



光 STM-超高速時間応答測定の可能性

重川 秀実 ・ 武内 修
青山 正宏 ・ 大井川 治宏

走査トンネル顕微鏡と超短パルス光を融合し、空間、時間両領域で極限的な分解能をもつ装置・手法を開発してきた。最近、サブピコ秒領域の現象をトンネル電流として捉えることに成功し、新たな世界をのぞきみる可能性が開けてきた。

Keywords: scanning tunneling microscopy, femtosecond, ultra-short-pulse laser, nanostructure, ultrafast measurement

1. ま え が き

半導体素子の応答や生体内での信号伝達、化学反応など、多くの興味深い、また重要な現象は数十 nm～分子スケールで、また、数十 ps～サブ ps 領域で展開されている。最近、ナノテクノロジーを利用して、こうした半導体・量子構造や生体材料・単一分子の物性（機能）を融合することにより、次世代の新機能・超高速デバイスを創製・開発することが期待されているが、現象を深く理解し新しい試みを実現するためには、①ナノスケールで量子構造を制御・構築する技術を確認するだけでなく、②作製された構造・機能を、システムの中で正しく評価し改良の指針を得る、ことが必要不可欠となる。

走査トンネル顕微鏡 (STM) およびその関連技術は、実空間で原子レベルの空間分解能をもち、上記目的を遂行するうえで欠かすことのできない手法であるが、外部回路の典型的な測定バンド幅はたかだか数十 kHz 程度であるため、高速現象の測定を得意としない¹⁾。一方、光を用いた測定法では、広領域にわたる分光が可能であるばかりでなく、フェムト秒パルスレーザーを用いたポンブプローブ法などの超高速測定の手法が確立されている^{2,3)}。しかし一般に、これらの手法は波長程度（～サブ μm オーダー）の空間的な分解能しかもたない。そこで、STM の発明以来、多くの研究者が両技術の融合を試みてきたが、実現するに至っていなかった^{4,5)}。

われわれも、ここ数年、極限領域の世界をのぞく夢を追い、STM の空間的分解能と光励起によるエネルギーおよび時間領域での選択性・分解能を融合し、新しい制御・物性実験が可能な装置・手法の開発を進めてきたが、最近、サブ ps 領域の現象をトンネル電流として測定することに成功した⁶⁻⁹⁾。

本稿では、歴史的な経緯と今後の展開を含めて、上記試みの現状を紹介する。

2. なぜ空間分解能が必要か？

図 1 は、InP(113)B 基板上に成長させた InAs のナノドットを超高真空中においてコンタクト AFM (AFM: 原子間力顕微鏡) で測定した結果である。こういった系では (113) 面などの高指数面基板を用いることで整然と並んだ、大きさの整ったドットを高密度に成長できることが知られている¹⁰⁾。ここでもトポグラフィ像 (a) にはよく整った半球状の量子ドットがみられており、その他の部分は平坦な InAs 薄膜に覆われている。一方、これと同時に、試料側に +0.2 V を印加し、導電性カンチレバーと試料との間に流れる電流を測定した結果が (b) である。電流像の明るさにばらつきがみられる。こうした半導体量子ドットは光学デバイスなどへの応用が考えられ、盛んに研究が進められているが、通常の測定方法では個々のドットの個性は平均されてしまい、物性値の不均一広がりとしてしか測定されない。AFM や STM などの顕微鏡的手法を用いることで、

