

研究成果

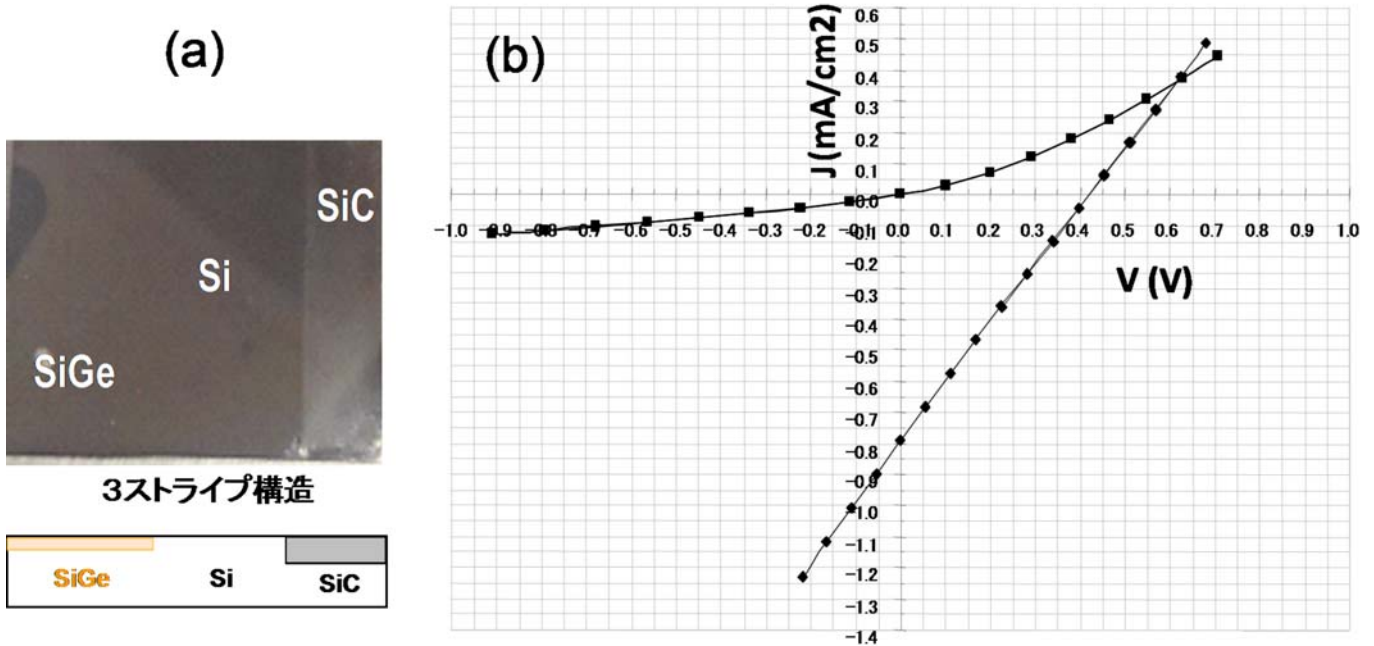
フレキシブル基板上に金属層、半導体層（或いはその両方）の薄膜を形成し、これをロールアップすることにより得られるスパイラルヘテロ構造を基に、極限高潔浄環境を実現するクリーンユニットシステムプラットフォーム(CUSP)を利用して、金属薄膜のエッジ同士が対向した量子十字デバイス、特に次世代超高密度メモリーや、高効率の光電変換素子創製を目指している。ムーアの法則に代表されるロードマップに沿った展開を示しつつも遂に限界が指摘され始めたSiベースのLSIは、その構造が外在的ルールで決まるトップダウン型のシステムの代表格であるが、素子サイズ上、動作パワー上、及び製造設備投資上の限界がいわれて久しい。従来の「ボトムアップとトップダウンの統合」が両者のいいところ取りでナノ構造を作るというものであったのと異なり、当研究室では両者の相互乗り入れを可能とする和集合の観点から取り組んでいる。両者の構成原理が大きく異なるため容易ではないが、もしトップダウン-ボトムアップの両系を繋ぐことができれば、今後ナノテク・ナノサイエンス分野で得られる新しい効果や機能を既存のSiベースのITインフラ構造と接続し相乗効果を引出しつつナノとマクロを結合することができる。トップダウン系に対するアンチテーゼとして最近その重要性が認識されてきた一つの流れは、自律分散型相互作用など内在的ルールにより構造が決まっていくボトムアップ系である。バイオ系に代表される自律分散系その他、たとえば半導体量子ドットなど無機物のセルフアSEMBル系を含め、広くボトムアップ系に期待が集まっている。しかしながら、両系は未だに専ら独立で、トップダウン、ボトムアップ両系の間には橋渡しすることは極めて重要にも係らず、未だ実現されていない。当研究室では、このような課題を解決しながら、新しい量子機能を創出することを目指した研究を実験と理論の両面から進めている。

