

### 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であるマルチストライプ半導体フォトンフォトキャリア直交型太陽電池 (MOP<sup>3</sup>SC) を導波路結合型へと進化させた。従来型素子は、図1左下内挿図に示すように、光の進行方向と生成したフォトキャリアの進行方向が平行であるために、光吸収とフォトキャリアの捕集の間にトレードオフがあったが、図1右下内挿図に示すように、光電変換素子の側面からpn接合に沿って光を導入することで、光の進行方向と生成したフォトキャリアの進行方向を直交させることができ、光吸収とフォトキャリア捕集の同時最適化が可能となる。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この光電変換素子と、図1に示すような上部に回折格子を有する導波路と結合させることで、空間伝播光から平面導波光と転化したフォトンをもって高効率の集光型太陽光発電システムとなる。今後、素子の性能向上と共に、導波路構造の最適化を行って

く。

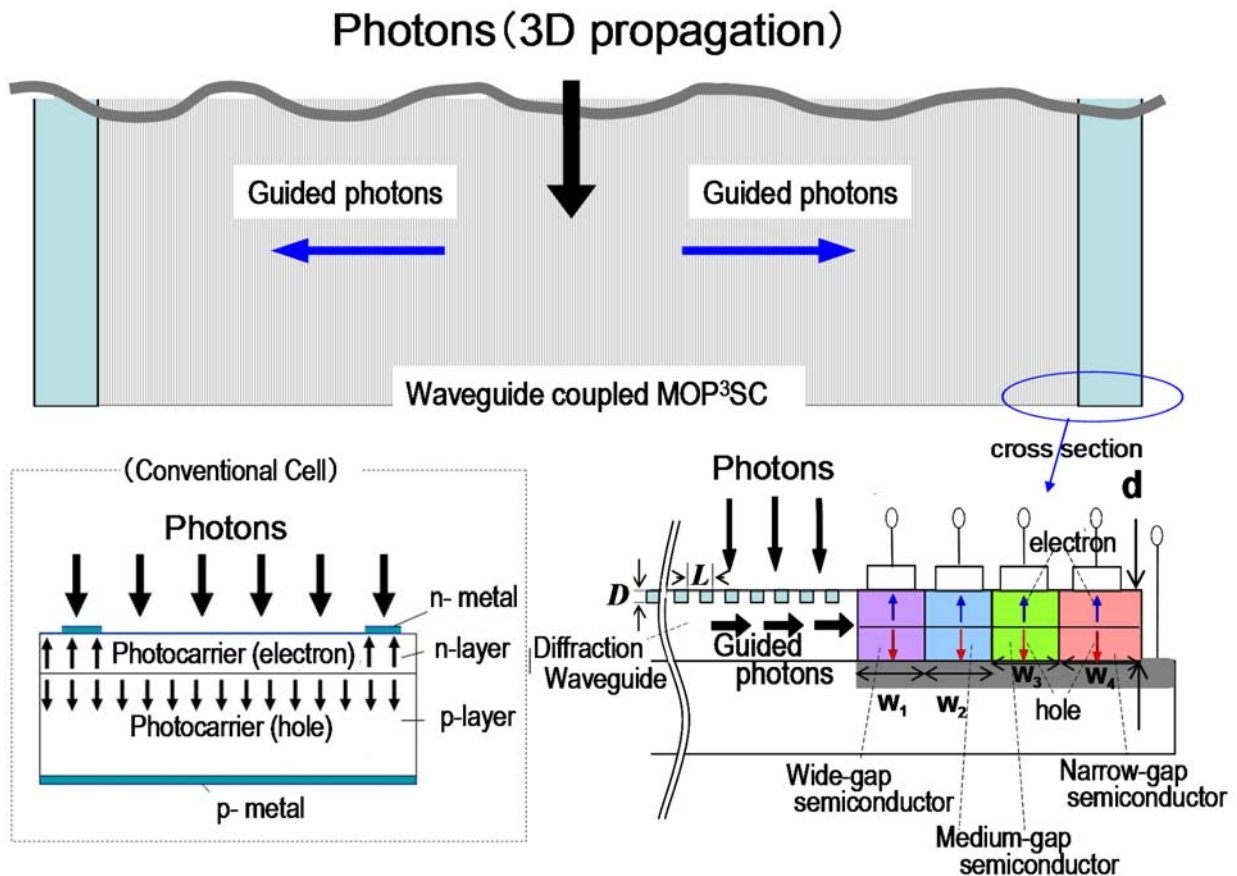


図 1. 導波路結合マルチストライプ半導体フォトンフォトキャリア直交型太陽電池 (MOP<sup>3</sup>SC)。従来型素子の構造(左下内挿図)、J-V 特性、XPS分析結果(内挿図左)、導波路結合MOP<sup>3</sup>SCの断面構造(右下内挿図)。