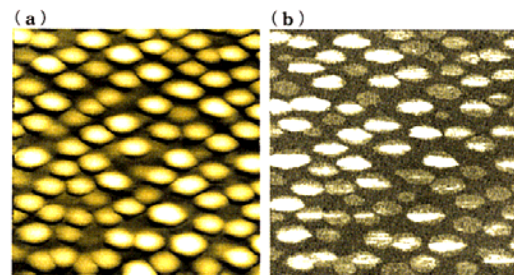


図 1 InP(113)B 基板上に成長した InAs 量子ドットの AFM 測定結果 (一辺 500 nm)。 (a) トポグラフィ像、 (b) 電流像。

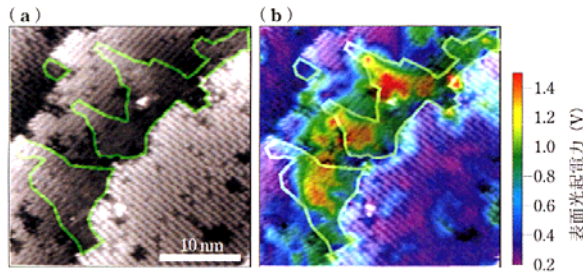


図2 Ag/Si(001)表面ナノ構造のフォトボルテージ空間マッピング。(a)STMトポグラフィ像($V_b = -2.0$ V, $I_t = 1.0$ nA), (b)バイアス電圧 2.4 V におけるフォトボルテージ。

個々の粒子の大きさや形状など構造の詳細な情報に加え、それに伴う導電性その他の物性の違いを粒子単位で、さらには、各粒子内の局所構造と対応させて解析することが可能となり、デバイスの欠陥構造の影響や微細構造に伴う特殊な機能発現などを研究するうえで重要な情報を提供することが可能になる。

また、ナノスケールの構造を要素として用い、新規デバイスを構築していく場合、各要素の電子構造のほか、要素間や要素と基板との相互作用による電子構造の変調が全体の機能を支配することになる。図2(a)はSi(001)表面にAgを少量蒸着させて、Si表面に形成したナノスケール金属/半導体構造のSTM像である。枠で囲まれた部分がAgの単分子膜が形成されている部分、それ以外は、Si(001)清浄表面が露出している。列状に見えるのはSiダイマー列で約1 nmの間隔で並ぶ。図2(b)は、同じ領域に光照射(He-Cdレーザー)を行うことによって得られた、あるバイアス電圧下での表面光起電力 (SPV) の空間分布像である¹¹⁾。色の違いがSPVの大きさを示し、赤い領域で最大1 V程度の値となっている。SPVは、局所的なキャリア密度の分布や再結合速度によって影響を受けるため、同様の手法により、表面素励起の寿命の解析などが可能になる。SPV像にナノメートルオーダーの構造がみられるが、最近の解析により、こうしたナノスケールの構造形成による系の電子状態の変調は、これまでに知られてきた以上に複雑な影響を系に与えることが明らかになってきた。

図3(a)は、光照射による単一アゾベンゼン分子の構造変化をSTMにより直接観察した結果である。励起波長を変化させることに伴い、シス・トランスの構造変化が観察されている。化学修飾することによって双極子モーメントをもたせると、構造変化を電界により制御することが可能で、図3(b)のように正・負バイアスで異なる構造を取る結果、整流作用が現れることも確認されている¹²⁾。ナノスケール構造の要素として、こうした分子の多様な機能を利用する場合、構造はさらに複雑となり、局所的な電子構造を正しく解析することは、よりいっそう大切な課題となる。量子過程を正しく理解するためには、局所領域の電子構造の変調を動的な過程まで含めて、高い空間・時間分解能で解

