

研究成果

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つつナノとマクロを結合することを目指している。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。

(a) 新型光電変換システムと極限高纯净環境 (Clean Unit System Platform: CUSP) の展開

非対称導波路を用いて、図1に示すような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、フォトンの進行方向に沿ってバンドギャップが減少する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 (MOP³SC) を進化させた。従来型素子は、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右下内挿図に示す断面構造において、光電変換素の側面から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が直交するため、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。図1の右下に示すような周期配列のパラボラミラーを配置した構造体を検討した。屈折率異方性を有する層を2次元導波路のクラッド層として用いることで、図の垂直下方から入射した光が、面内方向に伝播するように制御できることが示唆された。

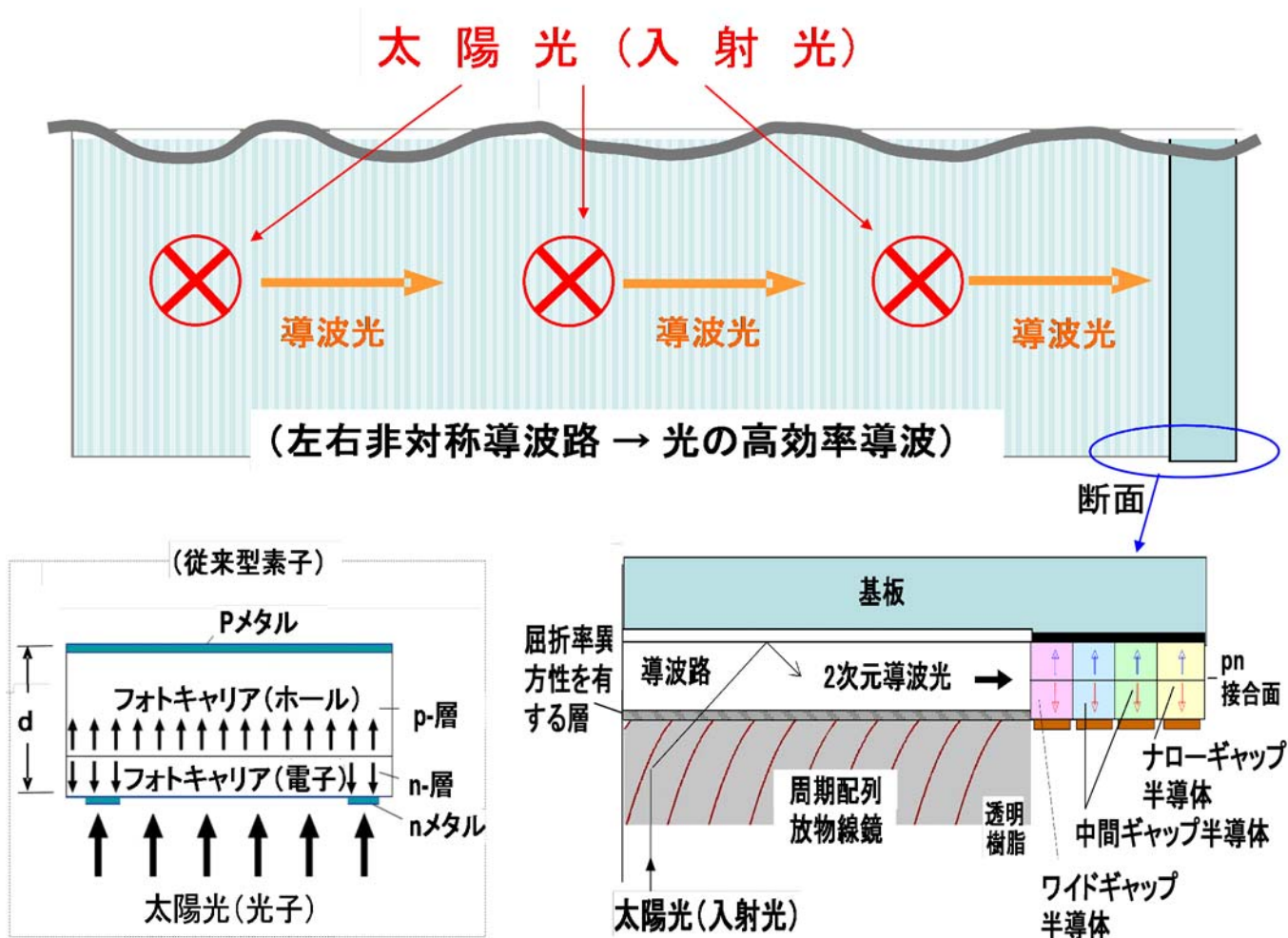


図1 非対称導波路を有する新型太陽電池システム。左下は在来型素子の断面図、右下は、新型構造の断面図。

トップダウン系とボトムアップ系を繋ぐための環境、並びに次世代素子作製のプロセス環境としてクリーンユニットシステムプラットフォーム（CUSP）を用いて、人が内部にて就寝することで、通常環境でそのまま就寝する（1立方フィート当たり、 $0.5\mu\text{m}$ 以上の塵埃の総和が数十万である典型的な通常環境にて睡眠をとる）場合に比べ、肺への塵埃の取り込みを数千分の一に抑えることができ、毎晩、呼吸器系の良いリフレッシュとなる。この高浄度環境下では、残留する粉塵微粒子によるバックグラウンドが大幅に抑えられるため、睡眠中の体動により発生する僅かな粉塵微粒子密度の変化を明確に抽出することができる。図2に示すように、この変動は睡眠の深さと相関し、この時間的変化を“Kinetosomnogram (KSG)”として睡眠クオリティの検出パラメータとして利用するという新しい概念を提出するに至った。

