

半導体量子ドットによる量子情報デバイス

半導体量子ドットを用いて1個1個の電子を正確に制御・観測する技術が進展し、単一電子の量子ダイナミクスを探る研究が盛んに行われています。半導体ナノ構造の物性の理解により、量子情報を操作することのできる量子情報デバイスが実現されるようになり、量子コンピュータへの発展が期待されています。本稿では、量子ドットを用いた量子情報デバイスの研究の進展状況を紹介します。

ふじさわ としまさ

藤澤 利正

NTT物性科学基礎研究所

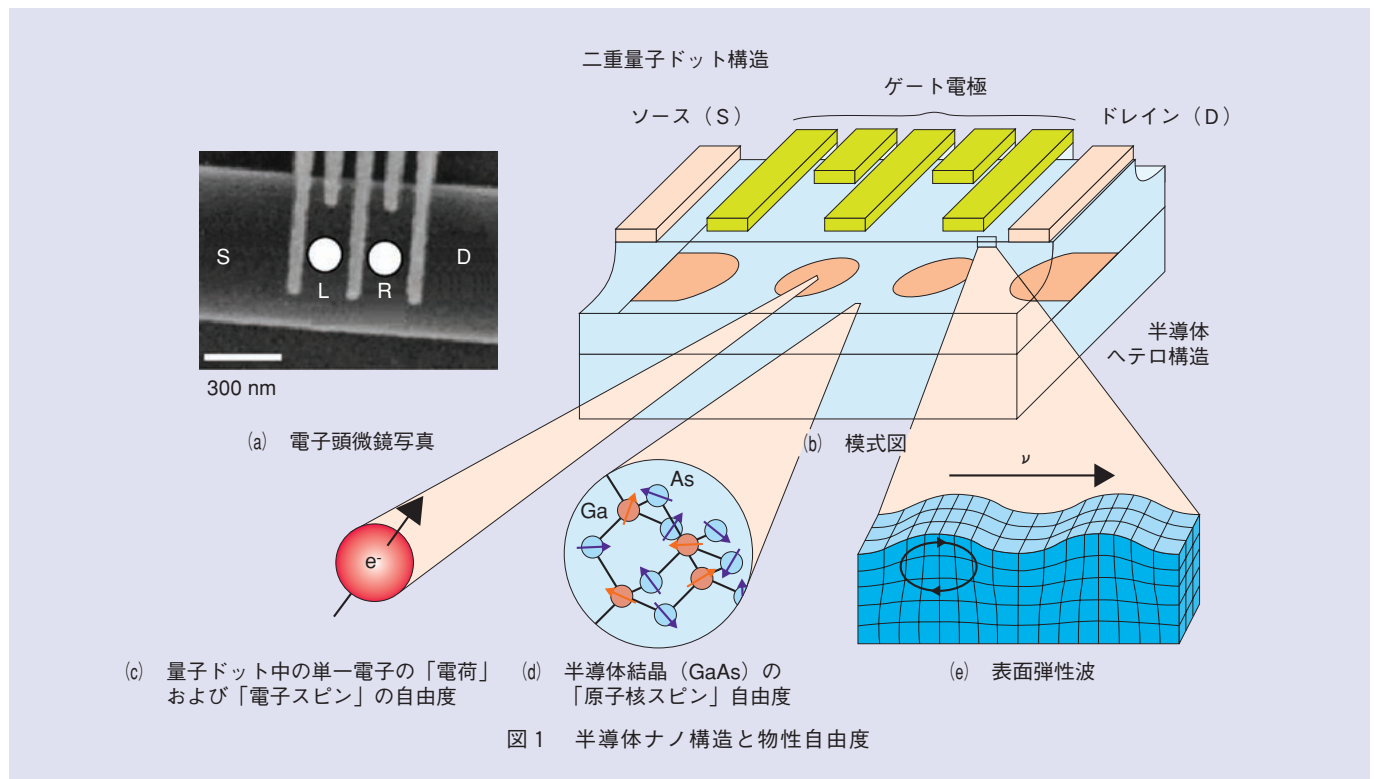
単一電子を操る

現代のエレクトロニクスは、電子の流れを制御するトランジスタの発達によってもたらされました。素子の寸法がナノメートル領域になると、素子に含まれる電子の数は著しく少なくなり、やがて個々の電子の物性が顕著に表れるようになります。現在のリソグラフィ技術によってつくることのできる寸法