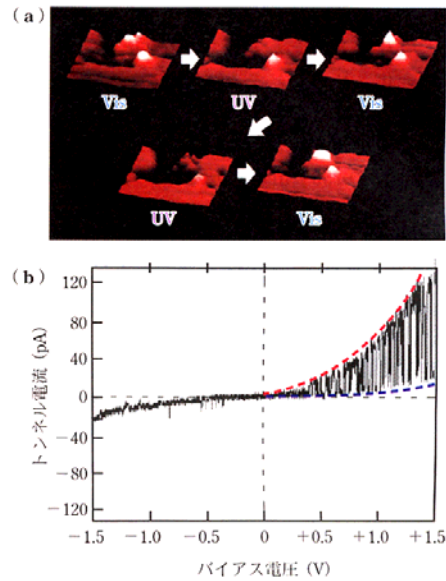


図3 (a)光照射によるアゾベンゼン分子のシス・トランス構造制御のSTM像。(b)アゾベンゼン分子の構造変化に伴う整流特性。

析することが可能な手法でなくてはならない。

3. 時間分解 STM 開発の歴史と問題点

STMの空間分解能と超短パルスレーザーの時間分解能、この両者を合わせもつ測定を実現するには、これらをどのように組み合わせればよいだろうか？ 時間分解STMの開発の歴史はこの一つの問いに集約される。省みるに、前者はSTM探針と試料との間に流れるトンネル電流 I_t が、探針直下の非常に局所的な試料物性を反映することが分解能の基礎である。また後者では二つの超短パルスを用い、一方で試料を励起し(ポンプ)、他方で試料の状態を測定する(プローブ)、ポンププローブ法がその原点である。ポンプからプローブまでの遅延時間 t_d を正確に制御可能であることが分解能の基礎となる。したがって、一つのパルスで試料を励起し、もう一つのパルスでトンネル電流の測定タイミングを指定する「光ゲートSTM」が開発の歴史の中でまず試みられたであろうことは想像に難くない。続いて、トンネル電流を測定しつつ、探針直下の試料をパルス列で連続して励起し、その励起間の遅延時間と電流との相関を測定するパルスペア励起法が考案された。これまでの研究はすべてこの2種類に大別できる。

3.1 光ゲートSTM法

STMのトンネル電流検出ラインに光ゲートを挿入する。ポンプ光により試料を励起し、遅延時間 t_d 後にプローブパルスでゲートを開くことにより、励起状態から t_d 後の瞬間的なトンネル電流 $I(t_d)$ を得ることを考える。この過程を100 MHz程度で繰り返す行くと、STMのプリアンプは個々のプローブ光に対応する電流パルスを分解するほど

の時間応答をもたないが、平均して流れるトンネル電流は、 $I_t(t_d)$ に比例したものとなる。そこで、 t_d をゆっくり変化させることで $I_t(t_d)$ をピコ秒程度の分解能での測定が可能になる。例えば、junction-mixing STMと呼ばれる方法では、試料としてGaAs上に作製した金の $250\ \mu\text{m}$ 幅の直線状の伝導領域と $30\ \mu\text{m}$ のギャップをもつ光スイッチを作製し、ポンプレーザー照射により伝導領域に電圧パルスを生じさせる。これを光ゲートSTMで測定すると、伝導領域を $8\ \text{ps}/\text{mm}$ で信号が伝わる電圧パルスの様子が観察され、装置の正常な動作が示される⁴⁾。しかし、この測定法では、スイッチングに伴う変位電流の影響が大きいことが理論的に示されており、また、こうした問題を回避しても、装置の時間分解能は光ゲートの応答速度により制限され、ピコ秒程度が限界となってしまう。

3.2 パルスペア励起 STM

光ゲートの応答時間に制限されない方法として、STM探針直下の試料を連続するパルス光で励起し、パルス間の遅延時間と電流との依存関係を測定する方法が試されてきた。例えば、図2で紹介したSPVは、パルス光により光キャリアを導入されてフラットになったバンドが、再結合によるキャリア密度の減少に伴い、徐々に照射前の湾曲した状態に戻る現象を扱っている。個々のパルス光が十分な強度をもち、パルス間隔が小さい場合には、こうした緩和の途中で励起が繰り返されることになり、SPVはパルス光間隔に依存した値をもつことになる。Hamersらは $100\ \text{MHz}$ 程度で発生する光パルスを徐々に間引いていくことでパルス間隔を広げ、測定されたSPV値の変化を理論計算とあわせることにより、シリコン表面近傍での光キャリア寿命をパルスの繰り返し周波数($\sim 10\ \text{ns}$)程度の分解能で求めている⁵⁾。しかし、プローブ信号はトンネル電流ではなく、照射に伴う探針-試料間の変位電流であったため、空間分解能は探針からの電界の広がりにより、数十nm程度であった。

パルスの繰り返し周期よりもよい時間分解能を得るためには、パルスを二つずつペアにして入射し、この二つのパルスの時間間隔を変化させてトンネル電流の応答をみるパルスペア励起STMの手法が考案されている。しかし、期待される信号レベルが小さいことから、これまで成功した例はなかった。

4. フェムト秒時間分解 STMの開発と現状

4.1 遅延時間変調型パルスペア励起STM (shaken-pulse-pair-excited STM: SPPX-STM)

われわれは、パルスペア励起STMを基本原理として、フェムト秒時間分解STMの開発を行ってきたが、いかにして測定精度を上げ、検出可能な信号レベルを下げるかが解決すべき課題であった。検出信号に含まれるノイズ成分