(a) トップダウン系とボトムアップの接続の基礎、及びスパイラルヘテロ構造応用素子

(a1) 新型光電変換素子と極限高潔浄環境 (Clean Unit System Platform: CUSP) の展開

フォトンの進行方向とフォトキャリアの移動方向を直行させ、かつフォトンの進行方向に沿ってバンドギャップの昇降順を配した複数の半導体ストライプを有する新しい光電変換素子を提案している。新型太陽電池に関しては、図1(a)に示すような光の進行(横)方向に沿ってバンドギャップが変化する3ストライプ構造を試み、Si部分に関して同(b)に示すよ

うな光電変換特性が得られた。



また上記素子作製のプロセス環境である超高清浄度を実現可能なクリーンユニットシステムプラットフォーム (CUSP) の展開として、歯科技工作業における塵肺防止可能性が示された。

(a2) ポリエチレンナフタレート有機膜上のNi₇₅Fe₂₅薄膜における表面・界面状態と磁気特性

次世代超高密度メモリやBeyond CMOSスイッチングデバイスへの応用、並びに、単一/少数分子系のキャラクタリゼーションを目指し、我々は強磁性体/絶縁体(=酸化物、分子等)/強磁性体ナノスケール接合(=スピン量子十字デバイス)を提案している。スピン量子十字デバイスは強磁性薄膜のエッジとエッジの間に絶縁体が挟まれた構造になっていて、そのエッジは互いに直交している。この構造では、強磁性薄膜の膜厚 d によって接合面積 S (= $d \times d$)が決まるため、例えば、膜厚1~20 nmの強磁性薄膜を用いれば、 $1 \times 1 \sim 20 \times 20$ nm²の超微小接合が作製可能となる。これにより、高いon/off比を有するスイッチング効果や新規な磁気抵抗効果が期待できる。また、単一/少数分子系のキャラクタリゼーションも可能となる。今回、我々はこのような新機能デバイスの作製を目指し、電極材料として期待できるポリエチレンナフタレート(PEN)有機膜上のNi₇₅Fe₂₅薄膜について、その表面・界面状態と磁気特性を調べた。PEN有機膜(帝人デュポン社製TEONEX Q65、長さ10 mm、幅2 mm、膜厚25 μ m)上のNi₇₅Fe₂₅薄膜の作製には抵抗加熱式磁場中真空蒸着装置を用いた。抵抗加熱にはBNルツボとWフィラメントを用い、Ni₇₅Fe₂₅がPEN有機膜に均一に、かつ、ビーム状に蒸着するように、BNルツボの形状・寸法、及び、遮熱板の開口部寸法をシュテファンボルツマンの式、及び、幾何学的シミュレーションを用いて、厳密に設計した。また、蒸着時にPEN有機膜の温度がガラス転移温度(=120 $^{\circ}$ C)を超えないように、遮熱板、及び、冷却機構を設置した。蒸着パワーは280-350 W、蒸着時の真空度は $\sim 10^{-3}$ Pa、蒸着膜厚レートは0.5-1.2 nm/minとした。磁気異方性を付与するための面内磁場の大きさは360 Oeとした。膜厚測定には触針段差型膜厚計による機械的手法、及び、ダイオード励起固体(DPSS)レーザーによる光学的手法を用いた。表面観察には原子間力顕微鏡(AFM)を用いた。構造解析には透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた。磁化測定にはマイクロ磁気光学カー効果(MOKE)測定装置を用いた。磁気抵抗(MR)効果測定には磁場中直流4端子法を用いた。図2(a)にNi₇₅Fe₂₅/PENの断面TEM像を示す。PEN有機膜へのNi、Fe原