(10~100 nm)の素子においても、電子1個の増減によって特性が大きく変化する単一電子素子を実設計・作成することができ、省電力素子や新しい機能素子への応用が期待されています。一方で、電子1個または少数電子の量子力学的な物性を利用して、新しい情報処理技術(量子コンピュータ)に応用する研究が世界中で進められています。いまだ基礎研究の段階ですが、

ここ10年で大きな研究発展があり、これからも進展する研究分野であると思われる^{(1)~(3)}。

NTT研究所では、半導体量子ドットの時間依存トンネル現象やそれを利用した量子情報デバイスに関して多くの研究実績があります⁽¹⁾。図1は、典型的な半導体量子ドット(二重量子ドット)の構造を示しています。このような構造は、分子線エピタキシー技術



による高品位結晶成長と、電子ビームリソグラフィ技術によるナノ加工技術によって作成することができます。この例では、ソース・ドレイン電極間に5つの微細ゲート電極をもち、これらのゲート電圧を調整することにより、2つの量子ドット（二重量子ドット）を形成するとともに、量子ドットのさまざまなパラメータを独立に調整することができるのです。また、高周波測定技術との組合せにより、さまざまな物性測定が可能になりました。

例えば、二重量子ドットが分子のような結合状態（静電結合と共有結合を兼ね備える）を示すことは、マイクロ波照射の分光測定により明らかになりました。二重量子ドットを用いた電荷量子ビットの実現（後述）は、このような分子状態の結合エネルギーを最適な値に合わせることで実現することができ、半導体ナノ構造が量子情報デバイスとして機能することを示す重要な1ステップになったと考えています⁽²⁾。

また、量子ドット中の電子は、それ自身の電子スピン自由度に関する興味深い物性を示し、半導体結晶（GaAs）を構成する原子核の核スピンとの相互作用によって、複雑かつ興味深い物性を示すことが分かってきました。これらの電子スピンまたは核スピンの自由度を用いることにより可干渉性（コヒーレンス）が高く、高速な演算も可能になる機能的な量子情報デバイスの設

計・応用が可能になると期待されています⁽³⁾。

さらに、量子ドットの単一電子状態は結晶格子の振動モード（バルクフォノン、表面弾性波フォノン）との相互作用が強いことが知られています。電子と格子の相互作用は従来あまり注目されてきませんでした。新たな視点から相互作用を見直すことにより、新しい量子情報デバイスへの指針が得られる可能性もあります。本稿では、量子ドットで見られるさまざまな物性を量子情報デバイスという観点から俯瞰したいと思います。

量子情報デバイスとは

量子情報デバイスとは、量子情報を記録することのできるメモリ（量子ビット）そのものでもあり、そこに情報を書き込み・読み出し・操作を行うための素子を含めた周辺デバイス・回路であり、これらの集積化によって量子コンピュータなど高度な量子情報処理が可能になると考えています。

量子情報デバイスの実現には、単一粒子（この場合、単一電子）の粒子性と波動性を制御できる形で利用し、集積化していくことが必要です。波動性の性質、すなわち干渉効果を利用することにより、所望の結果を効率的に得ることができ、粒子性の性質を利用することにより、0と1のデジタル情報として情報を入出力することができます。量子コンピュータにおける量子