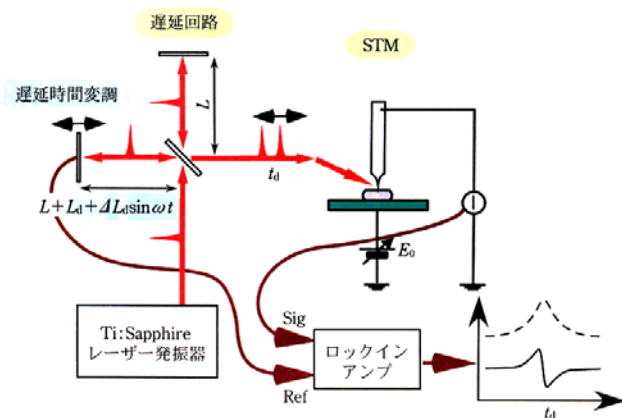


図4 遅延時間変調型パルスペア励起STMの模式図。

を低減する方法として、ロックインアンプを用いた変調法が考えられる。通常の光学的ポンププローブ手法とのアナロジーでは、励起光パルスをオプティカルチョッパーなどによりon/offする周波数、あるいはレーザーパルスの繰り返し周波数、のいずれかに同期してロックイン検出を行い、2パルス照射時の電流値 $I_t(t_d)$ と励起光off時の電流値 I_t の差 $I_{\text{diff}} = I_t(t_d) - I_t$ を高精度に測定することが考えられる。実際、これまで同様の試みの中では、こうした方法により、 I_{diff} の t_d 依存性 $I_{\text{diff}}(t_d)$ を求めることが試みられてきた。ところが、STMと組み合わせる場合には、光の強度に変調を加えると励起光により探針に運ばれる熱量が時間的に変化するため、探針の熱膨張・熱収縮が繰り返して起こり、変調の周波数でトンネルギャップが変化してしまう。また、特に半導体の試料を測定する場合には変位電流の影響がやはり変調周波数で現れてしまい、トンネル電流に現れる微小な遅延時間依存成分を求めることができなかった。

われわれはこれに変わる手法として、光強度でなく、2パルス間の遅延時間 t_d に周期的な微小変調 Δt_d を加え、同期した信号をロックイン検出することで、光強度が非常に大きいときでも安定かつ高精度にトンネル電流の遅延時間依存性を測定できるよう工夫を行った⁶⁻⁹⁾。

4.2 測定概要

図4に、新しく開発した装置の概略を示す。光源としてパルス幅 $100\ \text{fs}$ 、波長 $800\ \text{nm}$ 、繰り返し周波数 $80\ \text{MHz}$ のTiサファイアレーザーをプリズム対によりチャープ補償を行い、 $25\ \text{fs}$ 程度のパルスとして励起光源に用いる。パルス光列を干渉計型遅延回路により連続する2パルスペアの列とし、STMの探針直下に集光する。遅延回路は一方の光路長に振動数 $\sim 100\ \text{Hz}$ で微小遅延 Δt_d 変調を加えられるようになっており、位相敏感検出器(ロックインアンプ)で、レーザー照射下のトンネル電流からこの変調に同期した成分を検出する。この時のトンネル電流は、

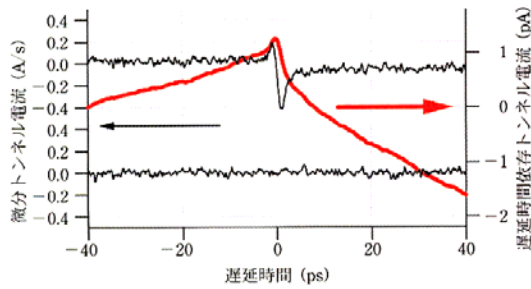


図5 遅延時間変調型パルスベア励起 STM による GaNAs 試料の測定結果。黒線は、同期成分(上)と非同期ノイズレベル(下)、赤線は積分結果。

$$I_i(t_a + \Delta t_a \sin \omega t) = I_i(t_a) + \Delta t_a \sin \omega t_a \left(\frac{dI_i}{dt_a} \right) + O(\Delta t_a^2) \quad (1)$$

