

▪ 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センブル系を含め、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、新しい量子機能や高機能デバイス・システムの創出を目指した研究を実験と理論の両面から進めている。

その際、視点をアトム(Atom)・ビット(Bit)・エネルギー(Energy)/環境(Environment)空間 [ABE²空間] において、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、最終的にナノとマクロを結合することを目指す。

一般に、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ふ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、もしトップダウンー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。

(a) 新型光電変換システムと極限高潔浄環境 (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が直交した、マルチストライプ構造を有する新しい高効率の光電変換デバイスシステムの実現を目指して、高効率太陽光発電システムの第一層目となる、光進行方向変換層の検討を行った。太陽光の吸収とフォトキャリアの収集効率の最適化を両立可能とし、全太陽光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。

厚さ 5.0 μm の 2 次元スラブの光入射面側に幅 w 、高さ h の 2 次元放物線状構造を取り付けて計算を行った。導波路の材料については透明樹脂を想定し、2 次元でのシミュレーションでは、 y 上記構造断面に垂直方向には併進対称性を仮定した。入射角 θ_0 を 0 度~80 度の 10 度刻みで光を入射させた。入射光は平面波に設定し、波長 0.50 μm 、1.00 μm 、1.50 μm 、2.00 μm の 4 種類の波長の光を入射させ、反射率と実効屈折角 θ を調べた。図 1 に $w=h=2.00 \mu\text{m}$ の時の光進行方向変の様子を示す。構造を適宜設定することで、実効屈折角が ~ 0 (2 次元スラブ構造の法線方向に進行) となるようコントロールできることが示唆された。

上記太陽電池作製用クリーン環境として、できるだけ既存のフレームワークを維持しつつ、居住性能向上を実現することを目指した。図 1 に、ダイキン社製の空調機を天井部に設置、新作のガス交換ユニットを備えた CUSP 動作時の清浄度を示す。と全体図を示す。0.5 μm 以上の粒子数総和は、動作開始直後は 1 立方フィート当たり 0 万個程度を示すが、スイッチオンの後、わずか数分で急減少し、クラス 100 近傍にて定常状態に達する。このガス交換ユニットを備えた CUSP システムにより、通常の

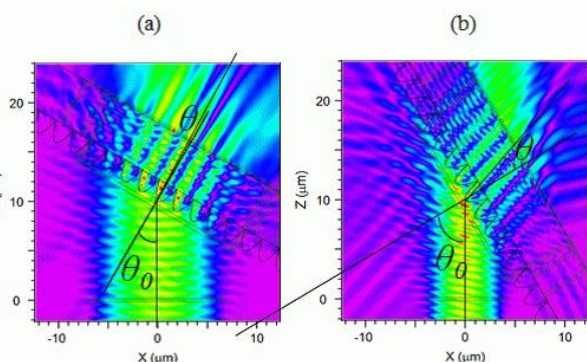


図 1 光進行方向変換層のシミュレーション結果。a) は $\theta_0=30.0$ 度、波長 2.00 μm の時の導波、b) $\theta_0=60.0$ 度、波長 1.50 μm の時の導波の様子。

部屋や教室を、US 209D クラス 100 級の清浄空間(病院の無塵室・手術室相当の清浄度)にグレードアップすることができる。単に半導体デバイスプロセス環境としてのみならず、様々な局面で生活水準の向上、健康維持に役立つと期待される。

(b)理論：

C_{3v} 対称性の下での Dirac Cone のワーピングに対する任意次数のハミルトニアン

全体の目的としては、物性理論の観点から、トポロジカルな磁性現象の解明を行い物理学への新しい知見を導入することを目的としている。その中でトポロジカル絶縁体の特異なバンド構造を利用した新奇なスピンドバイスの提案ならびにスピン軌道相互作用の非可換ゲージ場の側面を活かしたデバイスの検討を行うことにより、スピントロニクスなどの工学にも寄与することを目指している。今年度の成果は以下のものである。