情報処理では、粒子的な性質を利用して初期状態を入力し、波動性を利用して情報処理を行い、再び粒子性を利用して結果を読み出すという流れで処理が進みます。

このような情報処理を行うデバイスには、DiVincenzoによって提案された次の5つの要請を満たすことが重要です。

- ① 量子状態をある初期状態に準備できること
- ② 複数の量子状態をプログラマブルに干渉させることができる（任意の論理演算が可能である）こと
- ③ 計算後の量子状態を正確に読み出すこと
- ④ 十分な規模の集積化が可能であること
- ⑤ すべての計算が終了するまでに可干渉（コヒーレント）な状態を維持できること

これらの要請がどの程度満足できるのかによって、量子情報デバイスとしての資質が議論されています。

電荷量子ビットの進展

図1のような二重量子ドットによる半導体電荷量子ビットでは、単一電子が左の量子ドットを占有する状態（ $|L\rangle$ ）と右の量子ドットを占有する状態（ $|R\rangle$ ）を用いて量子二準位系がつくられます。古典的にはこの2つの状態のどちらかしか許されませんが、量子的世界ではこの2つの状態の線形

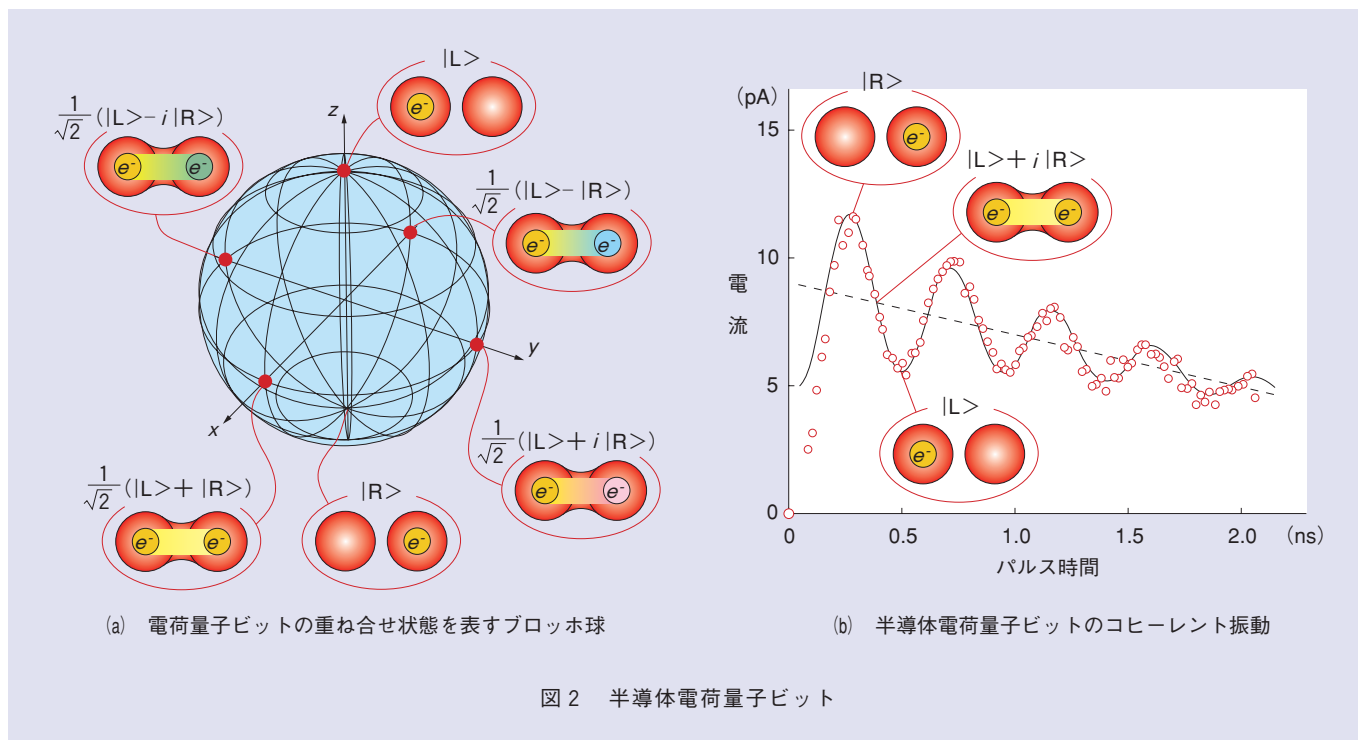


図2 半導体電荷量子ビット

重ね合せ状態も許されるため、取り得る状態は無数にあります。図2(a)は、さまざまな重ね合せ状態をブロッホ球によって表したもので、北極に相当する $|L\rangle$ と南極に相当する $|R\rangle$ 以外は、それらの重ね合せ状態を示しています。2状態の重ね合せの比率はブロッホ球の緯度によって、また両者の位相差は経度によって表されます。たった1つの粒子の二状態でありながら、量子情報では緯度と経度という2つの自由度を持つことができるのです。

