

氏 名	く ぜ なお ひろ 久 世 直 洋
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3683 号
学位授与の日付	平 成 14 年 7 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	InAs/AlGaAsSb 系量子井戸構造の物性と高感度ホール素子への応用

論文調査委員 (主 査) 教授 松 波 弘 之 教授 藤 田 茂 夫 教授 野 田 進

論 文 内 容 の 要 旨

ホール素子は、小型精密制御ブラシレスモータ用の磁気センサとして、VCR (Video Cassette Recorder), CD-ROM, FD (Floppy Disc) などの駆動部分に広く使われている。今後、自動車や産業機械の動力制御用として非接触で回転や位置検出を行うセンサ、直流を含む電流の非接触検出を可能にするセンサとして、新しい応用が注目されている。新たな用途では、広い温度範囲にわたる安定動作や高い信頼性が必要で、例えば自動車用途では、 $-40\sim 150^{\circ}\text{C}$ の範囲で確実に動作することが要求される。実用の InSb ホール素子は高感度であるが、素子抵抗の温度依存性が $-2\%/^{\circ}\text{C}$ と大きく、その使用は室温周辺に限られている。また、GaAs ホール素子は、高温領域まで駆動できるが、磁界の検出感度が低いという問題がある。InAs は、InSb より禁制帯幅が大きく電子移動度も大きく、有力なホール素子材料であるが、InAs と格子整合する絶縁性の基板が存在せず、高感度 InSb ホール素子に匹敵する高い電子移動度の InAs 薄膜は得られていなかった。

本論文は、電子移動度が InSb に次いで大きく、また InSb に比べて約 2 倍の禁制帯幅をもつ InAs を用いて量子井戸構造を形成し、その電子物性を明らかにするとともに、これを用いて、これまでの技術では実現が難しかった、高感度でかつ温度依存性の小さなホール素子を実現することを目指した研究成果をまとめたもので、6 章からなる。

第 1 章は序論で、本研究の背景、目的、意義について述べてある。磁気センサとしてのホール素子の動向、今後の方向について説明し、高感度で耐熱性に優れたホール素子の要求特性について論じている。

第 2 章では、本研究において薄膜成長に用いた分子線エピタキシー (MBE) 法、ならびに薄膜の光学的特性、電気的特性評価法、ホール素子の特性評価法について述べてある。

第 3 章では、まず、InAs に格子整合する絶縁性の Sb 系 III 族半導体緩衝層の MBE 成長について詳しく述べてある。ベガード則を利用して、InAs に格子整合する緩衝層の組成が、 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}_{0.12}\text{Sb}_{0.88}$ や $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$ などであることを示している。次に、AlGaAsSb 緩衝層の MBE 成長を検討し、AlGaAsSb の格子緩和が非常に速く、約 7 原子層で格子緩和するという特徴を見いだしている。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$ の電気的特性を評価し、Al 組成が増加するにつれてその抵抗率が急激に上昇することを見出している。 x が 0.5 以上で $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$ の抵抗率は InAs の抵抗率より 6 桁以上高くなり、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$ ($x \geq 0.5$) 緩衝層が、InAs 層に対する絶縁性障壁層として機能することを明らかにしている。

第 4 章では、InAs とこれに格子整合する Sb 系 III 族半導体緩衝層からなるダブルヘテロ構造のバンド構造と MBE 成長について述べている。まず、この InAs 量子井戸構造のバンド構造図を理論的に求めた結果、タイプ II-横ずれ型の量子井戸構造であり、伝導帯のバンド不連続性が $1.1\sim 1.3\text{ eV}$ と大きく、非常に深い量子井戸を形成していることを示している。ついで、InAs 量子井戸構造のキャリア濃度の温度依存性を基に、AlGaAsSb 層の伝導帯から $\sim 0.88\text{ eV}$ の位置に不純物 Deep Level (深い準位) が存在し、これが InAs 量子井戸層へのキャリア供給源になっていることを示唆している。

ついで、MBE 成長条件を詳細に検討し、高い電子移動度が得られる InAs 量子井戸構造の成長技術を確認している。結晶成長時の基板温度を厳密に制御することの必要性を明らかにしている。 As_4/Sb_4 比および As_4/In 比を最適化し、AlGaAsSb 緩衝層 (下部障壁層) 600 nm, InAs 層 15 nm, AlGaAsSb (上部障壁層) 35 nm, GaAsSb キャップ層 10 nm と

いう構造で、不純物を添加することなく、 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ という高いキャリア濃度と、 $32,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ というバルク InAs と同等のきわめて高い電子移動度（室温）を初めて実現している。

第5章では、InAs 量子井戸構造のホール素子への応用を述べている。ホール素子の製作プロセスおよび素子構造を検討して、ホール素子を試作し、その電気特性、温度依存性、磁束密度依存性を調べ、さらに信頼性試験を行って、InAs 量子井戸構造型ホール素子の特性を明らかにしている。AlGaAsSb 障壁層組成が Al/Ga 比=0.65/0.35の InAs 量子井戸構造を用いて、磁界検出で InSb ホール素子と同等以上の高感度特性をもち、GaAs ホール素子並みに温度依存性が小さく、 -80°C の低温から 180°C の高温まで広い温度範囲で駆動できるホール素子を初めて実現している。

第6章では、得られた結果を各章ごとにまとめて結論とし、InAs 量子井戸構造の今後の展望を述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、分子線エピタキシー法を用いて半導体 InAs/AlGaAsSb 系の量子井戸構造を作製し、その電子物性を明らかにするとともに、これを用いて、高感度かつ温度依存性の小さなホール素子を実現する研究をまとめたもので、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. InAs に格子整合する Sb 系Ⅲ族半導体緩衝層として $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}_{0.12}\text{Sb}_{0.88}$ や $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$ を GaAs 基板上に成長させ、AlGaAsSb 系が約 7 原子層で格子緩和することを見出し、Al 組成の増加につれてその抵抗率が急激に上昇して、InAs の抵抗率より 6 桁以上高くなることを見いだした。
2. InAs 層の両側を AlGaAsSb 系障壁層で挿んだ量子井戸構造で、 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の大きなキャリア濃度と $32,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の高電子移動度をもつものを作製する条件を確立した。
3. InAs/AlGaAsSb 系量子井戸構造のバンド構造図を理論的に求め、タイプ II-横ずれ型の量子井戸構造であり、伝導帯の不連続性が $1.1 \sim 1.3 \text{ eV}$ と大きく、非常に深い量子井戸を形成していることを明らかにした。また、この量子井戸構造のキャリア濃度の温度依存性を基に、AlGaAsSb 層の伝導帯から $\sim 0.88 \text{ eV}$ の位置に不純物 Deep Level が存在し、これが InAs 量子井戸層へのキャリア供給源になっていると推測した。
4. この量子井戸構造を磁気センサに応用するためのプロセス技術を検討し、ホール素子を試作・評価した。InSb ホール素子と同等以上の磁界検出感度を達成し、GaAs ホール素子並みに温度依存性が小さく、 -80°C から 180°C まで広い温度範囲で駆動できるものをはじめて実現した。

以上要するに、本論文は、InAs/AlGaAsSb 系量子井戸構造のホール素子応用に関するもので、高感度磁界検出特性を有し、その特性が 180°C 程度の高温まで変化しないデバイスを実現した経過を述べている。今後、自動車などの動力制御用のセンサとして期待される。基礎物性の解明から高性能デバイス実現にわたる広い内容で、得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成14年5月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。