のように展開され、位相敏感検出により得られる信号は $\sin \omega t$ の係数に相当する。すなわち、従来の方法で得られる $I_i(t_a)$ の t_a での微係数が得られることになる。したがって、トンネルギャップに入射する二つのパルスの光強度が等しいとき、 $I_i(t_a)$ は図4中の点線グラフのような左右対称な形が期待されるが、位相敏感検出器からの出力は実線グラフのようになる。得られた微分信号を数値的に積分することで、実際の $I_{int}(t_a)$ が求まり、光学的なポンププローブ法など、他の手法による結果と比較することが可能になる。

この手法では、①二つの光パルス間隔を制御することで光パルス幅と同程度の時間分解能を実現し、②トンネル電流を検出することでSTMの空間分解能(〜0.1 nm)をそのまま継承する、というパルスベア励起STMの利点を保ったまま、③高繰り返し周波数(80 MHz)レーザーの出力を、光強度に変調を加えず用いることで、探針の熱膨張によるトンネル電流変化を極限まで除去しつつ、時間分解信号を精度よく検出することが可能である^{1,6-9)}。

4.3 測定結果：サブピコ秒領域の現象をトンネル電流で

4.2節で紹介した装置を用いることで、低温成長 GaNAs 試料から遅延時間依存トンネル電流を得ることに成功した。以下に詳細を述べる。試料は、GaAs(001)基板上にNを0.36%ドーピングしたGaAs薄膜を450°Cにおいて2 μm成長し、後に600°Cにて熱処理を行ったものである¹⁸⁾。励起光強度は数 mW 程度であり、探針直下の50 μm程度の領域に集光される。二つのパルスは1:2の強度比をもち、遅延時間の正の側で強いパルスが後から入射する条件となる。遅延時間変調を $\Delta t_a = 0.35$ ps、変調周波数 $\omega = 17$ Hzで行いつつ、200 s 周期で遅延時間の中心値を三角波で200回走査し、300 msの待機時間でトンネル電流をロックイン検出した。変調周波数よりも十分に低い遮断周波数をもつ弱いフィードバックにより、-2.5 Vのトンネルバイアスの下、100 pAの平均トンネル電流が流れるよう、探針試料間距離を維持している。

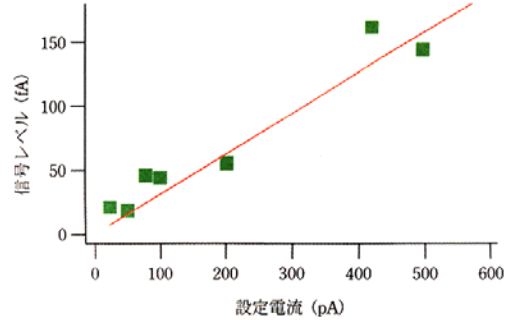


図6 測定信号と設定トンネル電流の関係。

結果を図5に示す。黒色の細線がロックインアンプからの生データであり上に変調と同期した成分、下に90度位相のずれた成分を表示した。前者は(1)式における dI_i/dt_a を表し、後者は装置のノイズレベルを表す。位相の一致する成分を、グラフ左端をゼロとして積分した結果が赤色の線であり、これがトンネル電流の遅延時間依存成分 $I_i(t_a) - I_i$ となる。

得られた信号の物理的意味を議論する前に、この信号がトンネル電流に起因するものであることを確認した結果を図6に示す。探針試料間距離を変化させた際、ロックインアンプ信号の絶対値と平均して流れるトンネル電流の変化を測定した。両者は明らかに比例関係にあり、得られた信号がトンネル電流に起因するもので、信号レベルが探針からの距離に従い急速に減少すること、言い換えれば、試料の非常に局所的な物性を反映することが示された。