また、トップダウン系とボトムアップ系を繋ぐための環境、並びに、上記次世代素子作製のプロセス環境としての超高潔浄クリーンユニットシステムプラットフォーム (CUSP) を人が内部に入れるタイプへと進化させ、従来型のクリーンルームでは対応できない一般家庭用の超高潔浄部屋を開発した。高齢者や乳幼児など、環境弱者といわれる人々の安寧に資すると期待される。特に、昨今問題として急浮上したPM2.5問題や花粉症対策としても大変有効であると期待される。

## (a2) ナノストライプFeAl合金の表面状態と磁気特性

磁気ナノ構造はその興味深い基礎物性と応用可能性の高さから国内外で大きな注目を集めている。例えば、ナノドット、ナノストライプ、ナノワイヤー、ナノチューブでは保磁力、飽和磁場、スイッチング磁場の増大現象が観測されており、それらの挙動はバルクのそれと比較して大きく異なる。また、応用面では、磁気ナノ構造を用いたビットパターンドメディア(BPM)、磁壁ロジックデバイス、レーストラックメモリ、磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)等が提案されている。このような背景の中、最近、本学エネルギー・マテリアル融合領域研究センターの渡辺教授等はFe<sub>52</sub>Al<sub>48</sub>合金表面にナノ秒パルスレーザーを照射すると、その表面形態がストライプ構造、網目構造、ドットパターンに変化することを見出した。今回、我々は本手法で得られたナノストライプFeAl合金に注目し、その表

面状態、及び、磁気特性を調べることを目的とした。Fe<sub>52</sub>Al<sub>48</sub>合金表面へのナノ秒パルスレーザー照射にはNd:YAGパルスレーザーを用いた。パルス数は200 pulses、パルス幅は6 ns、繰り返しパルス周波数は2 Hz、平均レーザーエネルギー密度は1.24 kJ/m<sup>2</sup>、波長は532 nmとした。表面ナノ構造解析には原子間力顕微鏡(AFM)、走査型電子顕微鏡(SEM)、及び、エネルギー分散型X線分光法(EDS)を用いた。磁気特性評価には集光型磁気光学カー効果(MOKE)法を用いた。最大印加磁場は1 kOe、面内印加磁場回転角は0-180°、観測スポットサイズ径は3 μm、測定温度は室温とした。図2(a)にナノ秒パルスレーザー照射後のFeAl合金の表面AFM像を示す。(111)面の[110]方向に沿って、ストライプが形成されることがわかる。このときのストライプ周期は534 nm程度となり、入射レーザー波長532 nmとほぼ等しいことがわかった。図2(b)、(c)にナノストライプFeAl合金の表面磁化曲線を示す。図2(b)はストライプ方向に磁場を印加したときの磁化曲線である。図2(c)はストライプ方向に対して面内にθ=83°傾けて磁場を印加したときの磁化曲線である。ここで磁場回転角θはストライプ方向からの角度とした。すなわち、θ=0°90°は、それぞれ、ストライプ方向、及び、ストライプに対して面内垂直方向に磁場を印加することを意味する。図2(b)、(c)よりθ=0°では保磁力H<sub>c</sub> =56 Oeとなることに対し、θ=83°ではH<sub>c</sub> =230 Oeとなり保磁力が大きくなることがわかった。

