

半導体デバイス中の量子状態実空間観測

電子波の干渉，量子閉じ込め，トンネル効果といった量子力学の基本現象を，半導体で作製した人工ポテンシャル構造と走査トンネル顕微鏡を用いて，ナノメートルスケールで実空間観測・可視化する技術について解説します。

すずき きょういち かにさわ きよし
鈴木 恭一 / 蟹澤 聖

NTT物性科学基礎研究所

波動性に支配されるこれからの半導体デバイス

現在の情報化社会を支えている半導体デバイスでは，内部の荷電粒子（電子，正孔）の数を制御することにより，その機能が実現されています。しかし，高度の微細化・集積化で，集積回路の配線幅は数十ナノメートルに，また，後述する半導体ヘテロ構造デバイスでは，各半導体層はわずか数ナノメートルの厚さになってきました。こうなると，次項で説明するように，電子の持つ量子力学的性質である波動性が，デバイス特性に与える影響が無視できなくなります。そのため，今後の半導体デバイスの発展を考えるうえで，デバイス内部における荷電粒子の量子力学的状態を実空間で調べる技術の確立が急務となっています。

NTT物性科学基礎研究所では，走査トンネル分光という手法を用いて，半導体デバイス中の量子力学的状態をナノメートルの空間分解能で観測・可視化する技術について研究，開発を行っています。本稿では，半導体ヘテロ構造を用いて作製した典型的なポテンシャル構造において実空間観測された，量子力学の基本的な現象について

紹介します。この技術は，現在NTTが進めている量子情報処理における，量子ビット*1内部の量子状態の解析や，量子効果を利用する新たなデバイス開発に，将来大きな威力を発揮すると期待されます。

量子力学の基本現象

物質は，実態を持つ粒子としての性質とともに，波としての特徴を示す波動性を持つことが知られています。この波を物質波またはド・ブロイ波と呼び，運動量が $mv = h/\lambda$ (m : 質量， v : 速度， $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s: プランク定数， λ : 物質波の波長) の関係があります。質量が大きい物質では，その波長は非常に短く，波動性は観測にほとんど影響を与えないので，古典物理学で扱えます。しかし，質量の小さい物質では，波動性のほうが重要となってきます。例えば，真空中で1.5 Vで加速した，電子（質量 9.1×10^{-31} kg）の波長は約1 nmとなります。半導体中の電子の実効的な質量（有効質量）は真空中の電子よりも1桁以上軽く，その波長は数ナノメートルとなります。こうなると，ナノメートルスケールに加工された半導体中の物理現象は，もはや古典物理学では取り扱えず，物質を

波として扱う，量子力学の導入が必須となります。

量子力学では，物質の状態は，物質波の重ね合わせである波動関数 $\phi(x)$ (x は位置) によって表されます。この波動関数の方程式（シュレディンガー方程式）を各種条件下において解くことで，起こり得る状態やその時間変化が確率的に見いだされます。ここで，波動関数の2乗 ($|\phi(x)|^2$) は物質の存在確率を表します。この量子力学の基本現象として，以下に説明する3つが挙げられます。当然，これらの現象を古典物理学で説明することはできません。

(1) 物質波の反射

無限に高いポテンシャル（エネルギー障壁）に物質が衝突すると，物質波は弾性散乱（エネルギーが保存）され，反射波となります（図1(a)）。波動関数はこの入射波と反射波の重ね合わせになり，光と同様に干渉し，存在確率は空間的に定在波を形成します。

*1 量子ビット：従来の情報処理におけるビットは，0と1のどちらかの状態を取るのに対して，量子ビットは，0と1の状態の量子力学的重ね合わせ状態を取ります。NTTでは，半導体量子ドット，超伝導回路，核スピンといったナノメートルスケールの微細構造を量子ビットとして用い，量子情報処理の実現に向けた研究をしています。

