

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。この新型太陽電池に関しては、図1(a)左下内挿図に示すように、光の進行(横)方向に沿って、向って右から左にバンドギャップが減少する3 stripe構造を試み、Si部分に関して図1(a)に示すような光電変換特性が得られた。また、この3ストライプ構造のSiC部分における光電変換特性を図1(a)右下内挿図に示す。電流値は小さいもののオープンサーキット電圧Vocに増大が見られる。また上記素子のSiGe部分における光電変換特性を図1(b)に示す(図1(b)内挿図に示すように、SiGe層の存在はXPS分析により確認されている)。図1(a)と比較し、Vocに減少がみられ、横方向にバンドギャップが変化した3 stripe構造ができていたことが示唆された。

図1(a) Si-cell のJ-V特性と上面・断面構造 (左下)、及びSiCプロトタイプセルのJ-V特性 (右下)

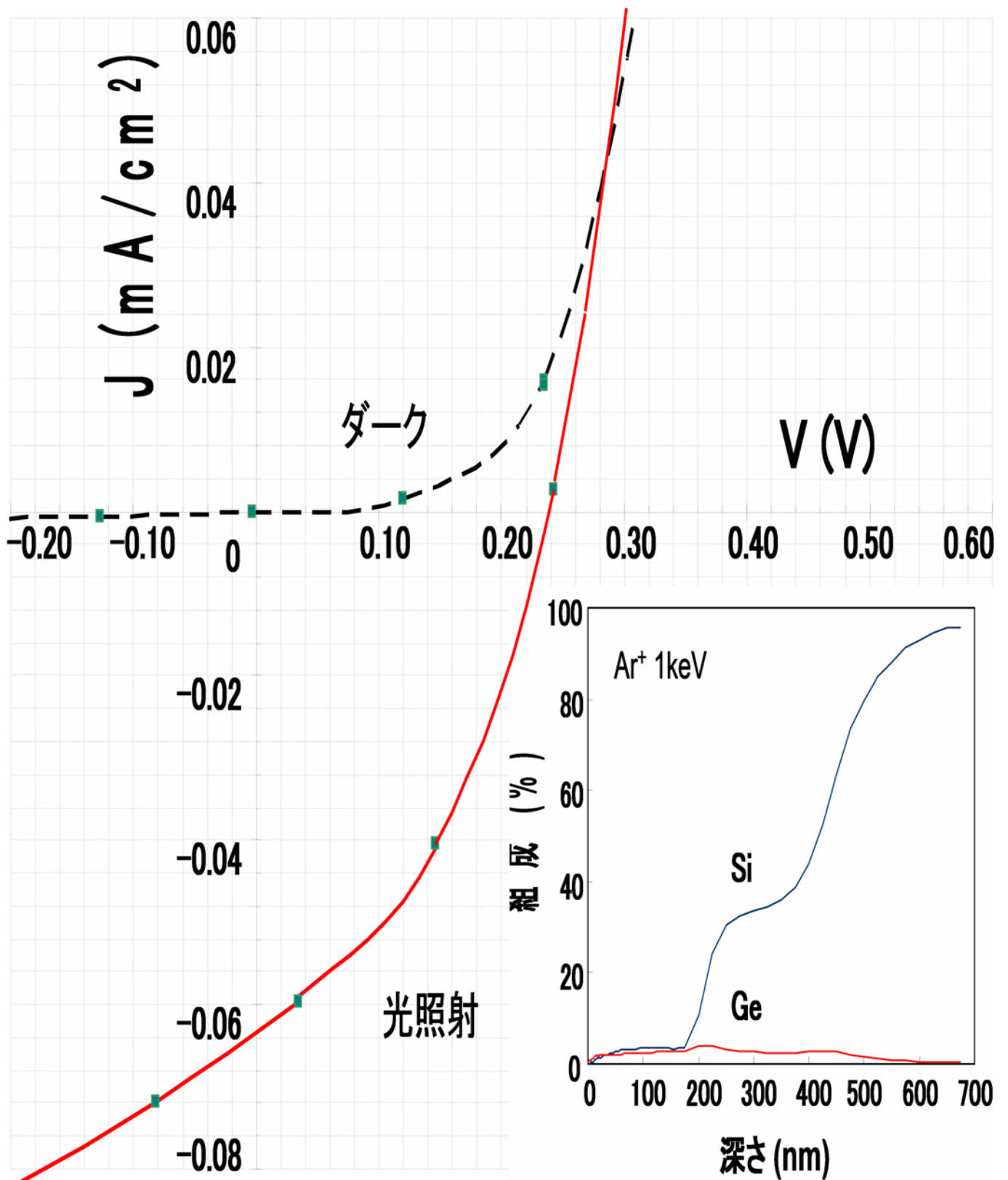


図1(b) SiGe-cell のJ-V特性とXPS分析結果(右下)

