

|                     |                                                                                   |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Title</b>        | 分子線エピタキシー(MBE)法により成長した<br>GaAs(111)B上MnAs/InAs/MnAsダブルヘテロ構造の<br>縦型スピndeバイス応用      |
| <b>Author(s)</b>    | MD TAUHIDUL ISLAM                                                                 |
| <b>Citation</b>     |                                                                                   |
| <b>Issue Date</b>   | 2025-03                                                                           |
| <b>Type</b>         | Thesis or Dissertation                                                            |
| <b>Text version</b> | ETD                                                                               |
| <b>URL</b>          | <a href="http://hdl.handle.net/10119/19931">http://hdl.handle.net/10119/19931</a> |
| <b>Rights</b>       |                                                                                   |
| <b>Description</b>  | Supervisor: 赤堀 誠志, 先端科学技術研究科, 博士                                                  |

|               |                                                                                                                                |               |     |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----|
| 氏 名           | ISLAM, Md Tauhidul                                                                                                             |               |     |
| 学 位 の 種 類     | 博士（マテリアルサイエンス）                                                                                                                 |               |     |
| 学 位 記 番 号     | 博材第 595 号                                                                                                                      |               |     |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 令和 7 年 3 月 21 日                                                                                                                |               |     |
| 論 文 題 目       | Vertical spintronic device application of MnAs/InAs/MnAs double heterostructure on GaAs (111)B by molecular beam epitaxy (MBE) |               |     |
| 論 文 審 査 委 員   | 赤堀 誠志                                                                                                                          | 北陸先端科学技術大学院大学 | 准教授 |
|               | 大島 義文                                                                                                                          | 同             | 教授  |
|               | 鈴木 寿一                                                                                                                          | 同             | 教授  |
|               | 高村 由起子                                                                                                                         | 同             | 教授  |
|               | 眞砂 卓史                                                                                                                          | 福岡大学          | 教授  |

論文の内容の要旨

Spintronics, or spin transport electronics, represents a rapidly evolving field that utilizes the intrinsic spin of electrons, alongside their charge, to develop innovative technologies for data storage, sensing, and computation. Semiconductor spintronics combines the benefits of semiconductors, such as bandgap tunability and carrier modulation, with spin-dependent phenomena, enabling novel devices with enhanced functionality. A key concept in spintronics is the spin field-effect transistor (spin-FET), which uses a gate voltage to modulate spin-polarized currents, offering the potential for low-power, high-speed computing. Spin valves, on the other hand, rely on the relative alignment of magnetizations in ferromagnetic layers to control resistance, forming the foundation of many spintronic devices.

This work explores the growth, characterization, and application of MnAs/InAs/MnAs double heterostructures in vertical spin valve (VSV) devices, combining ferromagnetic MnAs layers with a thick low-temperature-grown InAs (LT-InAs) channel. These heterostructures, grown using molecular beam epitaxy (MBE) on GaAs (111) B substrates, represent a significant step forward in hybrid semiconductor/ferromagnetic spintronic systems. The use of LT-InAs offers advantages in growth combination with MnAs at same temperature but presents challenges in defect management and interface quality.

The growth of LT-InAs was optimized by varying parameters such as the V/III beam equivalent

pressure ratio and growth temperature. Optimized growth conditions yielded samples with minimal surface roughness, high carrier concentration, and n-type conduction, as confirmed by Hall measurements. Structural characterization using X-ray diffraction (XRD) revealed lattice expansion in LT-InAs, attributed to strain relaxation mechanisms. Atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM) showed defect-minimized, uniform surfaces, critical for achieving good-quality interfaces with MnAs layers.

The MnAs/InAs/MnAs heterostructures demonstrated well-defined interfaces, as verified by cross-sectional SEM and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Magnetization measurements revealed distinct coercive fields for the top and bottom MnAs layers, enabling spin-dependent transport in the double heterostructure. Vertical spin valve devices were fabricated using advanced lithography and etching techniques, achieving precise device geometries for current-perpendicular-to-plane (CPP) measurements. Spin valve measurements were performed using AC lock-in method and showed clear resistance changes corresponding to the parallel and antiparallel alignment of the MnAs layers. We achieved a highest of  $\sim 1.2\%$  spin injection efficiency at 240 K measurement temperature.