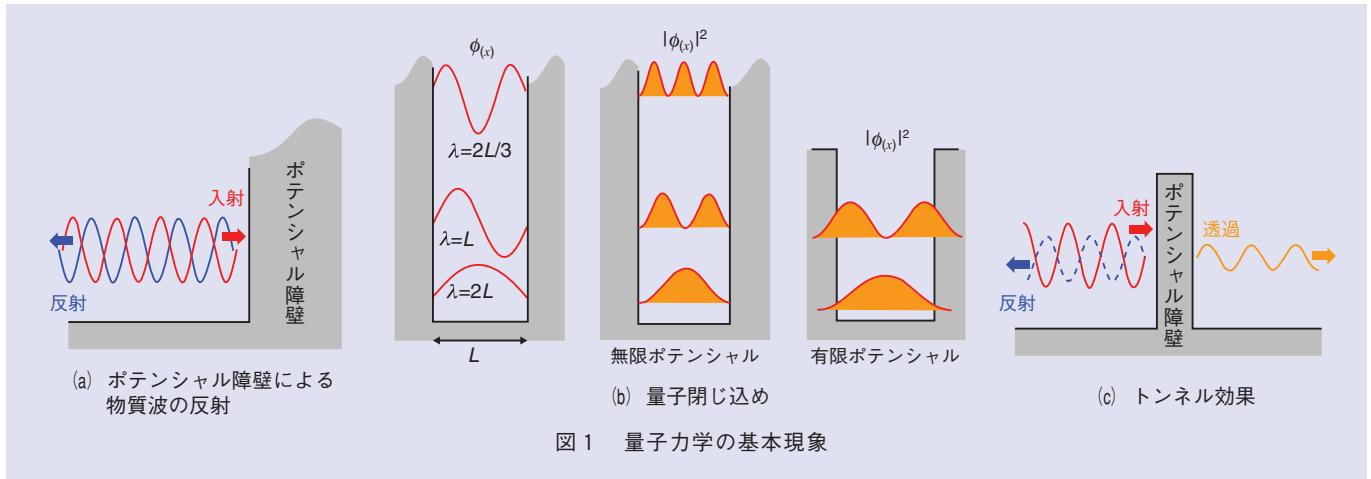


図1 量子力学の基本現象

(2) 量子閉じ込め

物質が無限に深い幅 L のポテンシャル井戸（量子井戸）に、一次元的に閉じ込められた場合（図1 (b)）、その物質の閉じ込め方向に許される運動、つまり一次元の波動関数 $\phi(x)$ は、波長 $\lambda = 2L/n$ (n は整数) を持つものだけになり、サブバンドと呼ばれる離散的なエネルギー準位 $E = \hbar^2 k^2 / 2m^*$ (波数 $k = 2\pi/\lambda$, m^* は有効質量, $\hbar = h/2\pi$) を取ります。井戸の深さが有限のときは、その波動関数は減衰しながら井戸の外へ浸み出します。

(3) トンネル効果

ポテンシャル高さが有限で、物質の持つエネルギーより高い障壁がある場合、物質波は反射されるほかに、障壁中に減衰しながら浸透します（図1 (c)）。障壁が極めて薄いときには、物質波は障壁を透過し、その透過確率は無視できない値になります。

半導体ヘテロ構造

異なる半導体どうしを接合した半導体ヘテロ構造では、量子井戸やポテンシャル障壁といった、急峻に変化する任意のポテンシャル形状の作製が可能です。半導体ヘテロ構造は、ヘテロ界面付近の高い電子移動度を利用した高速電子デバイスや、量子井戸内にお

ける高効率の電子-正孔結合を利用したレーザ等の光デバイスとして、現在、幅広く応用がなされています。今回、我々が試料として用いたInAs/GaSbヘテロ構造は、InAsの量子井戸に形成されたエネルギー準位間の光学遷移を利用した中赤外光デバイスとして注目されています。

前述しましたが、これらのデバイスの特性は、電子、正孔の波動性、つまり、内部に分布した波動関数により支配されます。このため、設計したポテンシャル形状から導かれる波動関数が、デバイス中で実現されているか否かが大きな問題となります。さまざまな電気的および光学的測定で、内部の波動関数について調べられていますが、従来の測定方法では、電子や正孔の統計的集団運動の平均を、ある程度広い領域について計測するもので、局所的な波動関数については、得られた測定結果と設計したポテンシャルを比較することで、その形を推測するほかありませんでした。実際には、ヘテロ構造内部の波動関数は、不純物等の不規則なポテンシャル揺らぎや、層厚の揺らぎなどのために、局所的に変調を受けているはずで、これらは設計からのずれを引き起こし、デバイス特性に大きな問題となります。デバイスの

特性向上のためには、変調を受けた波動関数を実空間で精密に知ることが必要となります。波動関数それ自体は、物理的に観測不可能なものですが、その2乗である存在確率分布の測定は次に示す手法で可能となります。

走査トンネル顕微鏡 (STM) と走査トンネル分光 (STS)