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、一般家庭の部屋自体にCUSP機構を導入することで、ISOクラス3を凌駕する高清浄度が実現できること示された。

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

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、 $1 \times 1-20 \times 20$ 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Fe、Co磁性薄膜について、その表面状態と磁気特性を調べた。PEN有機膜には帝人デュポン製のTEONEX Q65 (10 mm \times 2 mm \times 25 μ m)を用いた。装置内には、蒸着時にPEN有機膜のガラス転移温度(=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。また、Fe、Co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厳密に設計した。蒸着パワーは400-450 W、蒸着時の真空度は $\sim 10^{-3}$ Pa、蒸着膜厚レートは1.0-3.0 nm/minとした。誘導磁気異方性付与のための面内横方向磁場の大きさは360 Oeとした。膜厚測定にはダイオード励起固体(DPSS)レーザーによる透過光強度測定法を用いた。表面観察には原子間力顕微鏡(AFM)を用いた。磁化測定には集光型磁気光学カー効果(MOKE)測定装置を用いた。図2にFe/PEN、Co/PENにおける表面粗さ R_a のFe、Co膜厚依存性を示す。比較のため、Au/PENにおける R_a のAu膜厚依存性も示す。観察サイズは $L_x(y) = 500$ nmとした。図2より、Au/PENでは、Au膜厚が厚くなるに従い、 R_a が大きくなる。それに対し、Fe/PEN、Co/PENでは、Fe、Co膜厚が厚くなるに従い、 R_a が小さくなる。特に興味深い点は、Fe/PENでは1段階の平坦化現象が見られ、Co/PENでは2段階の平坦化現象が見られることである。すなわち、Fe/PENではFe膜厚が0-15 nmにおいて、1段階の平坦化現象が生じ、その結果、Fe膜厚が15 nm以上で R_a が0.8 nmで一定となる。また、Co/PENでは、1段階目として、Co膜厚が0-10 nmにおいて平坦化し、2段階目として、Co膜厚が30-35 nmにおいて平坦化する。その結果、Co膜厚が10-30 nmにおいて、 R_a が0.8 nmで一定となり、Co膜厚が35 nm以上で R_a が0.55 nmで一定となる。

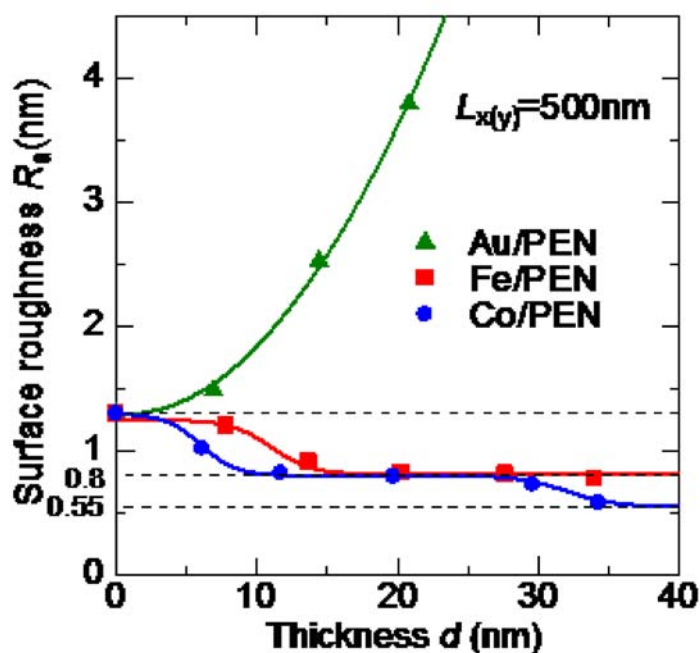


図2: Fe/PEN、Co/PEN、Au/PENにおける表面粗さのFe、Co、Au膜厚依存性

図3に集光型MOKEにより室温で測定したFe/PEN、Co/PENの磁化曲線を示す。Fe膜厚は7.8, 9.2, 12, 22 nmである。Co膜厚は4.6, 5.3, 6.9, 12 nmである。外部磁場の方向は

