

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 水口将輝

本論文は、半導体および強磁性体のハイブリッド超構造を用いた、室温で大きな磁気抵抗効果を示す材料の開発について述べたものである。現在、ストレージおよびメモリ産業においては、1 inch<sup>2</sup> 当たり 100 Gbit 程度の超大容量記録密度の実現に向けて開発が進められている。要求される記憶容量の大きさは、年率 100 % を超えるスピードで増加しており、2010 年にもテラビット時代を迎えると予想されている。当然、読み取り側の磁気ヘッドにも、現存のものより大きな磁気抵抗効果 (MR 効果) を示し、より磁気感度の高い材料が要求される。また、デバイスへの応用を踏まえれば、室温で大きい MR 効果を示す材料であるということが必須となる。本論文では、室温動作する磁気抵抗効果材料の創製および開発についてを以下の 7 章に大別して論じている。

第 1 章では、本研究の端緒となる様々な磁気抵抗効果について述べられている。現行のデバイスに応用されている素子は室温でも高々 100% 程度の磁気抵抗比しか示さないことが述べられている。また、本研究で応用された半導体/強磁性体ハイブリッド構造に関する最近の研究例や将来性について議論されている。更に、トンネル磁気抵抗効果の MR 比を向上させる試みの一つとして、申請者が取り組んできた、ハーフメタリックなバンド構造を持つと言われる新物質“閃亜鉛鉱型 CrAs”薄膜の GaAs 基板上への作製と物性評価に関する研究についても述べられている。

第 2 章では、本研究において磁気抵抗効果デバイスに利用した、GaAs 基板上に成長した MnSb 金属クラスタの構造特性および磁気特性について述べられている。何種類かの蒸着量の異なる MnSb クラスタを作製した結果を、膜厚の増加に従いクラスタの密度が増し、0.70 nm でクラスタ同士の接触が始まり、その後はクラスタの融合によりサイズが増加することが分かった。また、磁気光学効果および磁化測定の結果、クラスタの接触以前の膜厚では、磁化がバルクの値より小さなものであり、クラスタの融合が磁気特性にも大きな影響を及ぼすことが分かった。

第 3 章では、MnSb、Al、Au の三種類の金属を含んだグラニューラー薄膜について、それぞれの磁気輸送特性を調べた結果が述べられている。MnSb の膜厚に依存して、電流-電圧 (I-V) 特性は大きく変化し、特に、膜厚が 0.70 nm 以下 (クラスタの接触前) であるとき、巨大な MR 効果が観測された。ゼロ磁場では、電圧の増加に従って、電流が 70 V 付近まで直線的に増加していくが、その後急激に増加することが分かった。電流と平行方向に印加磁場を増加していくと、抵抗のジャンプが観測される電圧が高電圧側にシフトし、6,000 Oe 印加状態では、100 V でもジャンプしないことが分かった。この薄膜の MR カーブを室温で測定したところ、非常に大きな MR 効果を観測した。15,000 Oe の磁場印加時で MR 比は 5,400,000 % に達した。このような巨大 MR 効果は、磁場の印加によって、高抵抗状態 (ジャンプ前) および低抵抗状態 (ジャンプ後) の二つの抵抗状態間を電流が遷移するために観測されると考えられる。この薄膜の磁気輸送特性の温度依存性について調べ、半導体的な伝導特性であることを見出し、電流は GaAs 基板側を流れていることを明らかにした。一方、低抵抗状態にスイッチした後の抵抗率は、温度の減少に伴って低くなっており、金属である MnSb を介した伝導形態をとっていることが示唆された。また、測定温度が減少するほど、スイッチの起こる電圧が減少していく挙動は、典型的な電子雪崩 (avalanche breakdown) 現象の特徴に一致した。200 K まで測定温度を下げるとこの電圧範囲ではスイッチが起きないのは、局在化した電子が phonon により誘起されにくくな

り、低抵抗状態にスイッチできないからであると考えられる。GaAs (111)B 基板上に成長した Au テラス構造 (Au の膜厚は 0.20 nm) では、室温で MR 測定を行ったところ、MnSb グラニューラー薄膜と同様に、巨大な MR 効果が観測された。MR 比自体は、7,400%であり、MnSb グラニューラー薄膜よりは小さいが、注目すべきはその動作磁場の値であり、700 Oe の低磁場で、既に MR 曲線は飽和していることが分かる。更に、印加電圧や磁場の掃引速度を制御して、25 Oe というわずかな磁場を印加するだけでおよそ 100%の MR 効果を得ることに成功した。これは、磁気センサーなどへの応用を見据えても、非常に高性能な素子であると言える。

第 4 章では、GaAs (111)B 基板上に成長した自己組織化 MnSb クラスタに GaAs キャップを施したグラニューラー膜で観測される光誘起 MR 効果について述べられている。光を照射しないで磁気抵抗効果の測定を行ったところ、この系においては、Sb 層を用いた系よりも閾値電圧が高くなっていることが分かった。そのため、100 V の電圧を印加しても電圧が充分でないために MR 効果は確認されなかった。ここで、GaAs のバンドギャップ以上のエネルギー (1.49 eV) のレーザーダイオードからの光を試料表面に照射した状態で磁気抵抗効果を測定したところ、MR 効果が確認された。磁気抵抗比は磁場を 800 Oe 印加した時に、20%の値が得られた。

第 5 章では、印加電圧の低減を目指し、リソグラフィーを用いて作製したナノメーターのオーダーの電極間距離を持ったデバイスの構造とその磁気輸送特性について述べられている。Au の平坦膜に FIB で作製したギャップ構造について、ギャップ幅が 500 nm の素子では 30 V 付近、100 nm の素子では 17 V 付近で抵抗のジャンプが起こり、大幅にスイッチング電圧を減少させることに成功したことが分かった。これは、ジャンクション部分の距離あるいは面積が減少したことに加え、MnSb クラスタや Au テラスのように非常に多くのジャンクションを有した系から唯一つのジャンクションを持つ系に、構造を単純化した効果が現れていると考えられる。また、MnSb グラニューラー薄膜について、電極間距離が 10 $\mu$ m であるデバイスを作製し、I-V 特性を調べたところ、5 V という低電圧でスイッチが起きていることが分かった。

第 6 章では、磁気抵抗スイッチ効果のメカニズムについての議論が述べられている。磁場によってスイッチが抑制されるメカニズムは、完全には明らかにされていないが、磁場の印加に伴って電子の軌道がローレンツ力で曲げられ、GaAs を流れている電流が MnSb クラスタとの界面を超えて低抵抗パスに流れにくくなるためにホットキャリアを活性化できず、電子雪崩が起きなくなる効果と、磁場の印加で局在電子の活性化エネルギーが上がるためにホットキャリアが誘起されなくなる二つの効果が影響していると考えられる。本論文の磁気抵抗効果の室温における性能を他の MR 素子と比較すると、MR 比が他の素子と比較して桁違いに大きいことが分かる。更に、これが室温で得られる値であることを考えると、磁気センサーなどへの応用には大きなブレークスルーとなる研究であると結論づけている。

第 7 章では、本論文のまとめおよび今後の展開が述べられている。

以上、本論文は MBE 法を用いて作製した新材料において発見した室温巨大磁気抵抗効果について論じたものである。更に、リソグラフィー技術を用いて電極間距離を減少させることで、スイッチング電圧の低減も達成され、高感度な磁気センサーなどへの応用が期待できる素子の開発にも成功した。本研究の成果は、基礎科学的にも興味深いだけでなく、現在、精力的に研究が行われているスピントロニクス分野への応用という観点からも、非常に大きなインパクトを与えるものである。

以上のことから、本論文は博士 (工学) の学位にふさわしい内容をもつものと判断した。