電圧をかけた伝導体どうしを数ナノメートルまで近接させると、そのすき間をトンネル電流と呼ばれる微少な電流が流れます。STMは、ピコメートルの精度で三次元的に位置を制御できる圧電素子に、鋭くとがった探針を取り付け、近接させた探針と試料の間に電圧をかけ、トンネル電流が一定になるように探針-試料間の距離をフィードバック制御します（図2）。この状態で試料面に沿って探針を走査し、探針-試料間距離の変異を測定することで、試料表面の凹凸を原子間隔以下の分解能で観測することができます。

STSは、STMを用いて、探針-試料間距離を固定し、試料-探針間の電圧 (V) を変化させたときのトンネル電流 (I) を測定するものです。このとき、規格化微分トンネルコンダクタンス $[(dI/dV) / (I/V)]$ (電圧の関数) は、探針直下の電子または正

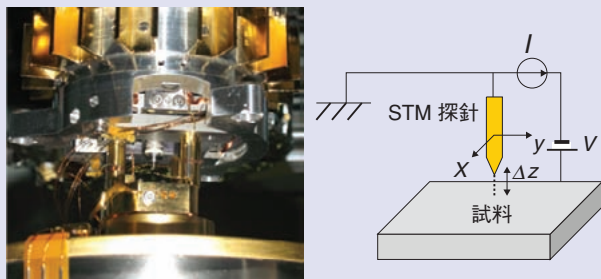


図2 走査トンネル顕微鏡と走査トンネル分光

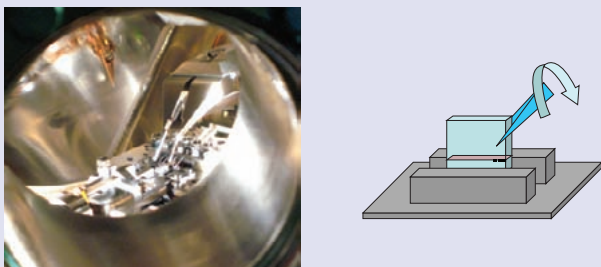


図4 超高真空中の劈開

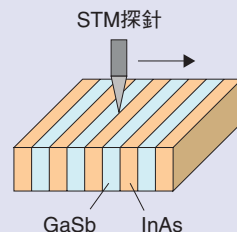
孔の状態密度^{*2}に比例することが知られています。ここで、電圧 (V [V]) は、フェルミレベル (電子が収容されている状態の中で一番高いエネルギー) から測ったエネルギー (V [eV], $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$) に対応します。探針を走査することで、各エネルギーにおける状態密度の空間分布を知ることができます。これは、波動関数の2乗である、存在確率に比例することが知られています。

ヘテロ構造断面のSTS

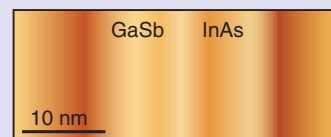
ヘテロ構造断面にSTSを適用し、探針をその断面に沿って走査することで、状態密度の空間分布を知ることができます (図3(a))。このとき、断面に凹凸や吸着物があると、ポテンシャルが乱され、ヘテロ構造内部の情報を得ることができません。そこで、吸着物のない、清浄で平坦な断面を得るために、超高真空中 (10^{-8} Pa) で試料を劈開^{*3}

します (図4)。都合の良いことに、III-V族半導体ヘテロ構造では、層構造に対して垂直な劈開面を容易に得ることができます。その後、試料は真空を破らずにSTMへ送られます。エネルギー分解能の向上と、熱膨張による位置の揺らぎを防ぐため、試料およびSTMは低温 (5 K) に冷やされます。

図3(b)は、InAs/GaSbヘテロ構造劈開面のSTM像です。劈開表面の原子配位は平坦にもかかわらず、内部の電子状態の違いにより、図のようにInAs層、GaSb層の区別がつかます。GaSb層はInAs層の電子に対して0.96 eVのポテンシャル障壁となります (図3(c))。今回は、InAs/GaSbヘテロ構造で作製した、単一ポテンシャル障壁、単一量子井戸、二重量子井戸について、劈開断面のSTS測定を行った結果を紹介します。