Bi_2Te_3 のようなテトラジマイトカルコゲナイドの表面の Dirac コーンは、ホスト物質の表面の点群対称性を反映して、ヘキサゴナルに歪むことが実験的に 2009 年に発見された。その後、Fu が $k \cdot p$ 摂動を使って、この現象を説明したが、彼は 3 次までの摂動しか考えなかったが、それは我々の研究で不十分であることが判明した。彼の結果は、定性的にも大事なことが抜け落ちていることがわかった。我々は、任意の点群対称性のもとで、時間反転対称性を有するハミルトニアンを組織的に構成する方法を編み出した。数学の不変式論を援用すると、 C_{3v} 対称性と時間反転対称性を有する 2 準位系のハミルトニアンは、以下のように一般的に書ける。

$$H_{sym}(\mathbf{k}) = if_1(u, v)(k_+ \sigma_- - k_- \sigma_+) + f_2(u, v)(k_+^3 + k_-^3) \sigma_z + if_3(u, v)(k_+^5 \sigma_+ - k_-^5 \sigma_-),$$

$$\text{where } u = k_+ k_-, v = k_+^6 + k_-^6, f_1, f_2, f_3 \in C^\infty \quad (1)$$

ここで、 $k_\pm = k_x \pm i k_y$, $\sigma_\pm = \sigma_x \pm i \sigma_y$ で、 f_1, f_2 , と f_3 は実数値を取る C^∞ 級関数である。このハミルトニアンは C_{3v} 対称性と時間反転対称性を満たす任意次数のハミルトニアンである。我々は、これによって、任意に近似の次数を上げていくことが出来る。Fu の結果を改善するために、5 次と 7 次のハミルトニアンを考える。時間反転対称性から、奇数次しか許されない。図 3(a),(b),(c)は、それぞれ 3 次、5 次そして 7 次のハミルトニアンによる Dirac-Cone の歪みの計算で、図 3(f)の実験結果と比較すると 5 次と 7 次の方が定性的にも実験結果を上手く説明出来ている。図 3(d),(e)は 3 次と 7 次そして 5 次と 7 次のエネルギー差を示している。

図 4(a)はスピンの z 成分の運動量空間での分布を 7 次のハミルトニアンで計算した結果である。図 4(b)はスピンの z 成分の運動量空間での分布の 3 次と 7 次との差である。3 次でもスピンの立ち上がることは記述出来ているが、2 割程度のずれがあることがわかる。一方、3 次では見られない効果として、スピンと運動量とのなす角度が、3 次では図 4(c)のように 90° であるが、次数を上げると図 4(d)のように 90 度から大きくずれることが判明した。

