

氏名・(本籍)	みずきとしお 水 木 敏 雄 (富山県)
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工博甲第 7 号
学位授与の日付	昭 和 56 年 3 月 28 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当 電子科学研究科 電子材料科学専攻
学位論文題目	InGaSb-GaAlSb 系ヘテロ接合に関する研究
論文審査委員	(委員長) 教授 山田祥二 助教授 助川徳三 助教授 藤安 洋 教授 萩野 實 助教授 熊川征司 教授 水品静夫

論文内容の要旨

光ファイバの低損失化が進み、光波長 $1.55\mu\text{m}$ 付近で最小値 0.2dB/km をとる低損失ファイバが開発されるに至り、これを伝送路とした光通信システムの実用化が間近になった。これにともなうこの波長領域に適合した受光素子の開発が、緊急課題となっている。Ⅲ—V 族化合物半導体は、ヘテロ接合とすることにより高効率、高速応答受光素子を製作できるので、受光素子の構成材料として優れている。さらに高性能受光素子を製作するためには、界面準位密度が低く、クロスドーピングの少ない高品質ヘテロ接合を必要とする。InGaSb-GaAlSb 系ヘテロ接合は、光ファイバの低損失領域によく適合する波長範囲で光応答が期待できる。また格子整合をとり易く、低温度で LPE (liquid-phase-epitaxial) 成長できるので、高品質ヘテロ接合を得るのに適する。さらに GaAlSb に対して電子のイオン化率と正孔のイオン化率の差が大きいため、低雑音の LPD (avalanche photo diode) が期待できる。本論文は、光通信用受光素子の開発を目的としておこなった InGaSb-GaAlSb ヘテロ接合に関する研究をまとめたものである。

所定の組成をもつ InGaSb 層および GaAlSb 層を LPE 成長するためには、In-Ga-Sb 系および Ga-Al-Sb 系平衡状態図が不可欠である。しかし未だ詳細な状態図は、報告されていない。まずそれを作製するため、Hall の溶解度測定法で液相線を測定した。ついで種々の組成をもつ溶液から LPE 成長した結晶の組成を X 線マイクロアナライザで求め、液相組成と固相組成の関係すなわち固相線を測定した。測定値を熱力学的理論に基づく計算値と比較検討した。In-Ga-Sb 系に対して従来報告された MDLP (modified delta lattice parameter) モデルおよび他のモデルおよび他のモデルを用いて計算した値は、測定値に一致しなかった。本研究においてこの原因がモデルではなく熱力学定数にあることを見出し、熱力学定数を修正して、MDLP モデルにより計算したとこ

ろ、400~600℃の温度範囲にわたって測定値によく一致する計算値を得た。これよりMDLPモデルの妥当性がわかった。Ga-Al-Sb系に対しては正則溶液モデルによる計算値が、300~600℃の温度範囲にわたって測定値によく合うことがわかった。このように実験および熱力学的理論により平衡状態図を完成した。

得られた状態図を基礎にして結晶成長をおこなった。基板はGaSb(111)B面を用いた。再現性の良い成長をおこなうためには、基板表面の酸化膜を除去し溶液とのぬれをよくすること、および成長用溶液の組成を均一化することが必要である。成長前に基板および成長用溶液を水素気流中で650℃で2時間熱処理をした。その後温度を490℃に下げ、GaSb基板上にInGaSb層、ついでGaAlSb層を徐冷速度4℃/hourで成長した。この結果ヘテロ接合が、再現性よく成長できるようになった。各成長層の組成分布をX線マイクロアナライザで測定した。組成は成長方向に均一分布し、成長層内で格子定数が変化しないことがわかった。X線二結晶法による格子定数の相対測定より、 $\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{Sb}$ 層に対して格子整合をとるには $\text{In}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{Sb}$ 層を成長すればよいことがわかった。種々な組成をもつInGaSb層およびGaAlSb層の格子定数を測定し、格子定数が組成に比例して変化することがわかった。したがって任意の組成GaAlSbの層に対して格子整合するようなInGaSb層の組成を決めることができる。このようにして高性能受光素子を製作するために必要な高品質ヘテロ接合が得られるようになった。

$\text{n}^+\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{Sb}-\text{pIn}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{Sb}$ および $\text{p}^+\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{Sb}-\text{nIn}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{Sb}$ フォトダイオードを製作した。前者は0.9~1.9 μm 波長領域、後者は1.1~1.8 μm 波長領域で感度を得た。これら各フォトダイオードの感度領域は、目的とする光ファイバの低損失波長領域によく適合した。 $\text{n}^+\text{GaAlSb}-\text{pInGaSb}$ フォトダイオードにて32%、 $\text{p}^+\text{GaAlSb}-\text{nInGaSb}$ フォトダイオードにて43%の外部量子効率を、零バイアス時波長1.5 μm 付近で得た。後者の値は、零バイアス時の空乏層幅0.129 μm InGaSb層の正孔の拡散長1.5 μm より予想される効率にほぼ合う。効率をさらに高くするためには、InGaSb層の不純物濃度をさらに低くし、空乏層を広げる必要がある。本研究で得たもっとも低い不純物濃度は、アンドープP形InGaSb層については $7.0 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 、Teドープn形InGaSb層については $1.45 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ であったが、この値は成長用溶液中の残留不純物によって制限されていると考えられる。材料の高純度化によって、さらに低くすることが可能である。

一方GaAlSb層の不純物濃度は、面抵抗およびオーミック接触抵抗を下げるため高くすることが望ましい。Geドープにより $1.09 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ の高不純物濃度を得た。この層に対してAu-Zn合金により低いオーミック接触抵抗を得た。

本研究によって、InGaSb-GaAlSb系ヘテロ接合フォトダイオードの基礎が確立できた。このダイオードは、光ファイバの低損失波長領域1.1~1.7 μm とよく合致した波長領域で光応答を示し、今後さらに製作技術を改良することにより高性能の光通信用受光素子として期待できることがわかった。