(a) ヘテロ構造劈開面のSTS



(b) 劈開面のSTM像



(c) ポテンシャル形状

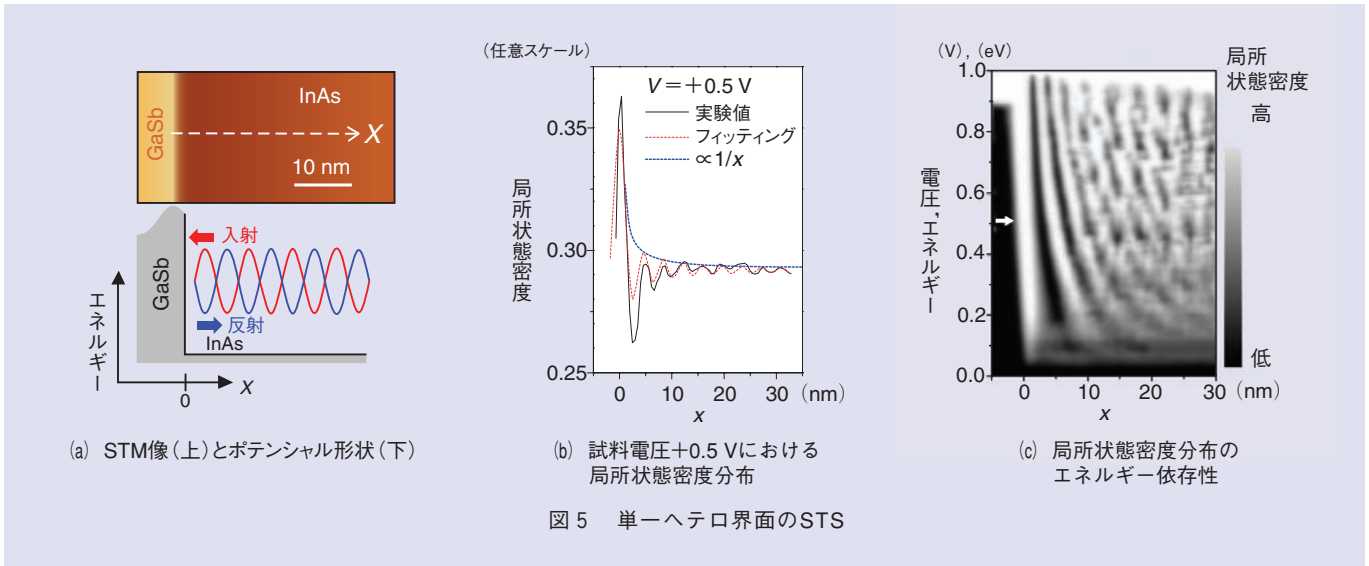
図3 InAs/GaSbヘテロ構造

単一ポテンシャル障壁における電子波の反射

図5(a)上図は、InAs/GaSb単一ヘテロ接合試料劈開面のSTM像で、明るい領域がGaSb層、暗い領域がInAs層です。この表面について、矢印に沿って、障壁に垂直に探針を走査しながらSTS測定を行いました。図5(b)は $V=0.5 \text{ V}$ における、STSの測定結果で、障壁からの距離に対する状態密度の変化を表しています。図5(a)下図に示したように、InAs層からGaSb障壁に入射する電子波と、反射される電子波が干渉し、状態密度の定在波が形

*2 状態密度：正電圧のときは、電子が収容可能な“空いている状態”の密度、負電圧のときは、電子がすでに収容されている“つまっている状態”の密度です。

*3 劈開 (へきかい)：結晶には特定方向に原子間の結合力の弱い面があり、それに沿うように結晶を割ること。このとき割れて現れる面を劈開面といいます。 $\mu\text{m}^2 \sim \text{mm}^2$ のスケールで、原子レベルで平坦な面が得られます。