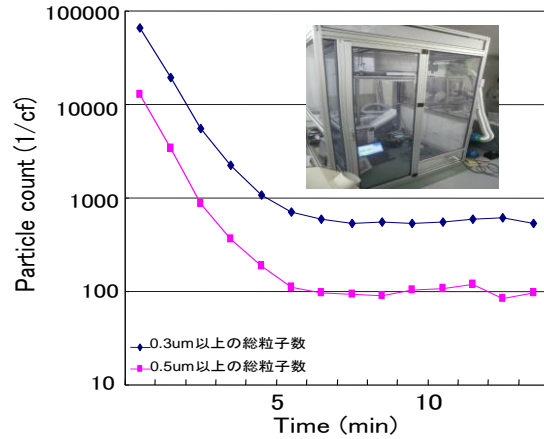


図 2. ガス交換ユニットを備えた CUSP の清浄度を時間の関数として示す。内装図は、ガス交換ユニットを備えた本 CUSP システムの写真である。

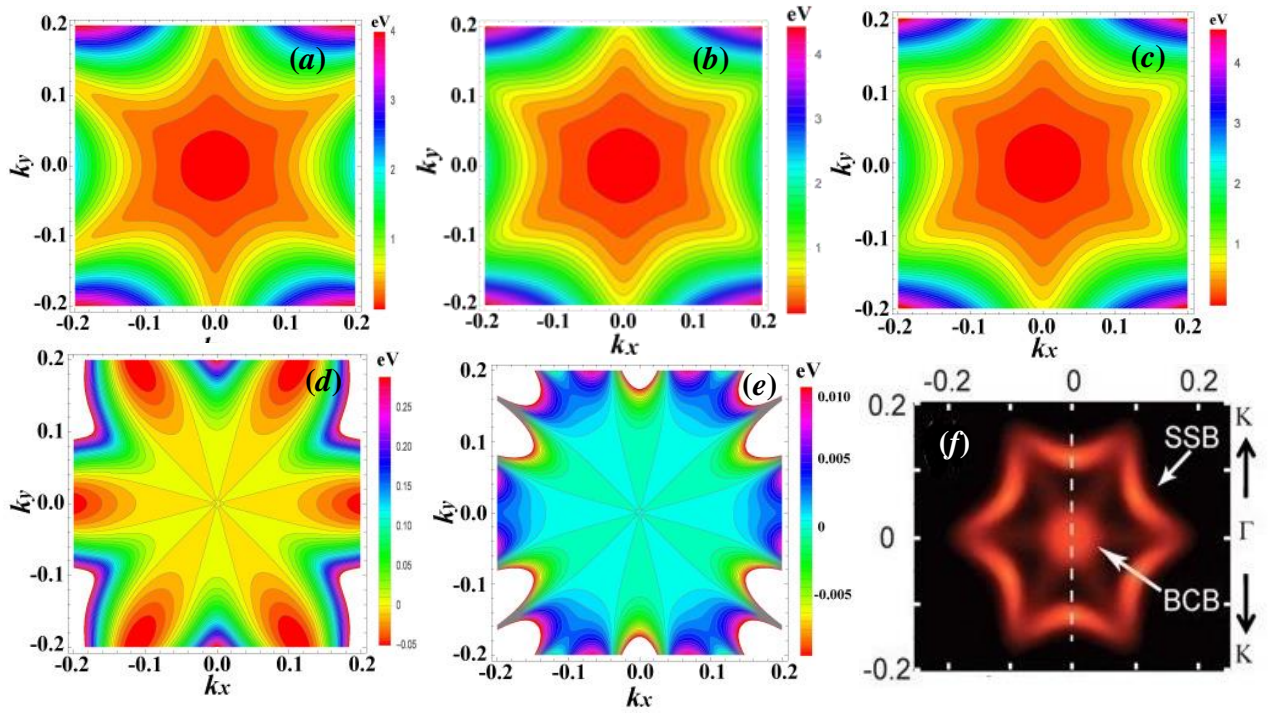


Figure 3: The calculated hexagonal warping energy of (a) using the 3rd order, (b) using the 5th order, and (c) the 7th order Hamiltonian. (d) The difference of energy between 3rd and 7th order. (e) The difference of energy between 5th and 7th order. (f) Experimental results of the hexagonal warping.

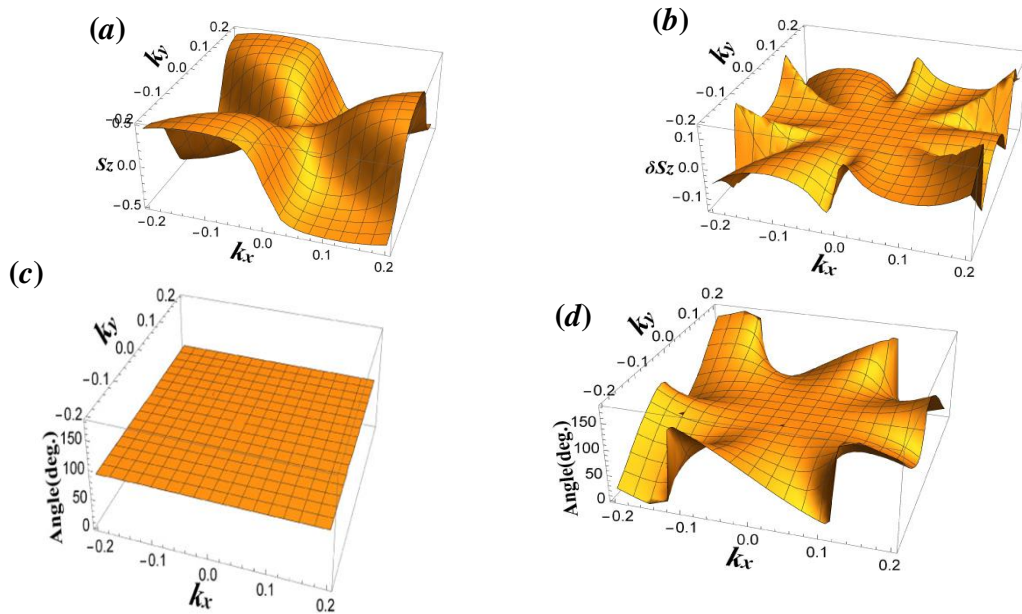


Figure 4: (a) The distribution of S_z of electron spin up to 7th order and (b) the difference of S_z of electron spin between 7th order and 3rd order perturbation. The angle between momentum and spin under (c) 3rd order and (d) 7th order perturbation.