電荷量子ビットの重ね合せ状態は、二重量子ドットに電氣的な高速パルス印加することによって実現されました⁽²⁾。図2(b)の実験結果は、初期

状態として電子を左の量子ドットに準備 $(|L\rangle)$ した後に、高速電圧パルスを印加し、右の量子ドットの存在確率に比例した電流を測定したもので、パルス時間に対して観測される振動パターンは、 $|L\rangle$ と $|R\rangle$ の重ね合せ(緯度)を制御できていることを示しています。また、電圧パルスの波形を調整させることにより、ブロッホ球上の任意の量子状態をつくる実験にも成功しており、1量子ビットの任意の量子ゲートを設計することができます。

このような二重量子ドットを2つ近接して形成することにより、2量子ビットの実験が可能になると考えられます。我々は2つの二重量子ドット間

に十分な大きさの静電結合が生じることを実験的に確認しており、今後の研究により2量子ビット操作に関する研究が進展するものと考えています。

電荷状態の読み出し技術

前項の実験では、初期化—コヒーレント操作—測定のプロセスで高々1個の電子しか流れないため、1回の過程で結果を得ることはできず、多数回の過程を繰り返すことによって電流として結果を得ていました。量子コンピュータの読み出し技術では1回の過程ごとに結果を読み出せること(シングルショット測定)が望ましく、高感度な電流測定技術が必要です。