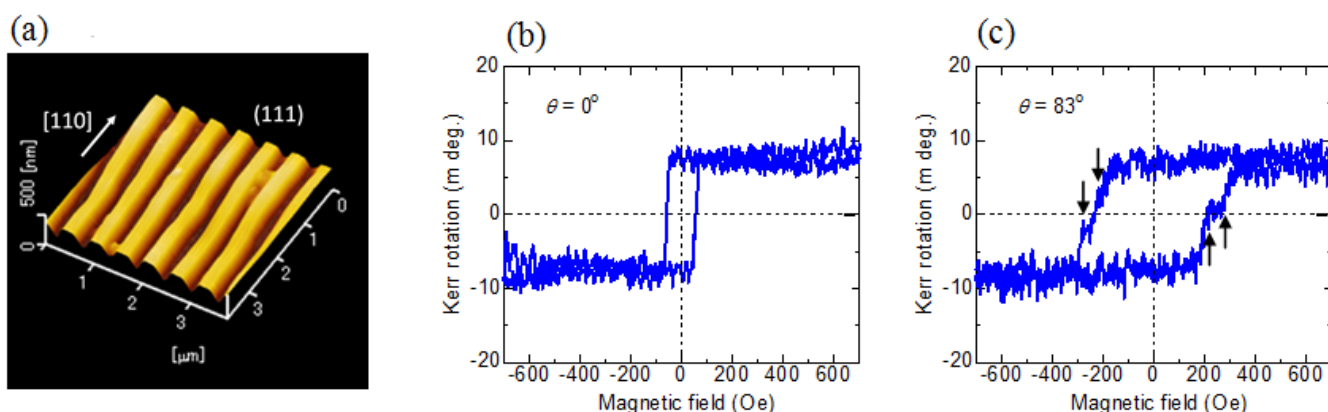


図2: ナノストライプFeAl合金の (a) 表面AFM像と磁場回転角(b)θ=0°、(c)θ= 83°の表面磁化曲線

図3に保磁力の磁場回転角依存性を示す。実丸が実験結果で、実線と破線が、それぞれ、磁壁(DW)移動モデルとStoner-Wohlfarth(SW)モデルによる計算結果である。図3より、保磁力の磁場回転角依存性はDW移動モデルによる計算結果と良い一致を示すことがわかる。これは、磁化反転が磁壁ピンングにより行われ、そのメカニズムがインコヒーレントモードで説明できることを意味する。これは図2(c)において矢印で示した複数のJump fieldと呼ばれる「飛び」が観測されていることと矛盾しない。ここで、磁壁ピンングが生じる原因について考察する。SEM観察、及び、EDS分析によると、ストライプ構造の傾斜部において、Al-oxideの存在が確認された。これはナノ秒パルスレーザー照射により自己組織的にFeAlストライプ構造が形成する際に、そのストライプ構造の傾斜部にAlとOが結合した結果形成されたものと考えられる。Al-oxideが存在すると磁気的には不純物が存在することと等価であるため、これにより磁壁ピンングが生じたものと考えられる。