子拡散が見られず、明瞭な界面が形成できていることがわかる。また、 $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ 表面が平坦であることも確認できる。図2(b)、(c)にPEN及び $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ /PENにおける表面AFM像を示す。観察スケールは $500 \times 500 \text{ nm}^2$ である。PENの表面粗さ R_a は 1.3 nm で、有機膜としては平坦な膜が形成されている。また、 $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ /PENの表面粗さ R_a は 1.2 nm で、同様に有機膜上の金属薄膜としては平坦な膜が形成されている。

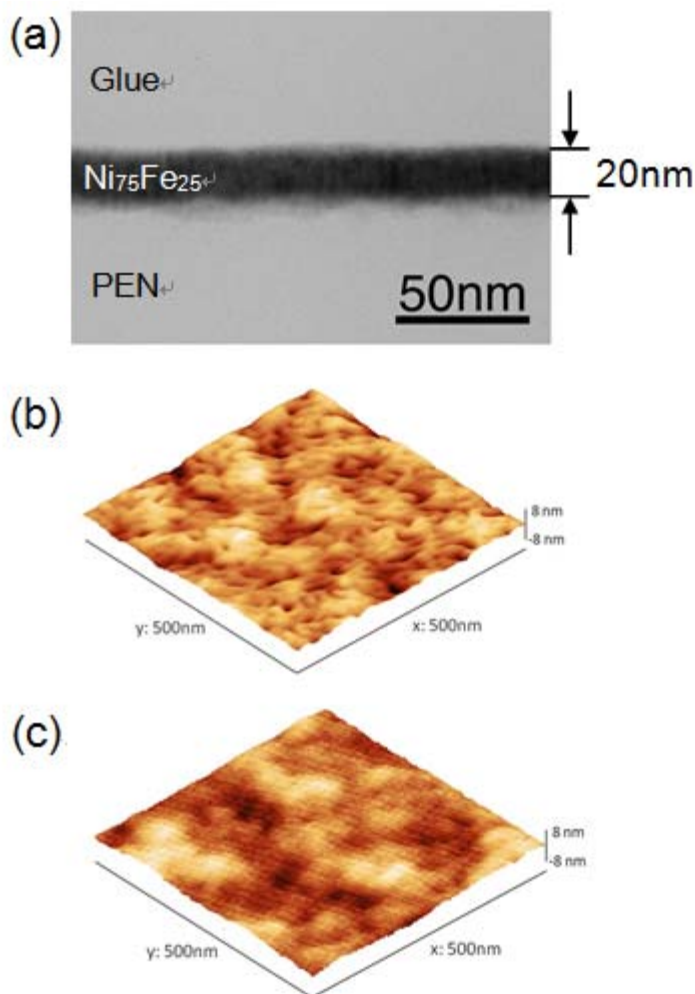


図 2: (a) $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ (20nm)/PEN の断面 TEM 像、(b) PEN 及び (c) $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ (14nm)/PEN における表面 AFM 像

図3にマイクロMOKEにより室温で測定した $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ /PENの磁化曲線を示す。 $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ の膜厚は 13 nm 、 20 nm 、 35 nm である。外部磁場の方向は磁化容易軸に平行である。マイクロMOKEで用いた光源はViolet半導体レーザー(波長= 405 nm)で、観察スポット径は $3\text{-}4 \text{ }\mu\text{m}$ である。観察位置はサンプルの左エッジ、中央、右エッジである。いずれの膜厚においても角型比 M_r/M_s は $0.9\text{-}0.96$ と大きな値を示す。また、観察位置依存性に関しては、いずれのサンプルにおいても左エッジ、中央、右エッジともほぼ同じ振る舞いを示している。これらの結果はPEN有機膜上の $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ 薄膜では、一軸磁気異方性が完全に付与されていて、磁化状態がほぼ単磁区構造に近い状態になっていることを示している。これはまたエッジからスピンを注入するナノスケール接合では極めて好適であることを示してい