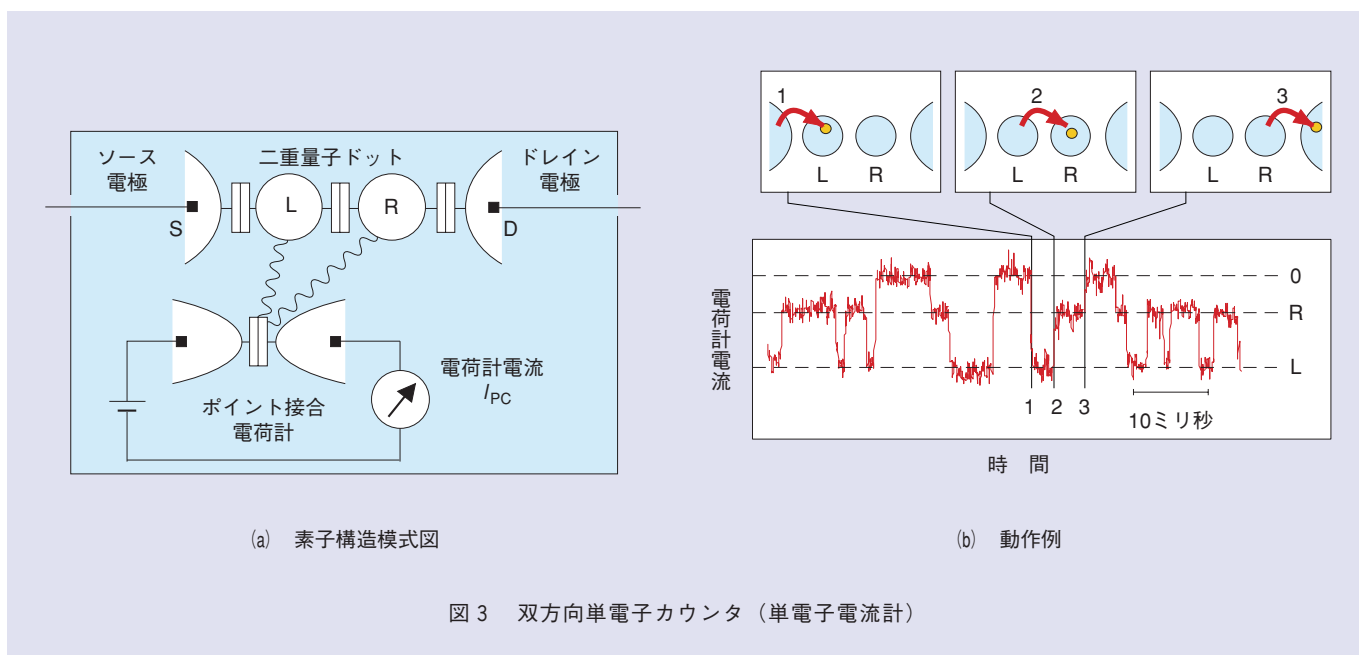


図3(a)は、たった1個の電子の流れを観測可能にする双方向単電子カウンティング素子の模式図を表しています。電流は、ソース電極から入り二重量子ドットを通過してドレイン電極へ流れます。このときの二重量子ドットの電荷状態の変化を、近接したポイント接合電荷計によって読み出すことができます。半導体でつくられたポイント接合はトンネル障壁の高さが周囲の電荷状態によって変化するため、高感度な電荷計として動作します。図3(b)はその測定例を示しており、電荷計電流が3つ電流値の間を飛び移る様子は、挿入図のように電子1個の動きを正確に測定できていることを表しています。

我々は、双方向単電子カウンティン

グ素子によって「いつどの方向に電子が流れたか」を正確に測定することができることを示したとともに、電流電子の統計的な性質（雑音特性）を調べる有力な手法になることを明らかにしました。このような手法は、微少電流の検出が必要なナノエレクトロニクスや分子エレクトロニクスの研究の進展にも貢献するものと期待しています。

電荷量子ビットのシングルショット測定に応用するためには、二重量子ドットに直接電荷計を結合することが効率的です。電荷状態のエネルギー緩和時間よりも高速に電荷状態を測定することにより、シングルショット測定を実現できると考えています。

電子スピン・核スピンへの期待

前項で述べた電荷量子ビットは、ナノ秒以下の高速な量子情報操作が可能であることなどの特徴を有していますが、緩和時間をあまり長くできないというデメリットがあります。そこで、より長い緩和時間を有する電子スピンや核スピンの利用が期待されています。

我々は、量子ドットでの電子スピンの緩和時間を調べるため電氣的なポンププローブ測定を考案し、電子の軌道（電荷）自由度とスピン自由度の寿命に関する重要な知見を得ることに成功しました。図4(a)はその測定に用いた縦型量子ドットの構造と測定系の模式図を表しています。パルス電圧を印加することにより、量子ドットに電子