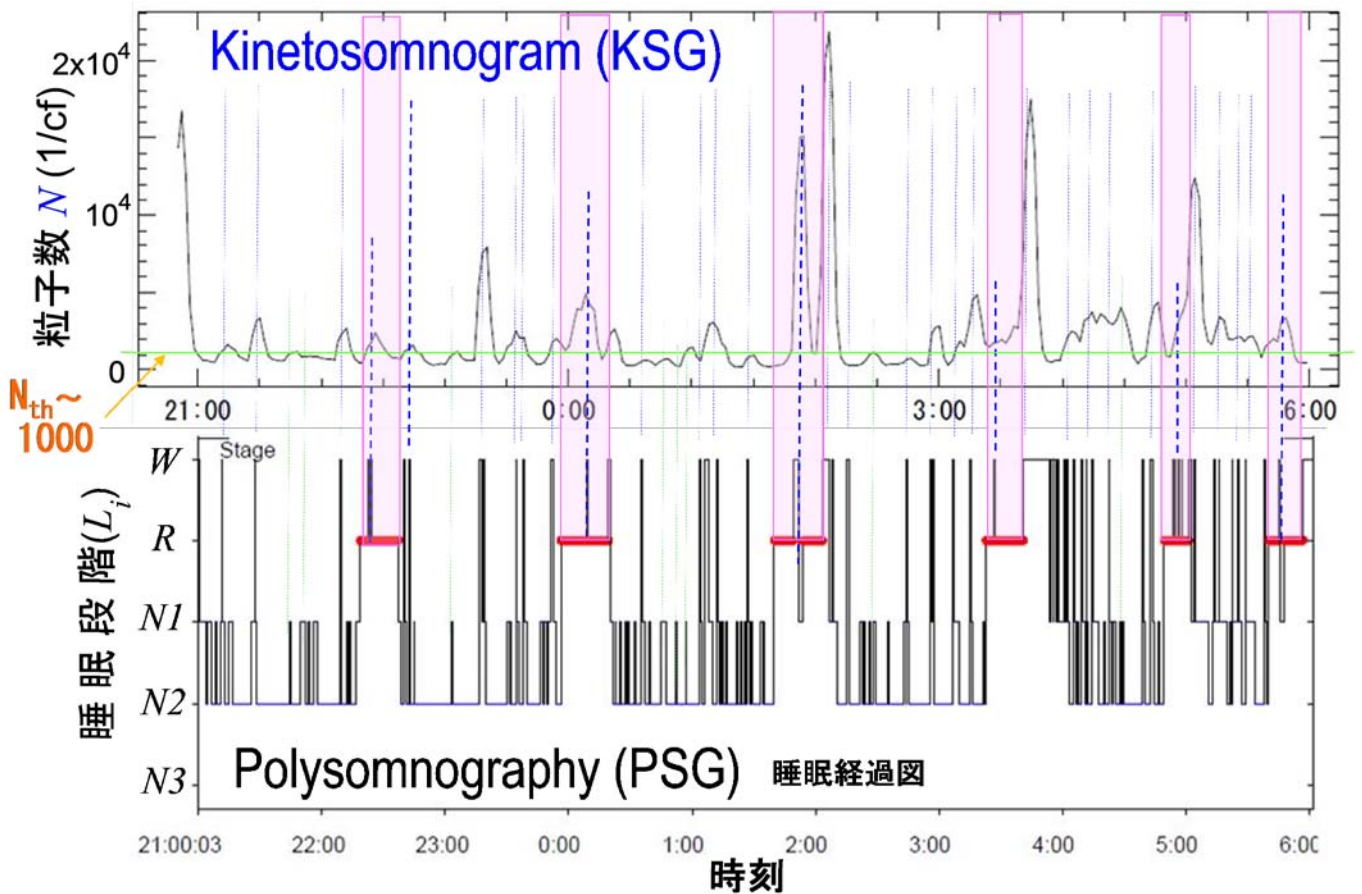
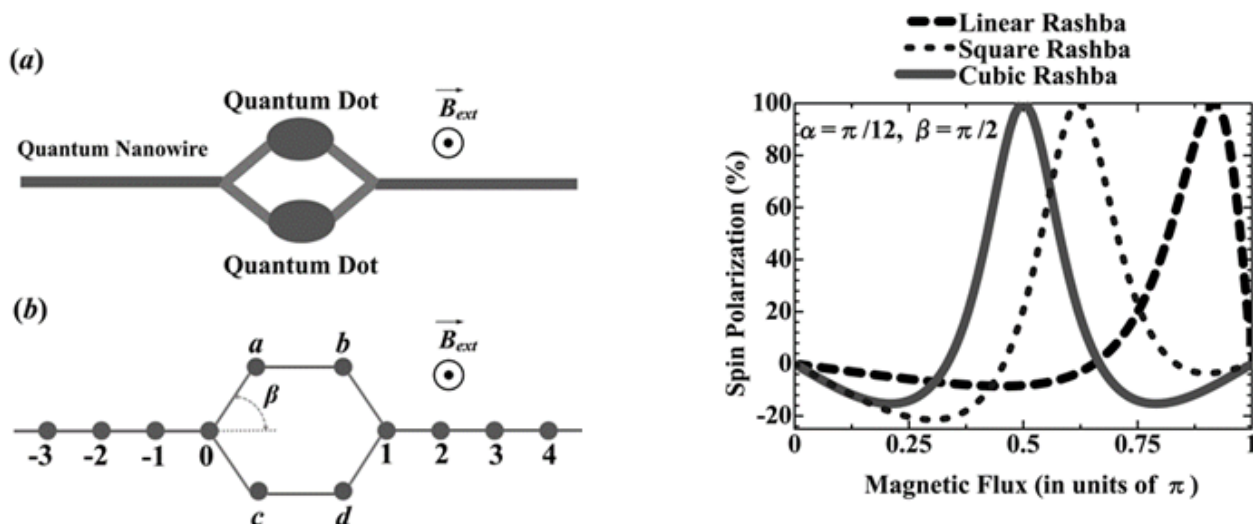


