

論文の内容の要旨

論文題目

Nanoscale magnetic properties and
spin-dependent transport
in Ge-based ferromagnetic epitaxial films
(Geをベースとした強磁性エピタキシャル薄膜における
ナノスケール磁気物性とスピン依存伝導)

氏名 若林 勇希

本文

現代の情報化社会は Si を用いた集積回路技術によって支えられているが、微細加工の限界が近づいており新たな原理に基づいたデバイスの実現が試みられている。その中でもスピンの自由度を利用して、不揮発性や再構成可能な論理回路を形成可能といった新しい機能を有する Spin-MOSFET や、円偏光を発する Spin-LED のような新たな機能を持ったデバイスを、既存の半導体テクノロジーと組み合わせることで実現しようというのが「半導体スピントロニクス」である。

半導体スピントロニクスにおいて既存の半導体材料基板上にエピタキシャルに成長することができる強磁性材料の作製は重要な課題の一つである。このような材料の代表的なものとして、強磁性半導体や強磁性グラニューラー薄膜のような強磁性エピタキシャル薄膜が挙げられる。このような材料の作製、物性探索を行う上で、どのような既存の半導体材料を母材とするかが重要であるが、本論文では、IV 族半導体 Ge を母材材料として選んだ。Ge は Si と同じダイヤモンド構造を持ち、Si 基板上にエピタキシャルに成長可能で Si テクノロジーと高い整合性を持つ。また、Si よりも高い電子、正孔移動度を持つことから次世代の高性能半導体材料として、世界中の企業、大学などの研究機関で盛んに研究されている。

強磁性半導体は、非磁性半導体の母材を構成する原子の一部を磁性原子で置換したものであり、以下の特徴を有している。

- (1) 母材結晶構造を維持したまま、磁性元素を含む良質な単結晶が作製可能。
- (2) 非磁性半導体とのヘテロ接合とそれを用いた量子構造の作製が可能。

(3) 組成及びキャリアドーピングによるバンドギャップや電気伝導などの制御が可能。

その為デバイスプロセスや集積化の観点から、半導体テクノロジーとの整合性が高い。応用上の観点から強磁性半導体材料に求められる点としては以下の点があげられる。

(A) 室温強磁性である。

(B) E_F 近傍でのスピン分極が大きい。

分子線エピタキシー法により作製された IV 族強磁性半導体 $Ge_{1-x}Fe_x$ 薄膜は母材半導体 Ge と同じダイヤモンド単結晶構造を有し、IV 族半導体材料(Si, Ge)と原子レベルで平坦な界面を持ったヘテロ構造を作製できる。また B を共添加することにより、絶縁体領域から金属領域まで電気抵抗を制御できる。これらの特徴から、Si や Ge への有効なスピン注入源として期待される。しかし最高の強磁性転移温度(T_C)が 210 K と室温に到達しておらず、その強磁性発現機構も全く解明されていない。

本論文では、磁性体中の元素選択的な電子状態、磁化状態の観察が可能な軟 X 線磁気円二色性(XMCD)測定により $Ge_{1-x}Fe_x$ のミクロスコピックな磁化過程を観察し、ナノスケールの Fe 原子濃度の揺らぎが局所的な強磁性領域の成長過程を決めており、強磁性転移温度上昇の為には適切に Fe 原子濃度の揺らぎを大きくすることが必要であることを明らかにした。また、物質のバンド構造やフェルミエネルギー(E_F)の位置を観測可能な角度分解光電子分光 (ARPES)により、 $Ge_{1-x}Fe_x$ のバンド構造を直接観察し、 E_F はバンドギャップ中に位置しており、GeFe の強磁性発現機構は Fe の不純物バンドを介した2重交換相互作用で説明されることを明らかにした。さらに $Ge_{1-x}Fe_x$ 中の E_F でのスピン分極を実証するために、Fe/MgO/ $Ge_{0.935}Fe_{0.065}$ 磁気トンネル接合を作製し、トンネル磁気抵抗(TMR)効果の観測を行うことにより、 $Ge_{1-x}Fe_x$ 薄膜中のキャリアはスピン分極をしており、スピントロニクス応用へ有望であることを示した。

もう一つの Ge 基板上にエピタキシャルに成長することができる強磁性エピタキシャル薄膜として $Ge_{1-x}Mn_x$ 強磁性グラニューラー薄膜がある。これは Mn 濃度が高くダイヤモンド構造と異なる結晶構造を持った強磁性微粒子が、Mn 濃度が低くダイヤモンド構造を保っているマトリックスに埋め込まれた薄膜である。 $Ge_{1-x}Mn_x$ 強磁性グラニューラー薄膜は 200%(磁場 5T、温度 40 K)を超える大きな磁気抵抗を持ち、Ge と整合する磁気センサーとして期待が持たれる。その磁気抵抗は Mn 濃度の高い領域と低い領域とのスピノーダル分解と関連していると考えられているが、そのミクロスコピックな起源は明らかになっていない。

本論文では、XMCD を用いた Mn 濃度の高い強磁性微粒子と Mn 濃度の低い常磁性マトリックス領域の電子・磁化状態を開発し、その手法を用いて $Ge_{1-x}Mn_x$ 強磁性グラニューラー薄膜の強磁性成分と常磁性成分の磁化曲線を分離検出することに成功した。また、それらの磁化曲線の掛け合わせと磁気抵抗の印加磁場依存性が非常によく一致していることを見出し、磁気抵抗の起源は、強磁性微粒子中のスピン分極したホールとマトリックス中の常磁性 Mn 原子との間の一次の磁気散乱であることを明らかにした。

以上の結果から、Ge をベースとした強磁性エピタキシャル薄膜の磁気特性を向上させ、その特異な磁気抵抗を利用した半導体スピントロニクス素子の実現のためには、Ge 中の磁性元素の不均一さを適切に制御することが必要であることがわかった。