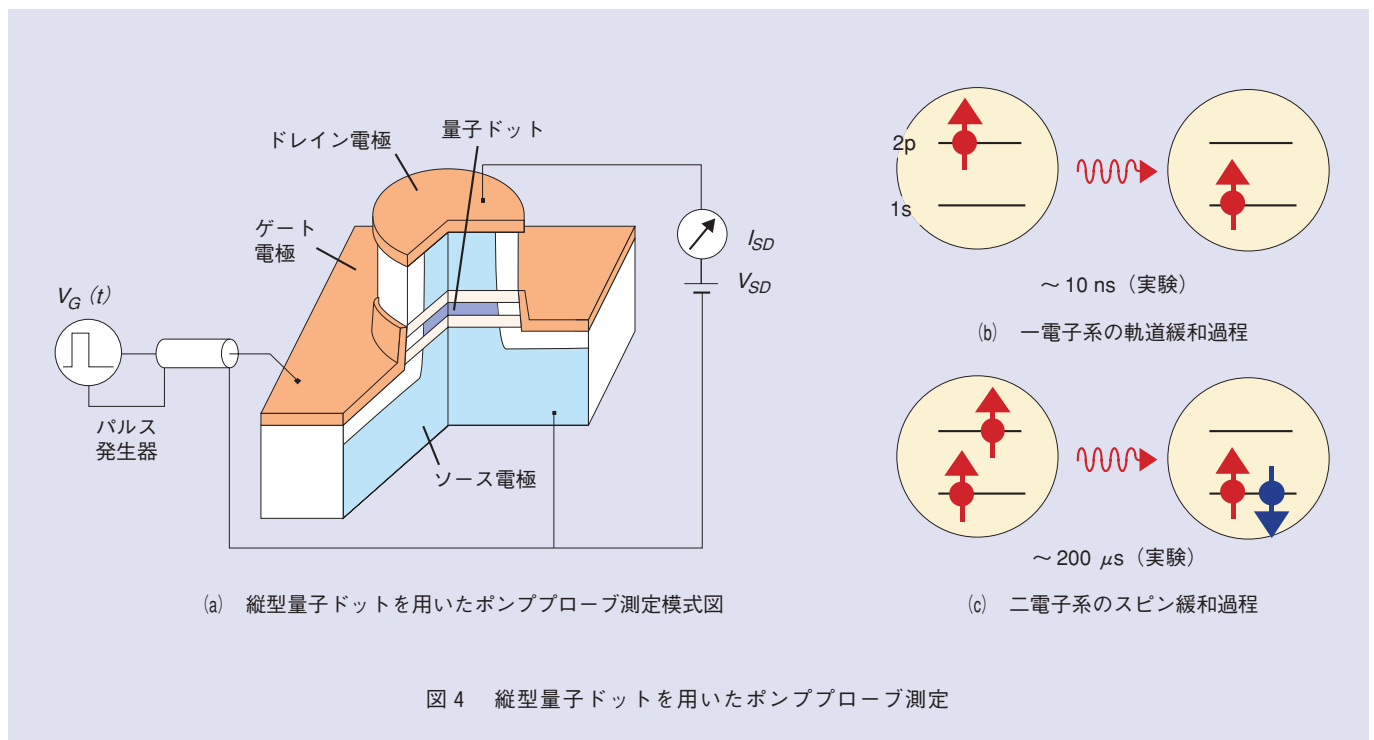


図4 縦型量子ドットを用いたポンププローブ測定

を注入して励起状態を準備（ポンプ）した後に、ある待ち時間後に系が励起状態に残されている確率を測定（プローブ）することにより、励起状態から基底状態に緩和する特徴的な時間を測定することができます。

量子ドットに1個の電子が占有している場合には、励起状態（2p軌道を占有）から基底状態（1s軌道を占有）への緩和は電子格子散乱が支配的で10ナノ秒程度の緩和時間しか得られません（図4 (b)）。しかし、2個の電子を有する場合には、スピン三重項の励起状態からスピン一重項の基底状態への遷移にスピン緩和を伴うため数百マイクロ秒という長い時間が必要で

す（図4 (c)）。このような実験事実から、電子スピンを量子ビットとして使う研究が盛んに行われるようになりました。

核スピンは、電子スピンよりもさらに長い緩和時間を有しているため、量子情報の記録媒体（メモリ）として注目されています。実際、電子スピンと核スピンとの相互作用が実験的にも明らかになりつつあり、電子スピンの情報を核スピン状態に転写できるようになる可能性もあります。

