体と考えられ、注目されてきた。この材料の受光デバイスとしての可能性を見極めるには、Responsivity を評価する必要がある。この研究では、化学気相輸送法で成長した $\beta\text{-FeSi}_2$ バルク結晶を取り上げ、これを用いてショットキーダイオードを形成して受光特性を評価した。その結果、800°C で 8 時間のアニールを行うことで、1.31 μm の光に対して Responsivity が 58mA/W と従来 $\beta\text{-FeSi}_2$ 薄膜で報告された値の 100 倍以上であった。また、EBIC 法を用いて $\beta\text{-FeSi}_2$ の拡散長を初めて測定したところ、as-grown で約 20 μm 、800°C で 8 時間のアニールを行うと約 30 μm に向上することが分かった。以上の結果から、 $\beta\text{-FeSi}_2$ は InGaAs に代わる次世代の半導体として今後の研究が大いに期待されるといえる。

よって、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。