トンネル電流をプローブとする原子分解能をもった超高速測定について、これまで多くの試みがなされてきたが、本研究は直接、時間分解を得た初めての結果である。

4.4 何を測ることができるのか？

ここまで、パルスベア励起型のSTMについて、いかにしてトンネル電流の遅延時間依存性 $I_i(t_a)$ を正確に測るかに焦点を当てて解説してきた。実際に構築されたシステムでは $I_i(t_a)$ を0.1 pAの精度で測定可能であり、STMで測定可能な導電性の試料であれば、原理的に測定対象を選ばない。では、どのような物質においてどのような物理過程でトンネル電流が遅延時間に依存し、またその依存性からどんな物性を得ることができるのであろうか？ この点は現在われわれが最も興味をもって研究を続けている点で、個々の測定対象により背景となる高速物理現象とトンネル電流との因果関係は個別に議論する必要がある。そこで、ここでは、議論の基礎となる考え方を解説する。

われわれは測定する試料に光感受性を期待する。したがって、光パルス入射に伴いトンネル電流は大きく変化し、試料の緩和過程に伴い徐々に元の値に戻ってくることになる(図7)。連続して入射する二つのパルスが同じ強度をもち、また遅延時間が十分に大きい場合には試料は2パルス目が入射するまでに平衡状態に緩和しているため、二つの

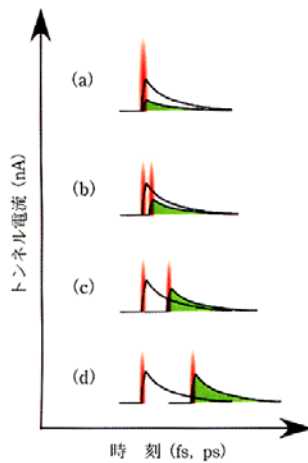


図7 励起光パルス対の遅延時間とトンネル電流の関係。

光パルスにより二つの同等な電流パルスが生じるはずである(図7(d))。

遅延時間が小さくなると、二つ目のパルスが入射する際に試料がまだ励起状態にある状況が生まれる(図7(b), (c))。さらに遅延時間を減らし、実質的に遅延時間がゼロとみなせる領域を考えよう。ここでは、試料に入射する光パルスは元のパルス強度を単位として2倍の強度をもつ1パルスとみなすことができる(図7(a))。

したがって、遅延時間をゼロから十分な大きさまで走査することにより、試料の緩和時間に対応して、二つのパルスが重なった状態から、独立した二つのパルスによる光励起の状態まで変化する過程を観察することになる。もし、光誘起トンネル電流が光強度に対して非線形性をもてば、二つのパルスが重なった状態と、独立した二つのパルスによる状態では、光誘起電流の大きさは異なり、緩和過程の途中では、2パルス目による光誘起トンネル電流成分は1パルス目からの時間により変化することが期待される。したがって、遅延時間を変化させることで(図7(a)~(d))試料の緩和過程を、2パルス目による光誘起トンネル電流の変化として観測可能となる。このように、トンネル電流が遅延時間に依存するという現象は、光誘起トンネル電流の光強度に対する非線形性と密接に関係している。

以上の測定を行うためにSTMのプリアンプに高速応答が必要ないことは重要で、改めて指摘しておく。装置の構成上、パルスペアはレーザー発振器の繰り返し周波数(~100 MHz)で試料に入射するが、一般にSTMのプリアンプの帯域は非常に狭いため(<100 kHz)、トンネル電流に現れるパルスペアはおろか、パルスの繰り返し周波数すら判別することは不可能である。しかし、二つ目の電流パルスの積分値が遅延時間に依存して変化すれば、流れる電流の時間平均が変化するため、狭帯域のプリアンプでも測定を行うことが可能になる。

以上を踏まえ、図5で得られた遅延時間依存性について

考察する。半導体試料をSTMにより観測する場合、接触電位差とバイアス電圧により試料内部にバンド湾曲が生じる。ここにバンドギャップ以上のエネルギーをもつ光を照射すれば、生成された光キャリアがこの電界に沿って移動し、バンド湾曲を平坦化する作用を及ぼす。バンド湾曲の解消に伴う試料表面のポテンシャル変化は光起電力と呼ばれるが、これが実効的なバイアス電圧を変化させるため、一般に半導体試料への光照射に伴いトンネル電流は大きく変化する⁹⁾。この変化分はパルス光の照射とともに速やかに増加し、光キャリアの減少とともに指数関数的に減衰する。またこのほかにも光励起により試料の電子温度が高くなった状況では、トンネル障壁に対して電子のもつエネルギーが増加することでトンネル確率が上がることも考えられる。電子温度も光照射時刻に瞬間的に増加し指数関数的に減少するが、こちらは光起電力のようなマクロな電子分布よりも一けた以上速い変化が期待される。