る。

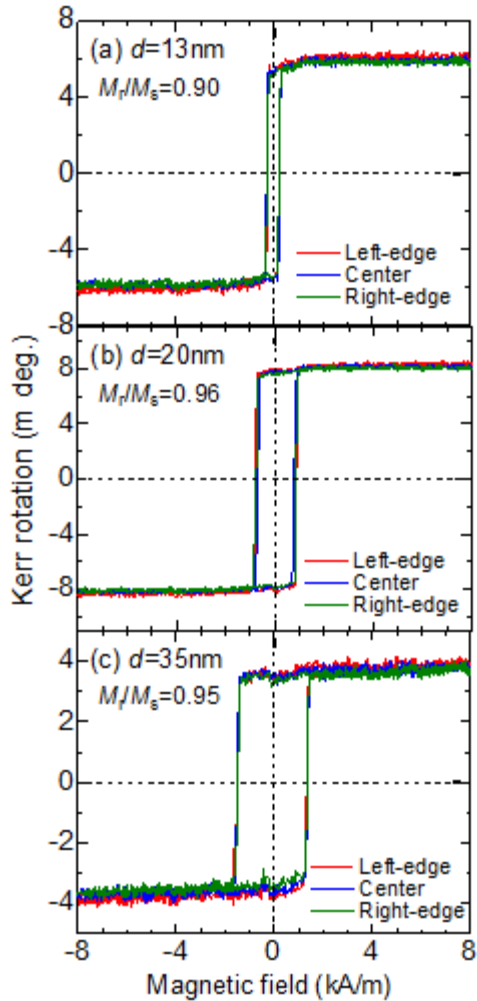


図 3: マイクロ MOKE により室温で測定した $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{PEN}$ の磁化曲線

図4に直流4端子法により室温で測定した $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{PEN}$ のMR効果を示す。外部磁場の方向は磁化困難軸に平行である。センス電流は1 mAであり、外部磁場に対して平行に流している。図4からわかるように、いずれの膜厚でも、異方性磁気抵抗(AMR)効果が明瞭に見られた。すなわち、磁化方向が電流と平行であるときは抵抗が最大値 $R_{//}$ を示し、垂直であるときは抵抗が最小値 R_{\perp} を示す。以上より、表面・界面状態、並びに、磁気特性の観点から、 $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{PEN}$ は我々の提案しているナノスケール接合（接合サイズ10-40 nm）の電