Fe、Co薄膜の長手方向に対して垂直である。集光型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3-4 μm である。Fe/PENでは、Fe膜厚が薄くなるに従い、保磁力、及び、角型比が小さくなる。そして、Fe膜厚が7 nm以下において、保磁力、及び、角型比がともにゼロとなる。一方で、Co/PENでは、Co膜厚が5.3 nm付近で、保磁力、及び、角型比が最大値を示す。この最大ピーク現象は、磁場中蒸着で付与した誘導磁気異方性と、PENとCoの表面粗さに由来する形状磁気異方性の競合から説明できることがわかった。

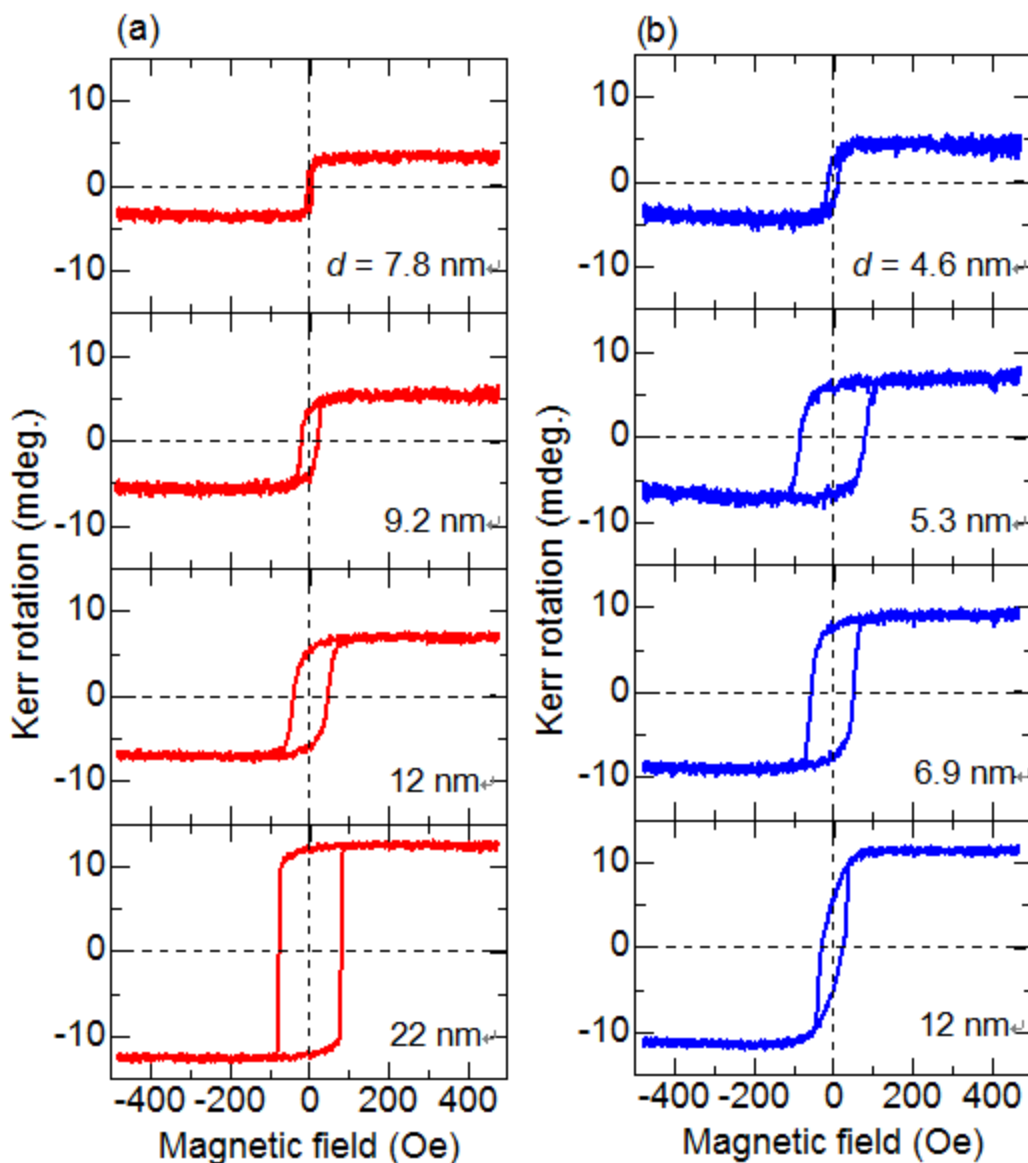


図3: マイクロMOKEにより室温で測定した(a) Fe/PEN、(b) Co/PENの磁化曲線

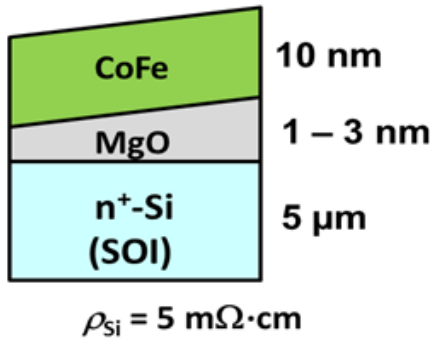
以上より、表面状態、及び、磁気特性の観点から、Co/PENは我々の提案しているナノスケール接合(接合サイズ5 nm程度)の電極材料として極めて有望であることがわかった。

(b) スピン輸送における巨大Hanle効果の起源の理論的検討

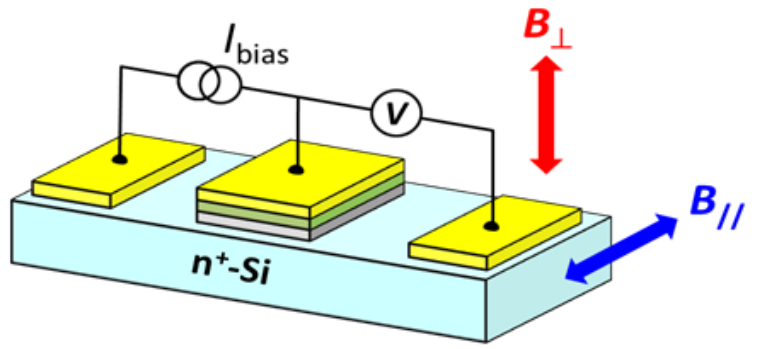
今年度は、スピン量子十字構造素子において、強磁性金属リボン間から間に挟んだSiにトンネルバリアを介してスピン注入をすることを想定し、強磁性CoFeからMgOバリアを介して、Siにスピンを注入した際に観測されるHanle効果について考察した。Hanle効果は半導体に強磁性体からスピンを注入した際に、どの程度スピン注入が行われているかの指標として測定が行われている。その測定方法には、3端子Hanle効果測定と4端子Hanle効果測定があり、後者のHanle電圧は、 μV 程度であり、従来理論との一致が良い。しかしなが