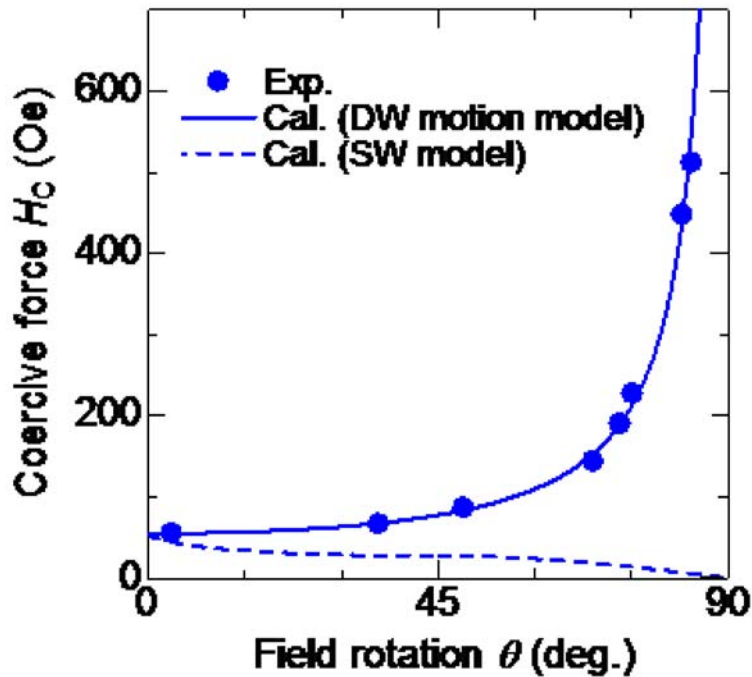


図3: ナノストライプFeAl合金における保磁力の磁場回転角依存性

## (b) 2次元金属電極における自由電子近似の妥当性

電子デバイスなどにおいて、一般的に輸送特性を計算する場合、電極は2次元や3次元の自由電子と考えて、自由電子のフェルミレベルでの状態密度のみを使用して計算を行う。しかしながら、実際の金属電極は、自由電子ではなく、クーロン相互作用を行っている電子の集合である。最近ではナノテクノロジーの進歩で電極も本当の意味で2次元的に作製できる。そこで、今年度は、電子相関をGW近似で取り込んで、2次元電極での準粒子のエネルギー分散を求めた。2次元金属電極における自由電子の分散とGW近似で計算された準粒子の分散を比較し、自由電子近似の妥当性を考察した。

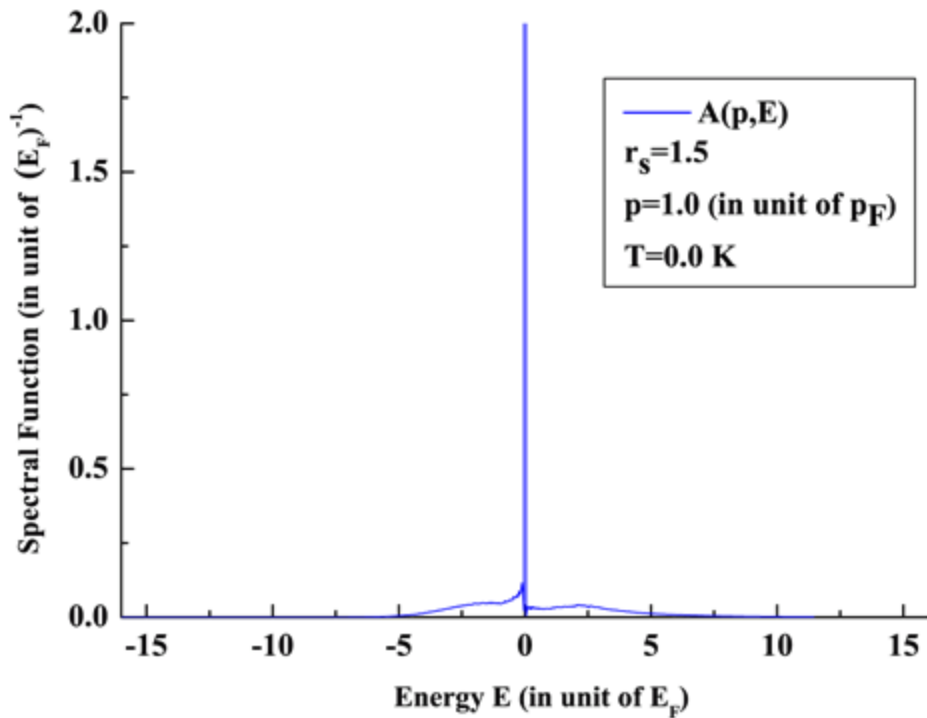
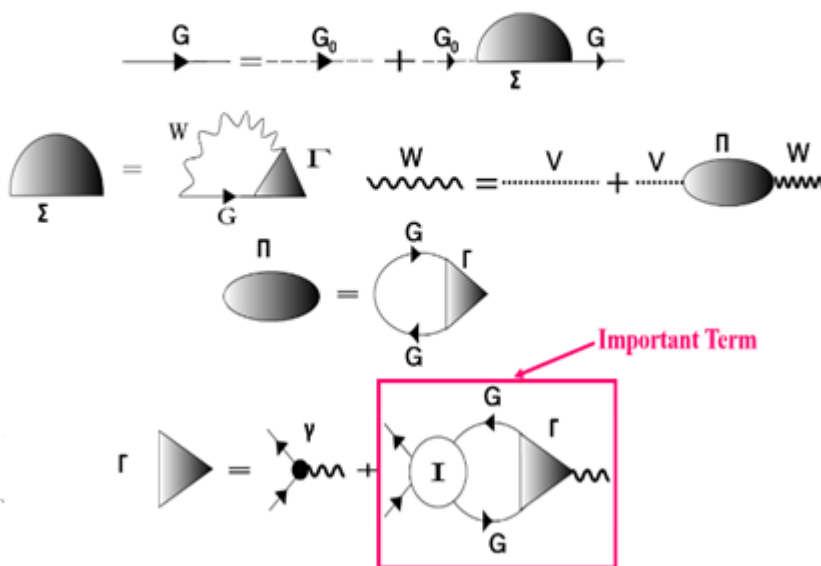