極低温測定技術

半導体ナノ構造を用いて量子現象を観測するためには、低雑音で極低温の

環境が必要です。図5は、絶対温度0.01 K程度に冷却することのできる希釈冷凍機の模式図を示しています。希釈冷凍機では、ヘリウム4がたまった混合器にヘリウム3を循環することにより、連続的に冷却を行うことができます。また、超伝導同軸ケーブルによる高周波技術や、極低温ノイズフィルタ・銅パウダーフィルタなどによる熱雑音（マイクロ波からTHz領域）の除去技術によって、極低温・低雑音下での高周波測定が可能になります。このような要素技術の組み合わせによって、量子情報デバイスの性能が着実に進展しています。

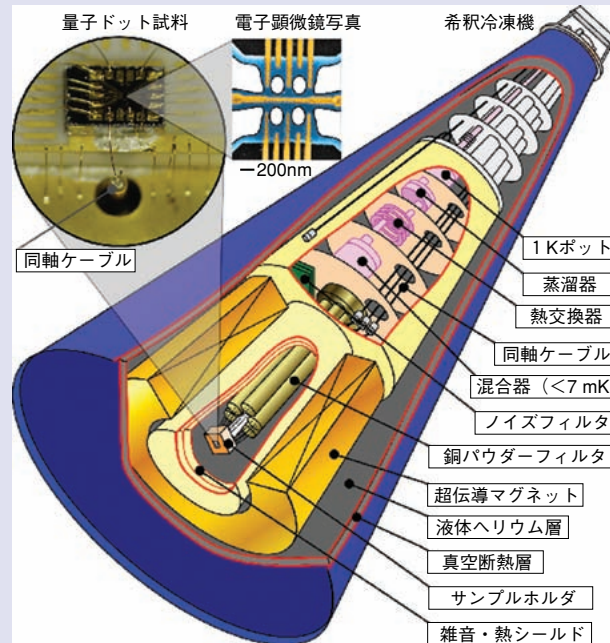


図5 希釈冷凍機による極低温・低雑音測定の様式図

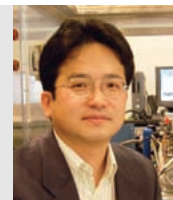
量子情報デバイスへの展望

半導体量子ドットでは、ナノ加工技術によって（形のうえでは）集積化量子デバイスが可能であり（DiVincenzoの要請④に相当）、量子情報の初期化（同①）・量子情報操作（同②）・読み出し回路（同③）に関する研究が続けられています。また、さまざまな物性自由度を利用できるため、電荷状態のみならず・電子スピンや核スピンにより長いコヒーレント時間が得られる（同⑤）可能性があります。これらの特徴を生かすためには、異なる量子ビット（物性自由度）の間での量子情

報の交換（インタフェース）技術が重要になると思われます。半導体物性に関する基礎研究を重ねることによって、量子情報技術を一步ずつ蓄積することができると期待しています。

■参考文献

- (1) 高柳・安藤・藤澤：“量子効果から量子回路へー量子コンピュータの実現を目指してー,” NTT技術ジャーナル, Vol.11, No.10, pp.20-26, 1999.
- (2) 林：“半導体二重量子ドットを用いた電荷量子ビット,” NTT技術ジャーナルVol.16, No.1, p.46-49, 2004.
- (3) <http://www.brl.ntt.co.jp/people/fujisawa/papers/>



藤澤 利正

量子ドットの単一電子ダイナミクスの研究によって、ナノ構造での電子物性の本質を追究するとともに、応用可能な技術の創出を目指しています。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
TEL 046-240-3449
FAX 046-240-4727
E-mail fujisawa@will.brl.ntt.co.jp