試料が励起状態にあるとき、すなわち非常に高い光キャリアが試料中に生成している状況に2パルス目が入射した場合、純光学的なポンププローブ実験などでは光吸収の飽和などの非線形性がみられ、光吸収効率が低下することが第一に考えられる。しかし、われわれの実験条件ではこのような吸収率の変化は 10^{-7} を下回ることが確認される。これに比べ図5にみられたトンネル電流変化は非常に大きいものといえる。また、光吸収率の低下に関係する過程の場合には、測定にかかるトンネル電流は遅延時間の小さい所で減少することが期待されるが、これも実験結果に反する。時間分解STMでは純光学的な実験では現れない非線形性として、キャリア密度とトンネル電流との間の非線形性や、遅延時間と電子温度、また、電子温度とトンネル電流との間の非線形性などが考えられ、これが実験結果に現れていると考えられる。

連続して入射する二つのパルス強度が等しい場合、遅延時間の正負は意味をもたず $I_L(t_d) = I_L(-t_d)$ となり、図5の信号は遅延時間ゼロを境に左右にほぼ対称となるはずで、実際、パルス強度がほぼ等しい条件ではグラフは正負に対称形になる。図5では二つのパルス強度が1:2の比率で非対称性をもつ場合の結果を示してある。詳細は割愛するが、簡単な解析から、トンネル電流の光強度への非線形性が2次の場合パルス強度の違いは I_L の非対称性を生みず、3次以上の成分が含まれる場合パルス強度の違いがグラフの非対称性を生むことが示され、この系が高次の非線形性を有していることがわかる。

また、時間分解トンネル電流に1 ps程度の速い時間応答成分と、50 ps程度の比較的遅い応答成分がみられる。1 ps程度の応答時間は光により励起されたキャリアがフォノンに散乱される過程で運動量を失い、バンド端まで落ちる過程と比較可能な時間スケールであり、50 psは再結合中心密度の高いGaAs試料中での光キャリア寿命と同等の時間スケールである¹⁰⁾。上記のとおり、試料中の光キャリア密度は試料の伝導性を変化させ、また、探針直下のバンド構造

に変調を及ぼすため、トンネル電流に対して非線形な影響を及ぼす。前者の過程の詳細、およびトンネル電流に影響を及ぼす機構についてはさらなる研究が必要となるが、極微領域における光キャリアのバンド内・バンド間ダイナミクスをサブピコ秒の分解能で測定できる技術の展開は、基礎研究だけでなく、量子デバイスなどを含めた今後の新機能デバイス開発・創製の助けになるものと期待される。

5. む す び

以上、紹介してきたように、トンネル電流(したがって、原子レベルの空間分解能)をプローブとして、サブピコ秒領域の光誘起応答を測定することが可能となった。例えば、励起波長を制御して選択的な励起を行えば、より詳細な、また局所的な構造に関係した物理的過程を追えることになる。まだ、乗り越えるべき課題は残されているが、少しずつ、新たな世界をのぞきみる準備が整いつつある。

文 献

- 1) 三浦 登, 毛利信男, 重川秀実: 朝倉物性物理シリーズ4「極限実験技術」(朝倉書店).
- 2) 長澤信方 編: 物性物理の新展開「レーザー光学物性」(丸善).
- 3) K. Yamane, Z. Zhang, K. Oka, R. Morita, M. Yamashita and A. Suguro: *Opt. Lett.* **28**, 2258 (2003).
- 4) S. Weiss *et al.*: *Phys. Stat. Sol. (b)* **188**, 343 (1995).
- 5) R. Hamers and D. Cahill: *Appl. Phys. Lett.* **57**, 2031 (1990).
- 6) 山下幹雄, 重川秀実, 森田隆二, 唐沢直樹, 武内 修, 平沢正勝: *応用物理* **71**, 173 (2002).
- 7) O. Takeuchi, R. Morita, M. Yamashita and H. Shigekawa: *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** (7B), 4994 (2002).
- 8) