

論文の内容の要旨

論文題目 Fabrication and Device Application of Huge Magnetoresistance Materials
(超巨大磁気抵抗効果材料の開発とそのデバイス応用に関する研究)

氏名 水口 将輝

現在、ストレージおよびメモリ産業においては、1 inch²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 Tbit 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。この様な観点から、本論文では室温で大きい MR 効果を示す材料の開発を試みた。材料の構造として、既存の技術の延長線上で高い MR 効果を示す素子を作る試みとして、半導体と強磁性体のハイブリッド超構造に注目した。この分野の研究は、スピントロニクスへの応用という観点から、非常に注目を集めており、私も、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も行ってきた。磁気抵抗効果の研究においては、非磁性マトリックス中に強磁性クラスターを埋め込んだグラニューラー系での研究例は多いが、半導体基板上に、クラスターを直接、制御性よく成長し、MR 効果を発現させた例はない。そこで、MnSb ナノサイズクラスターや、Au テラス構造を GaAs 基板上に作製し、磁気輸送特性を調べたところ、室温で 1,000,000 %を超える超巨大 MR 効果を観測することに成功した。また、基板の半導体のバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光の照射下において、MR 比が増大する光誘起 MR 効果も観測され、光スイッチデバイスへの応用も示した。さらに、リソグラフィーを用いてコンタクト距離をナノメートルオーダーにすることで、デバイス応用上で重要な、印加電圧および動作磁場の低減を試み、高い再現性を有した高感度 MR 素子を開発することに成功した。

半導体と金属のハイブリッド構造として、GaAs 基板上に自己組織化成長した MnSb クラスターを含むグラニューラー薄膜、Au テラス構造、リソグラフィーで加工した Au 薄膜ギャップ構造を作製した。薄膜の作製には、分子線エピタキシー(MBE)法を用いた。更に MnSb クラスターの成長には、表面エネルギーを低減する効果のある、硫黄終端化法を用いた。Au 薄膜ギャップ構造は、Au 薄膜を成長後に、フォトリソグラフィーを用いて hall-bar のパターンニングを行った後、集束イオンビーム(FIB)により、一定間隔の空間的ギャップを作った。作製後の試料の表面モフォロジーを、原子間力顕微鏡(AFM)で観察した。素子の磁気輸送特性は、二端子測定法で行い、±15,000 Oe までの磁場を印加した。測定は、200K~293 K の温度領域で行った。

MnSb クラスターは、何種類かの蒸着量の異なる試料を作製した。膜厚の増加に従いクラスターの密度が増し、0.70 nm でクラスター同士の接触が始まり、その後はクラスターの融合によりサイズが増加することが分かった。これらの MnSb クラスターに Sb キャップを施し、それぞれの磁気輸送特性を調べた。MnSb の膜厚に依存して、電流-電圧(I-V)特性は大きく変化した。特に、膜厚が 0.70 nm 以下(クラスターの接触前)であるとき、巨大な MR 効果が観測された。膜厚 0.20 nm の MnSb 薄膜について、I-V 特性の印加磁場依存性を調べた。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。この様な巨大 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。この変位 (スイッチ) に伴って起こる磁気抵抗効果を、“磁気抵抗スイッチ効果”と名付けた。磁場によってスイッチが抑制

されるメカニズムは、完全には明らかになっていないが、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という描像が考えられる。

この薄膜の磁気輸送特性の温度依存性についても調べた。高抵抗状態の抵抗率が、室温では $10^8 \Omega\text{cm}$ 程度であったのに対し、200 K では $10^{11} \Omega\text{cm}$ まで大きく増加しているのが分かる。これは、半導体的な伝導特性であり、電流は GaAs 基板側を流れていることを示していると考えられる。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る。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ている。200 K まで測定温度を下げる则该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膜について、光誘起 MR 効果を調べる実験を行った。まず、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。この値は、Sb 層を用いた系の MR 比に比べると小さいものであるが、室温での値としては十分に大きな値であると言える。

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) の表面構造を観察した結果、表面には Au のテラスがネットワーク状に連結している様子が分かった。この薄膜に Sb キャップを施し、室温で MR 測定を行ったところ、MnSb グラニューラ薄膜と同様に、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、30 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。MnSb グラニューラ薄膜と比較して磁場感度が向上した理由として、マテリアルの差異だけでなく、Au 薄膜がテラスのネットワーク形態をなしているため、そのボトルネックに存在すると思われるジャンクションが、MnSb クラスタ間のジャンクションと異なる構造になっていることに起因しているためと考えられる。

印加電圧の低減を図るために、リソグラフィを用いてナノメートルのオーダーのギャップを持った構造を作製した。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っており、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ている。

本論文の磁気抵抗効果の室温における性能を他の MR 素子と比較してみると、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イクスルーとなる材料の開発に成功したと言えるであろう。