ら、図4に示す3端子Hanle効果測定においては、SiやGeにスピン注入した際に異常に巨大な電圧(mV単位)が観測されており起源がわからなかった。

Layer structure



three-terminal device



Junction size: $50 \times 50 - 250 \times 250 \mu\text{m}^2$

図4：3端子 Hanle 効果測定における基板組成と測定配置

近年、北大工学部の植村らが、実験に、よって、この3端子Hanle効果測定においては、MgOバリアの幅とHanle電圧（シート抵抗 ΔR_s 換算）に指数関数的な対応が見られることを発見した（図5参照）。この事実から、我々は、3端子Hanle効果測定における異常に大きなHanle電圧は見かけのもので、トンネル過程で、外部磁場により、電子のスピンが脱分極することで、Hanle電圧が見えているのではないかと考え、理論計算を行った。図6にMgOバリアの幅とHanle電圧（シート抵抗 ΔR_s 換算）の計算結果を示す。図7はそのモデルを使って計算したHanle効果の磁場依存性である。対応するHanle効果の磁場依存性の実験結果を図8に示す。これらの結果は、半定量的に、かなり現象を説明できており、仮説が正しいことを示している。したがって、巨大なHanle信号は、MgOバリアの磁場による抵抗変化を観測しているに過ぎないことが分かった。

