

IV 族強磁性半導体 $\text{Ge}_{1-y}\text{Fe}_y/\text{Ge}:\text{B}/\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ 三層ヘテロ構造における磁気抵抗効果 Magnetoresistance of the Group-IV Ferromagnetic Semiconductor

$\text{Ge}_{1-y}\text{Fe}_y/\text{Ge}:\text{B}/\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ Trilayer Heterostructures

○伴 芳祐、中根 了昌、田中 雅明 (東大院工)

°Yoshisuke Ban, Ryosho Nakane, Masaaki Tanaka (Univ. Tokyo)

E-mail: ban@cryst.t.u-tokyo.ac.jp

Si や Ge をベースにした IV 族強磁性半導体の研究は、現在の Si テクノロジーとの整合性を期待して 10 年以上に渡り行われて来た。我々のグループは Ge に Fe を添加した強磁性半導体 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ の創成を試み、低温分子線エピタキシー(LT-MBE)法により Fe や Fe 化合物の異相の析出がない母材の Ge のダイヤモンド構造を保持した単結晶の強磁性半導体の作製に成功した[1]。 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ は B を同時にドーピングする事で、磁性に関係なくキャリア濃度を変える事が出来る特性を持っており[2]、これは半導体との伝導率不整合の問題のないスピン注入源としての可能性も示唆している。しかし、この材料のスピン依存伝導特性に関しては、未だ良く分かっていない部分が多く残されている。 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ においてスピン偏極電流が生成可能かは課題の一つであり、本研究ではスピン偏極電流による伝導特性が観測されるかを検証する目的で研究を行った。 $\text{Ge}_{1-y}\text{Fe}_y/\text{Ge}:\text{B}(4.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3})/\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ の 3 層構造を SOI (silicon-on-insulator) (001) 基板上に MBE 成長し、低温においてその横伝導特性を観測した。 Ge:B の抵抗は $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ に対して、低温において 1/100 程度の抵抗値であるため、大半の電子は Ge:B 層を伝導し、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{Ge}:\text{B}$ 界面において散乱を受けながら伝導すると考えられる。

本研究では、エピ層のみの伝導特性を明らかにするために、基板に電流が流れる事を防ぐ目的で SOI (001)基板を用いた。この基板は犠牲酸化により表面の Si の膜厚さを 13nm まで薄くして結晶成長を行った。 MBE により 200°C で $\text{Ge}_{1-y}\text{Fe}_y$ ($y = 10.5\%$) 30 nm / Ge:B ($4.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 2.7 – 10 nm / $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ ($x = 14.0\%$) 30 nm / 13 nm SOI (001) sub. の層構造を成長した (Fig.1)。 MBE 成長時の RHEED 像は、 2×2 のストリークを示し、平坦な $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{Ge}:\text{B}$ 界面が形成されている事が分かった。成長した薄膜は $600 \times 50 \mu\text{m}$ の Hall bar 形状の素子に加工し、この素子について低温において磁気伝導特性を測定した。

Fig. 2 (a)に 12 K における Ge:B 3.6 nm の試料の抵抗の磁場依存性の測定結果を示し、(b)に磁場 $H = 0$ を基準とした磁気抵抗比を示す。一定電流下で磁場 H は面内の [110] 方向に印加し、 $H = -1 \text{ T} - 1 \text{ T}$ の範囲で掃引し、4 端子測定により $200 \mu\text{m}$ 幅のチャンネル電極間の電圧を測定した。低い電流値 ($\sim 10 \mu\text{A}$) では磁気抵抗は観測されないが、比較的高い電流値において正の磁気抵抗が観測される傾向が見られた。同試料 (Ge:B 3.6 nm) の 12 K における I - V 特性の測定結果を Fig. 3 に示す。 $600 \mu\text{m}$ のチャンネルに対して 2 端子測定により I - V 測定を行った。その結果 130 V において急激に電流が流れる I - V 特性が観測された。電圧の掃引を往復するとヒステリシスを描く事や、この特性は磁場を印加することによって抑制される事が図より分かる。 Ge:B 2.7 – 10 nm の他の試料についても測定を行った結果、100 V 前後の電圧において同様の特性が観測された。また、磁気抵抗については最大で約 100% の正の磁気抵抗比が観測された。このような磁気抵抗や I - V 特性は、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ や Ge:B の単層膜では観測されなかったため、これらは $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{Ge}:\text{B}$ の接合界面において起こっている現象に由来すると考えられる。これらの測定結果について SQUID により測定した磁化曲線の形と磁気抵抗の形を比較すると、GMR 効果では説明できない。これらの結果は、いずれも異種材料の接合系により観測されている磁気抵抗スイッチ効果[3]と特徴が類似している。さらに詳しい物理的機構については当日に報告する。

本研究の一部は科学研究費補助金(特別推進研究)、先端融合 COE の支援を受けて行われた。

[1] Y. Shuto, M. Tanaka, and S. Sugahara, Appl. Phys. Lett. **90**, 132512 (2007).

[2] Y. Ban, Y. Wakabayashi, R. Akiyama, R. Nakane, and M. Tanaka, AIP Advance **4**, 097108 (2014).

[3] H. Akinaga, M. Mizuguchi, K. Ono and M. Oshima, Appl. Phys. Lett. **76**, 357 (2000).

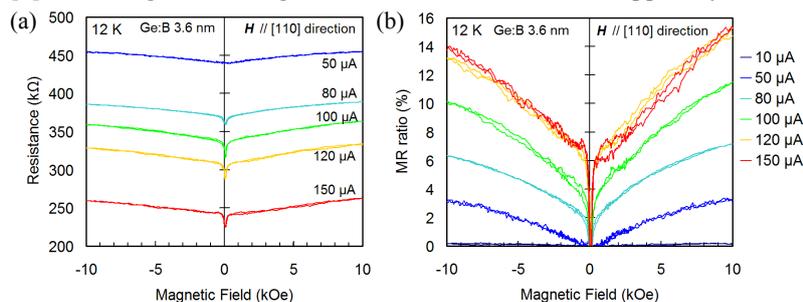


Fig. 2 Magnetoresistance (MR) of the sample with a 3.6-nm-thick Ge:B layer at 12 K. Magnetic field dependence of (a) the resistance and (b) the MR ratio.



Fig. 1 Schematic sample structure

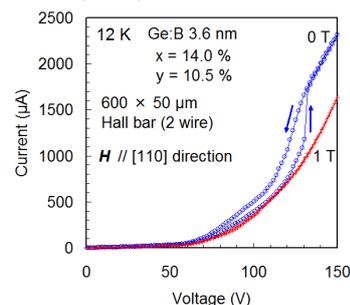


Fig. 3 I - V characteristics of the sample with 3.6 nm Ge:B at 12 K.