図4:スペクトル関数のエネルギー依存性(P=PF, T=0 K)

2次元金属を $r_s=1.5$ 相当の密度を有する2次元電子ガスと近似して、絶対零度での準粒子の分散を求めた。図4は、フェルミ波数での1電子スペクトル関数のエネルギー依存性の計算結果である。これを見るとわかるように、フェルミ面では、準粒子のピークはデルタ関数となり、寿命は無限であることがわかる。このような1電子スペクトル関数をすべての波数に渡ってプロットした結果が図5である。これが2次元電子ガスでの相関を考慮したエネルギー分散である。これを見るとわかるようにフェルミ面近傍に限って自由電子近似は妥当であるとわかる。計算に用いたハミルトニアンとファインマン図は、以下のものである。GW 近似では、Vertex関数を $\delta$ 関数で近似する。

$$H = \sum_{k\sigma} \frac{\hbar^2 k^2}{2m} a_{k\sigma}^\dagger a_{k\sigma} + \frac{1}{2L^d} \sum_{q \neq 0} \sum_{k\sigma} \sum_{k'\sigma'} V_q a_{k+q\sigma}^\dagger a_{k'-q\sigma'}^\dagger a_{k'\sigma'} a_{k\sigma}$$



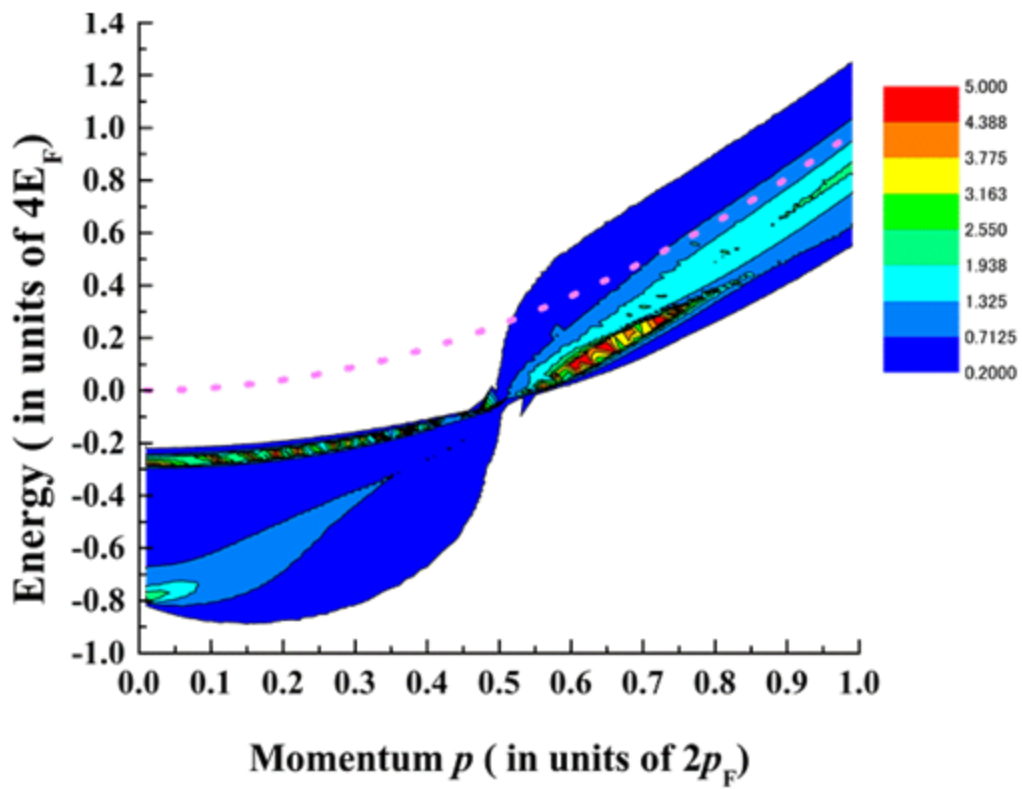


図5: 2次元電子ガスのエネルギー分散(GW近似)