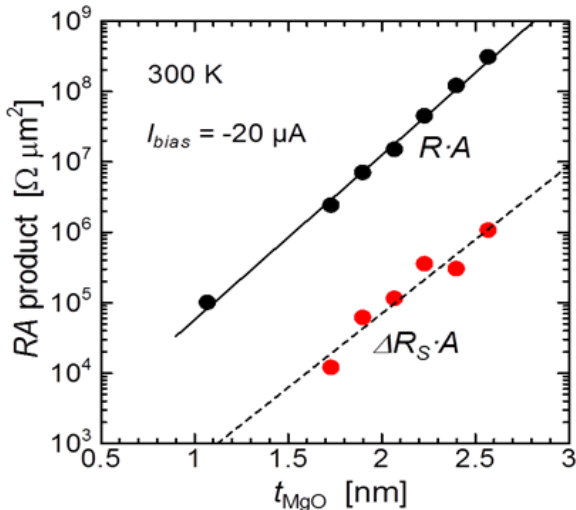


図5： $\Delta R_s \cdot A$ の MgO 膜厚依存性の実験結果

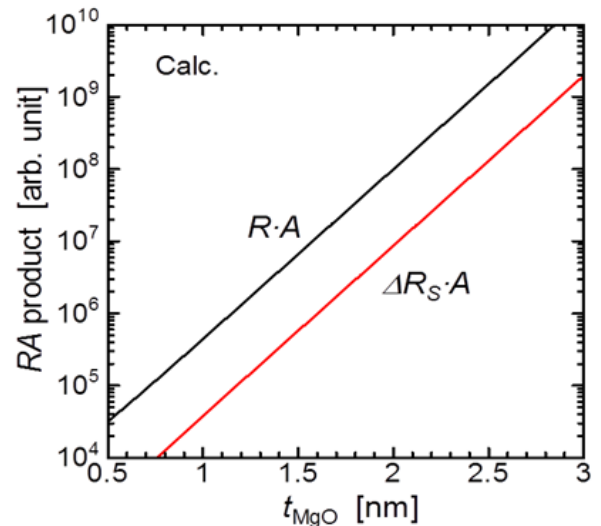


図6： $\Delta R_s \cdot A$ の MgO 膜厚依存性の計算結果

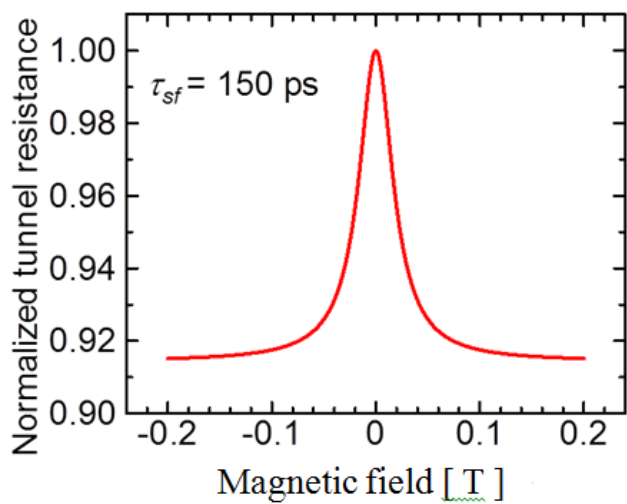


図 7: Hanle 信号(out of plane)の計算結果

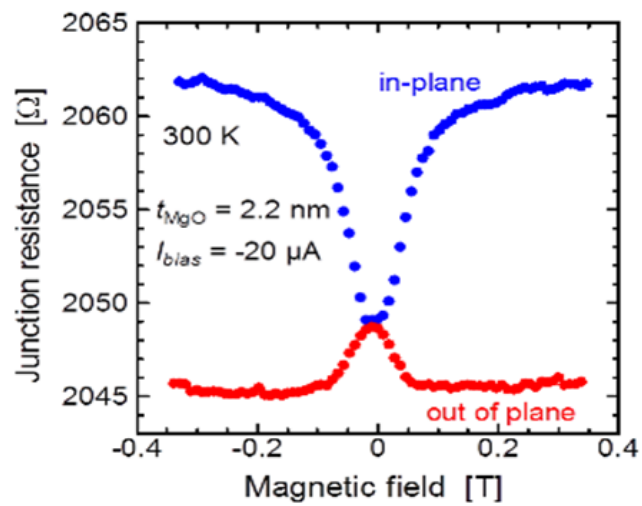


図 8: Hanle 信号の実験結果