図 2. 本研究により見出されたKinetosomnogram(KSG)とポリソムノグラフィー(PSG)の比較。

(b)理論：高次Rashba効果によるアハラノフ・キャッシャー(AC)位相の導出

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や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nde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、工学的にはスピントロニクスへ寄与することを目指しており、理学的にはトポロジーの物性への影響を調べることを目的としている。今年度の成果は以下のものである。スピン軌道相互作用を非可換ゲージ場とみなした場合に1次のRashba効果や1次のDresselhaus効果では、その非可換ゲージ場をHamiltonianの平方完成を用いて得ることが出来て、それによるアハラノフ・キャッシャー(AC)位相が得られることが、先行研究で知られていた。しかしながら、2次や3次のRashba効果などの高次の場合には得ることが出来ていなかった。そのため1次Rashbaスピン軌道相互作用を有するABリングの理論や実験は沢山報告されているにも関わらず、2次や3次といった高次Rashbaスピン軌道相互作用によるABリングの理論や実験は報告されていない。そこで、非可換ゲージ場の理論を援用することにより、2次や3次のRashba効果などの高次の場合に対してもAC位相を導出することを試み、成功した。またその過程で断熱近似あるいはアーベリアン近似と呼ばれる近似に2種類の取り方があり、それらが等価であることも示せた。パウリスピン行列を基底とする非可換ゲージ場をとするとそれに対応するField of Strengthは、と表現できる。一般的な断熱近似の場合のは、ゲージ場の対角要素を残す近似であるが、それは、Field of Strengthの対角要素を残すことに等しいことは一定の考察のもとにわかった。従って、一般的な断熱近似の場合のは、である。一方、ある条件を満たせば、実は、ゲージ場の対角要素をなくして、非対角要素のみで、作られる以下に示す量も等価な断熱近似のになることが分かった。これは実空間での1次のRashba効果で自然に起こっている現象でもある。これを利用して、 n 次ラシュバ効果のAC効果による位相演算子を以下のように導出することに成功し

た。ここで kR_n は n 次のスピン軌道相互作用定数、 L は電子が走行した距離、 l_x, l_y は電子が走行した方向の単位ベクトルの x, y 成分である。この結果を用いて図3(a)のようにリング状に形成された2個の量子ドットと量子ナノワイヤにおいて1次、2次、そして3次のRashbaスピン軌道相互作用が働く場合に外部磁場を作用させた際に起きるAB効果において、高次スピン軌道相互作用が及ぼす影響について検討した。図3(b)は計算に用いた強結合近似のモデルである。図4は、この2個の量子ドットからなるアハラノフ・ボームリングのデバイスにおいて、1次、2次、3次Rashba効果が働いた場合のスピン分極率の磁束依存性のグラフであり、スピンフィルタリング効果における1次、2次、そして3次のRashbaスピン軌道相互作用の効果の違いを示す。この結果から、この素子でスピンを完全にフィルタリング出来ること、ならびに完全スピン偏極を起こす磁束の値から働いているRashbaスピン軌道相互作用の次数の決定を容易に実行可能であることがわかる。



左…図3: (a) モデル構造と(b) tight-binding近似 右…図4: : 外部磁束とリング状のドットとナノワイヤによるスピンフィルタリング効果の結果