

研究成果

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。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は異なり、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。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、ならびに、2次元光導波路とラテラル方向にバンドギャップ変化させたマルチ半導体ストライプを結合させた集光型システムを基に、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。

(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を変化させた新型太陽電池に関し、図1に示す2次元リディレクション導波路構造と、右内挿図に示すような光の進行方向に沿って、左から右にバンドギャップが減少するマルチストライプ構造を結合し、太陽光の全スペクトルに亘って光電変換を行うことを目指している。2次元導波路とSi系の太陽電池素子の圧着システムを立ち上げた。

図1 新型光電変換素子。従来素子断面構造(左下)、及びラテラル方向にバンドギャップを変化させたマルチ半導体ストライプ断面構造(右下)

また上記素子作製のプロセス環境として図2に示すような、クリーンユニットシステムプラットフォーム(CUSP)の約1.5m×1.5m×2.0mの空間の外側にFan Filter Unit (FFU)を床の上に直置きした系においてもUS209Dクラス400程度の良好な清浄度を得ることができた。重量のあるFFUにも対応できるので、放射線対応の清浄環境への展開に目処が

ついた。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を凌駕する高潔浄度が実現できることも示された。

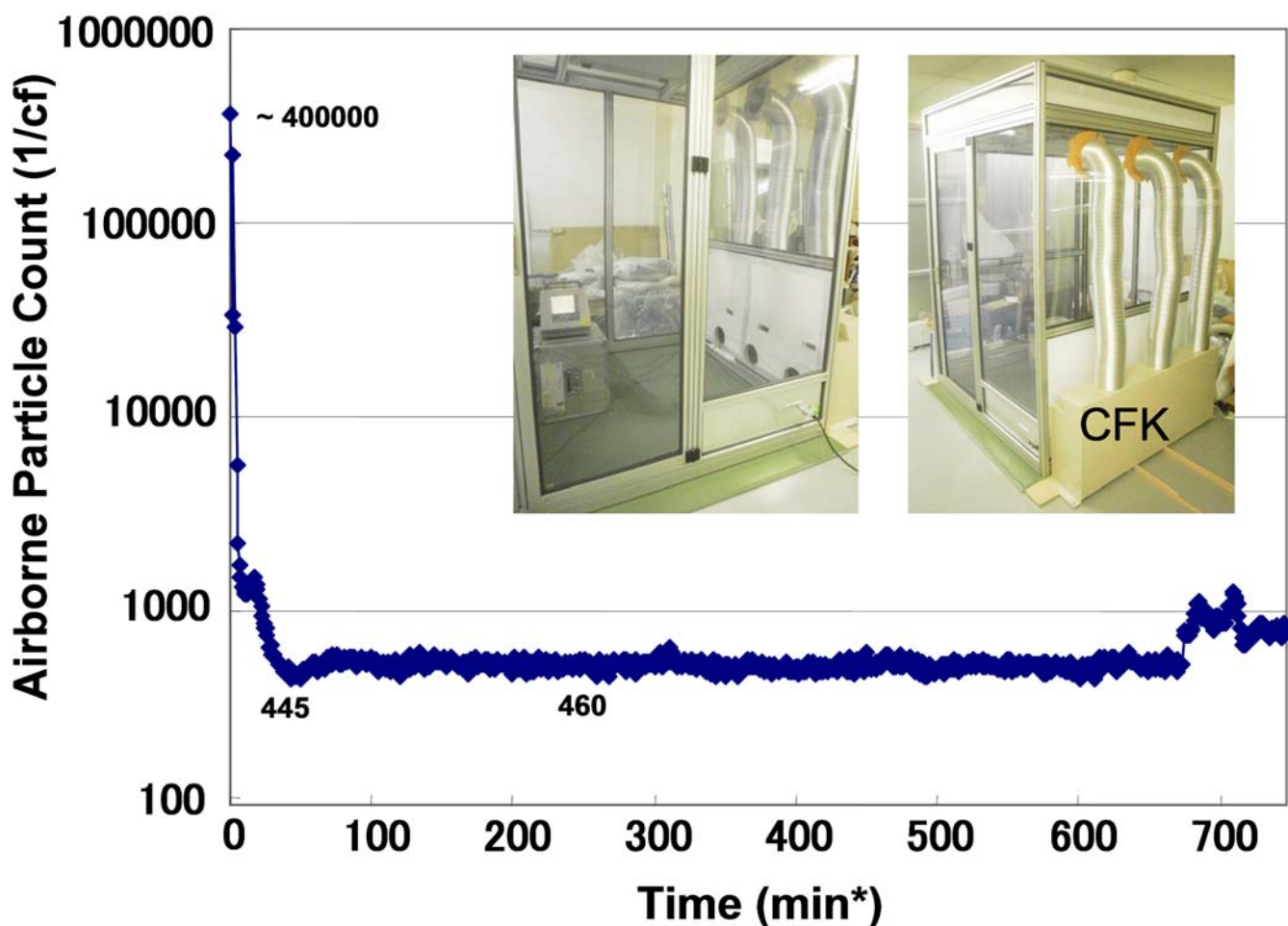


図2 床置きFFUを有するCUSPシステムの清浄度の時間依存性と同システムの写真(内挿図)