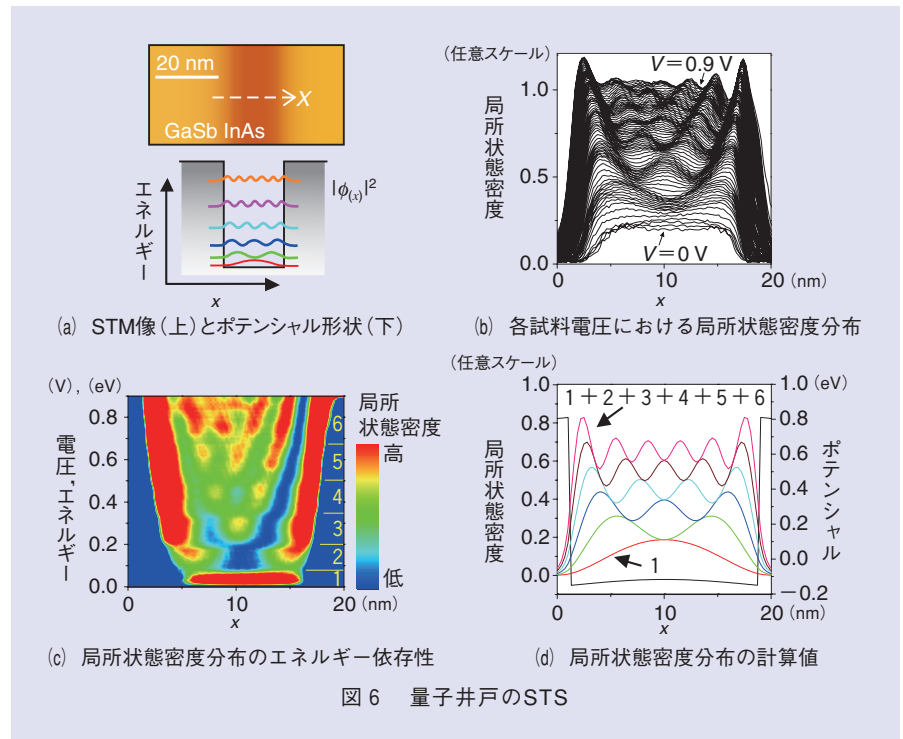


成されているのがわかります。干渉により形成される定在波の波長は、入射・反射電子波長の半分であることが知られていますので、観測された定在波長を2倍にすることで、電子波長が即座に求まります。振動の減衰が距離に反比例しているのは、InAs層で三次元的な運動をしている電子が、ポテンシャル障壁面で弾性散乱されていることを示しています。

状態密度分布をエネルギーと距離に対して明暗で表したのが、図5(c)です。エネルギーが高くなるにつれて、定在波の波長が短くなっており、これは、高エネルギーほど電子波長が短いことを示しています。この測定結果から、半導体デバイス作製において重要な情報である、電子波長とエネルギーの関係や有効質量を局所的に知ることができます。

単一量子井戸中のサブバンド

薄いInAs層をGaSb層で挟むことで、InAs層が量子井戸となります。図6(a)は、単一量子井戸劈開面のSTM像で、井戸幅は実測で16 nmです。矢印に沿ってSTS測定を行い可視化しました。状態密度の空間分布を各試料



印加電圧についてプロットしたのが、図6(b)です。量子閉じ込めによる、波長がとびとびの定在波が観測され、高エネルギーになるほど波長が短くなっているのがわかります。同じデータを、エネルギーを縦軸に取ってカラープロットしたのが図6(c)です。見やすいように、図6(b)の各電圧について、極小値をゼロとしています。はじめに説明した量子井戸のサブバンド構造が、

エネルギー的および空間的に明瞭に観測されていることがわかります。

量子井戸のSTSでは、測定され得る状態密度は、そのエネルギー以下のすべてのサブバンドの和になります。図6(d)は、井戸幅16 nmのInAs/GaSb量子井戸について各サブバンドの波動関数の2乗を計算し、それ以下のサブバンドとの和を取ったもので、実際の測定結果である図6(b)と非常によく一