極材料として極めて有望であることがわかった。

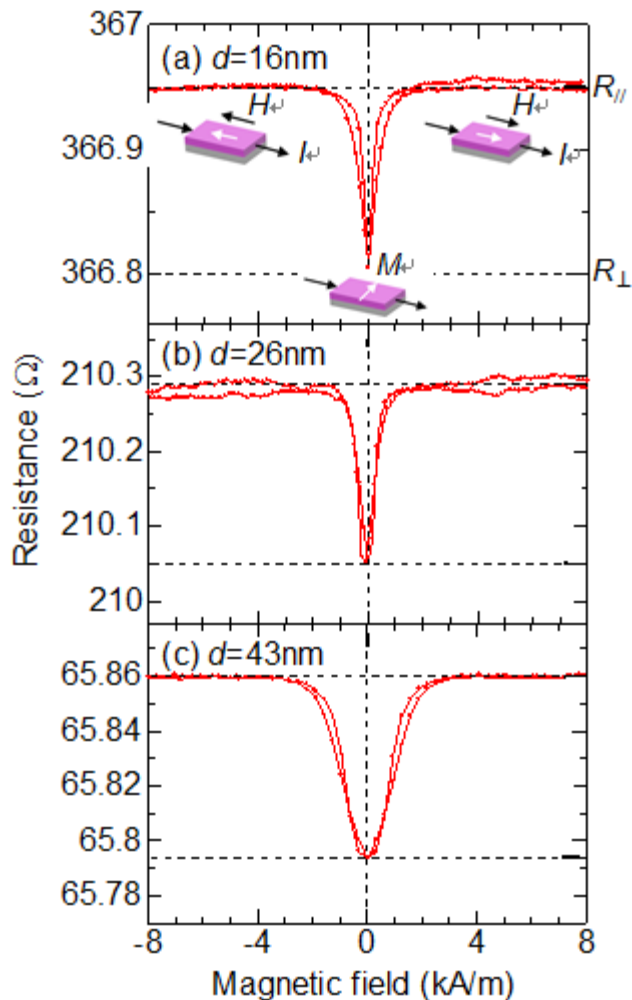


図 4: 直流 4 端子法により室温で測定した $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{PEN}$ の MR 効果

(b) スピン量子十字構造デバイスの輸送特性の理論的検討

量子十字構造の電極に強磁性金属を用いた場合をスピン量子十字構造デバイスと呼び、この構造に反転対称性の無い化合物半導体である GaAs や GaSb を挟んだ際に、これらの物質で 3 次の Dresselhaus スピン軌道相互作用が働いた場合のスピン伝導に関して、今年度は考察した。図 5 に計算に用いた強磁性体/化合物半導体/強磁性体のモデルを示す。図 5: 計算

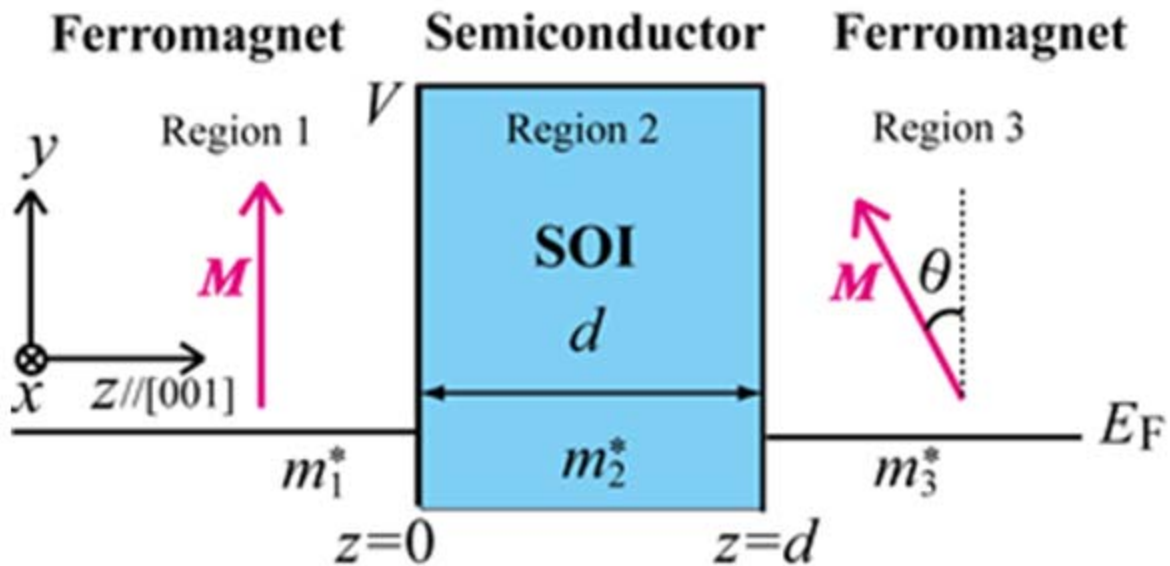


図 5: 計算に用いた強磁性体/化合物半導体/強磁性体のモデル

計算に用いたモデルハミルトニアンは以下の式である。式中の τ_x, τ_y はPauli行列で、 Δ_i は各領域での交換エネルギーである。式 (3) が、3次のDresselhausスピン軌道相互作用ハミルトニアンで、 γ_i はスピン軌道結合定数である。この効果がある場合のスピン伝導を計算した。

$$H^{(i)} = H_0^{(i)} + H_D^{(i)} + V(z), \quad (1)$$

$$H_0^{(i)} = \frac{\hbar^2 k_\sigma^2}{2m_i^*} - \frac{\Delta_i}{2} \mathbf{n}_i \cdot \boldsymbol{\tau}, \quad (2)$$

$$H_D^{(i)} = \gamma_i (\tau_x k_{x\sigma} - \tau_y k_{y\sigma}) k_{z\sigma}^2. \quad (3)$$