(b)理論：障壁を介したトポロジカル絶縁体から正常金属へのスピン注入

図3のような構造において、トポロジカル絶縁体(TI)から正常金属へのスピン注入を考察した。トポロジカル絶縁体には磁化 m を有する磁性絶縁体を蒸着し、その磁化 m の大きさと方向を極角 θ と方位角 ϕ を変化させることで、トポロジカル絶縁体の時間反転対称性を破ることにより、トポロジカル絶縁体のバンドを変化させて、スピンコンダクタンスを計算した。そして、そのスピンコンダクタンスの絶縁バリア幅の依存性を考察した。その結果、スピンコンダクタンスは磁化 m の方向に敏感であり、それはDirac-Coneのバンドギャップが開くことならびにフェルミ球の中心がシフトすることが原因であることが分かった。また、バリア幅に対しては緩やかに変化することもわかった。これは、バリア幅がフェルミ波長より十分小さいことによるものである。結果の例として、図4にスピンコンダクタンスのバリア幅依存性と方位角 ϕ 依存性を示す。また、図5にスピンコンダクタンスのバリア幅依存性と極角 θ 依存性を示す。図3においては、極角 θ は 90° に固定しており、方位角 ϕ の依存性は、 90° を中心にして対称である。これは、磁化 m の y 成分がフェルミ球の y 方向のシフトに関係しているため、フェルミ球が y 方向に偏心すると、コンダクタンスが下がることを示している。対称なのは、磁化 m の y 成分が方位角 ϕ に対して、 90° を中心に対称だからである。一方、図5の極角 θ の依存性を見ると、こちらの方が依存性が強く、同じく 90° を中心に対称であることがわかる。この場合の計算では、方位角 ϕ は 0° で計算している。極角 θ は、磁化 m の z 成分を変化させ、 $\theta=90^\circ$ の時に磁化 m の z 成分が無くなり、Dirac-Coneのギャップが閉じる。そのため、伝導に寄与する電子が増えるために、

$\theta=90^\circ$ の時に、スピンコンダクタンスが増加する。90°を中心に対称であるのは、磁化 m のz成分が90°を中心に対称であるからである。

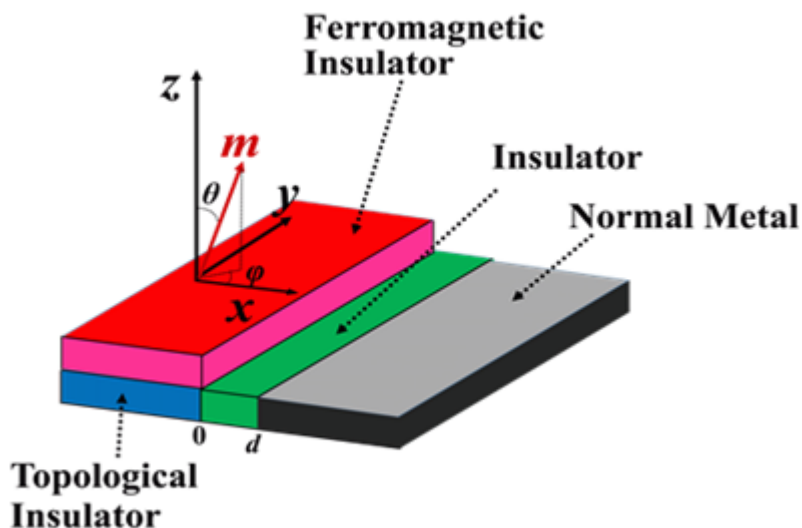


図3 磁性絶縁体を蒸着した TI/Insulator/Normal Metal素子の概念図。

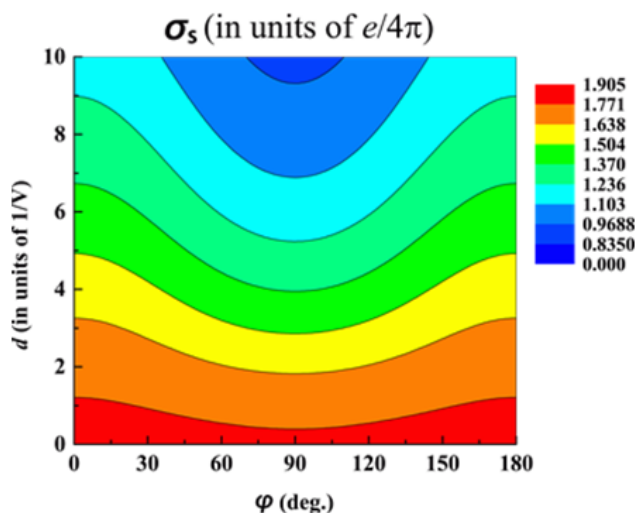


図 4: Spin conductance のバリア幅並びに方位角 ϕ 依存性。 $\theta=90^\circ$

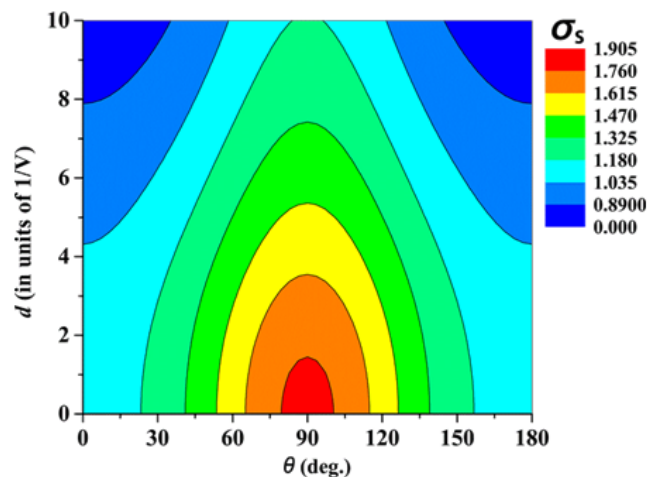


図 5: Spin conductance のバリア幅並びに極角 θ 依存性。 $\phi=0^\circ$

左…図4: Spin conductanceのバリア幅並びに方位角 依存性。 $\theta=90^\circ$ 右…図5: Spin conductanceのバリア幅並びに極角 θ 依存性。 $\phi=0^\circ$