This work marks the first successful demonstration of a vertical spin valve device using MnAs/thick-InAs/MnAs heterostructures, paving the way for further advancements in semiconductor spintronics. The findings highlight the challenges of impedance mismatch and interface quality but also emphasize the potential of this hybrid material system for efficient spin transport and injection. Future directions include improving LT-InAs growth using advanced techniques like migration-enhanced epitaxy (MEE), reducing impedance mismatch through conductive alloys, and exploring novel device architectures such as gate-all-around spin field-effect transistors (spin-FETs). These advancements will contribute to the realization of high-performance spintronic devices for next-generation technologies.

**Keywords:** Semiconductor spintronics, vertical spin valve, MnAs/InAs/MnAs double heterostructure, molecular beam epitaxy, low-temperature InAs.

## 論文審査の結果の要旨

伝導キャリアのスピン偏極が可能な強磁性体金属電極と大きな Rashba スピン軌道結合を有する半導体チャネルとの複合構造からなるスピン電界効果トランジスタ(スピン FET)は、半導体ベースの代表的なスピントロニクス素子であり、Beyond CMOS 素子の一つとして位置付けられている。一方、集積回路はこれまで Moore 則に従う横型 FET 構造によって発展してきたが、近年は More Moore 技術として Fin 型や縦型 FET 構造等が導入されており、スピン FET についても横型以外の構造による検討は重要と考えられる。

このような背景の下、本論文では縦型のスピン FET に向けた構造として、III-V 半導体用分子線エピタキシー(MBE)装置で形成可能な室温強磁性体金属である六方晶 MnAs と大きな Rashba スピン軌道結合が期待されるナローバンドギャップ半導体 InAs を in-situ で複合化した MnAs/InAs/MnAs ダブルヘテロ構造を提案し、それを六方晶との整合性が高い GaAs(111)B 基板上に様々な InAs 厚さで成長することを目指している。そして、成長した構造の結晶学的・磁氣的・電氣的に評価した結果を論じるとともに、このダブルヘテロ構造と電子線リソグラフィ等の微細加工技術を用いて、縦型スピン FET の前段階となる縦型スピンバルブ素子を試作し、低温・磁場中での電氣的評価を通じて、スピンバルブ信号の観測やその起源、スピン偏極率等に関して論じている。

はじめにダブルヘテロ構造を成長するために、GaAs(111)B 上へ 250°C で成長した MnAs、その上に成長した InAs、さらにその上に成長した MnAs の表面形態を評価した。その結果、素子作製上望ましい平坦性の良い構造を得るには、様々な厚さの InAs を通常の 480°C よりも低い MnAs の温度 250°C で成長することすなわち低温成長が必要であることを見出した。また、作製したダブルヘテロ構造の磁化特性を評価した結果、厚さの異なる上下 MnAs 層に対応した 2 段階の磁化反転が起ることを確認した。他方、GaAs(111)B 上の低温成長 InAs 研究も稀なため、応用上重要となる InAs 単層の結晶構造および電気伝導特性を評価した。その結果、成長温度低下による格子変化と電子密度上昇・移動度低下を見出し、これらが主に低温成長 GaAs で議論されたアンチサイト As に起因するものと推測した。さらに、サブミクロンサイズの縦型スピンバルブ素子を試作し、交流ロックイン法を用いた二端子磁気抵抗(局所スピンバルブ)測定を行った。その結果、95K から 240K の範囲において磁場掃引方向に依存した明瞭な磁気抵抗ピークの観測に成功し、温度上昇に従って磁気抵抗変化が増加することを見出した。また、これらとダブルヘテロ構造の磁化特性および MnAs 単層の磁気抵抗を比較したところ、上下 MnAs が示す異なる反転磁場の間にスピンバルブ素子の磁気抵抗ピークが位置すること、MnAs 単層の磁気抵抗変化ではスピンバルブ素子の磁気抵抗変化が説明できないことを示し、今回の結果が InAs チャネルを介したスピンバルブであると結論付けた。

以上、本論文は、GaAs(111)B 上の MnAs/InAs/MnAs ダブルヘテロ構造について、その作製技術と縦型スピントロニクス素子への応用を実験的に検討したものであり、科学的・技術的にみてスピントロニクス分野の発展に貢献しうる学術的・産業的価値を有する。よって博士(マテリアルサイエンス)の学位論文として十分価値あるものと認めた。