半導体バリアの膜厚を変化させて計算した磁気抵抗(MR)比の計算結果を図6に示す。その結果、スピン軌道相互作用が働かない普通の絶縁体バリアの場合、MR比はバリア膜厚を変えても常に正であるが、GaAs半導体バリアの場合、非常にバリア膜厚が薄い場合(0.01~0.02nm)は、MR比は正であるが、厚みを増すとすぐに負になってしまい、バリア膜厚が3nmまで、ずっと負のままであった。一方、スピン軌道相互作用の大きいGaSb半導体バリアの場合、GaAsと同様に非常にバリア膜厚が薄い場合(0.01~0.02nm)は、MR比は正で厚みを増すとすぐに負になってしまうが、やがて、厚みが1nm程度で符号を変えて、再び正になることが判明した。これらの現象は、マイノリティキャリアが半導体中のスピン軌道相互作用で、スピンフリップすることを考慮すると説明することが出来、そのために要する厚みが、GaAs半導体バリアの場合、約10.253nm程度であり、GaSb半導体バリアの場合には2.42nm程度であることから、説明が出来た。そのため、GaAs半導体バリアの場合、厚みが5nm以上あれば、GaSb同様に再びMR比は正になると考えられる。この結果から、スピン量子十字構造素子に、化合物半導体を挟めば、負のMR比を有するデバイス

スを作製することが可能であることを定量的に予想することが出来た。

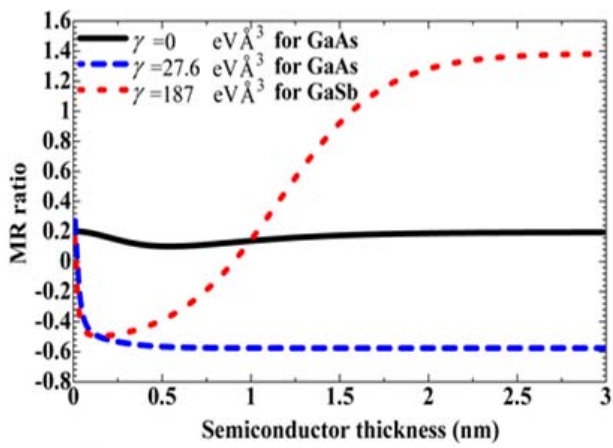


図 6：磁気抵抗(MR)比の半導体バリア膜厚依存性

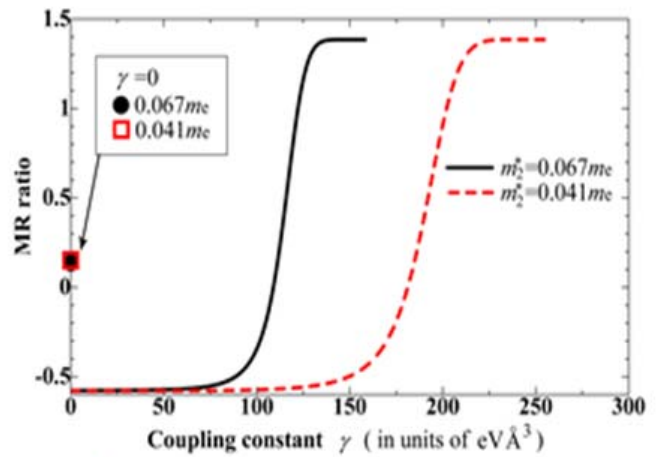


図 7：磁気抵抗(MR)比の結合定数依存性 (バリア厚=1nm)

図7は、バリア膜厚が1nmでの磁気抵抗(MR)比のスピ軌道結合定数依存性である。スピ軌道相互作用は、極めて小さくても膜厚がある程度(Fermi波長以上)あれば効果があり、MR比は負になることがわかる。