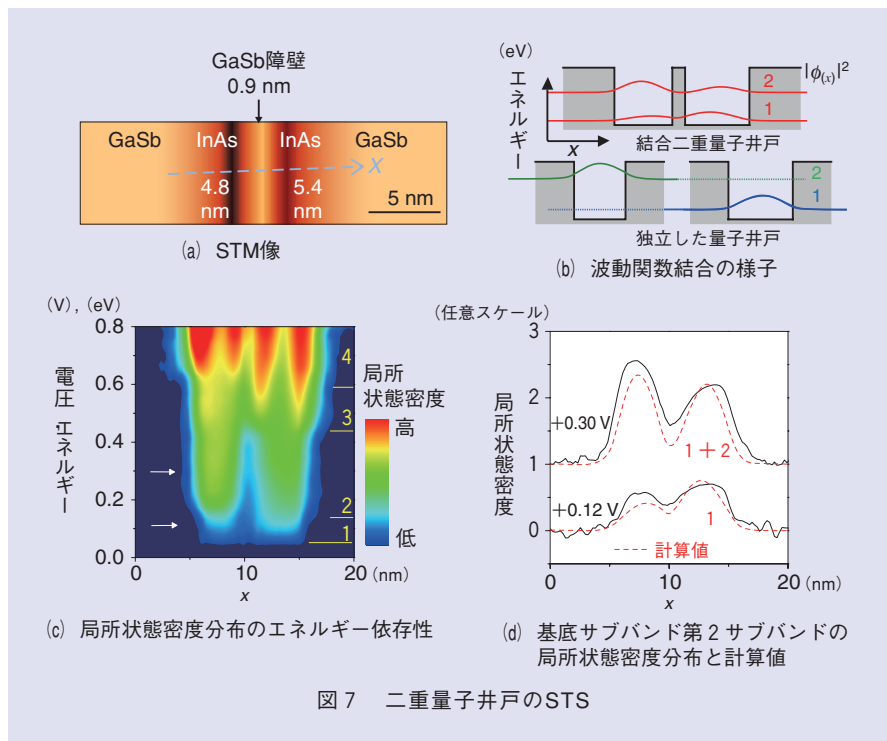


図7 二重量子井戸のSTS

致していることが分かります。

結合二重量子井戸

より複雑なヘテロ構造について、本手法の有効性を示すため、間に薄い障壁を挟んだ二重量子井戸構造についてSTS測定を行いました。図7(a)はSTM像で、実測で左側4.8 nm、右側5.4 nmのInAs量子井戸の間に0.9 nmのGaSb障壁があります。

二重量子井戸では、障壁が厚く2つの井戸が完全に独立している場合(図7(b)下)、基底サブバンド(‘1’)の状態密度は、閉じ込めの弱い、広い方の井戸のみに分布し、第2サブバンド(‘2’)の状態密度は狭い方にのみ分布することが予想されます。これに対して、障壁が狭い場合(図7(b)上)、両井戸の波動関数がトンネル効果により結合し、それにより形成された基底サブバンドでは、ある程度状態密度が狭い井戸側にも分布すると予想されます。

STSの測定結果が図7(c)です。状態密度のエネルギーおよび空間分布に

おける不連続な変化は、二重量子井戸のサブバンド構造をよく現しています。

図7(d)は基底サブバンドと第2サブバンドのエネルギー領域における状態密度の空間分布です(図7(c)の矢印における断面)。測定結果は、基底サブバンドにおいても、狭い方の量子井戸にも状態密度が分布しており、量子井戸間の波動関数が、薄い障壁を通したトンネル効果により結合していることを示しています。各層幅の実測値を用いた計算結果は、実験結果とよく一致します(図7(d))。

このように、井戸幅差わずか0.6 nmであっても、状態密度は大きく非対称な分布を示しています。これは、作製時のわずかな膜厚の揺らぎが、デバイスの特性に大きく影響することを意味しており、本手法が、ヘテロ構造デバイスの評価に非常に有効であることを示します。

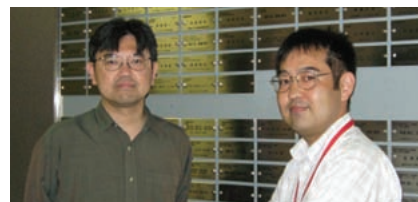
今後の展望

これまで述べてきたように、半導体

ヘテロ構造劈開面のSTSにより、量子力学の教科書に載っているような、電子波の反射、量子閉じ込め、トンネル効果といった基本的な現象を、ナノメートルスケールで実空間観測・可視化できるようになりました。本手法を、より複雑な構造を持つ、実際のヘテロ構造デバイスに適用することで、内部の波動関数解析がより精密に行えます。得られた情報を作製工程にフィードバックすることで、デバイスの性能向上や歩留まりの改善に大きく役立つでしょう。また、STSを、量子ドットや量子ポイントコンタクトのような、ヘテロ構造以外の量子ナノ構造へ適用することで、内部の量子状態や局所的に起こっている物理現象の理解が進み、それを利用した新たな量子デバイスの実現が期待できます。

参考文献

- (1) K. Suzuki, K. Kanisawa, S. Perraud, M. Ueki, K. Takashina, and Y. Hirayama: "Imaging of interference between incident and reflected electron waves at an InAs/GaSb heterointerface by low-temperature scanning tunneling spectroscopy," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46, pp.2618-2621, 2007.
- (2) K. Suzuki, K. Kanisawa, C. Janer, S. Perraud, K. Takashina, T. Fujisawa, and Y. Hirayama: "Spatial Imaging of Two-Dimensional Electronic States in Semiconductor Quantum Wells," Phys. Rev. Lett., Vol.98, No.136802, 2007.



(左から) 蟹澤 聖 / 鈴木 恭一

ナノメートルスケールの量子効果も、工夫次第で、可視化して理解することができます。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 量子固体物性研究グループ
TEL 046-240-3473
FAX 046-240-4727
E-mail kyoichi@will.brl.ntt.co.jp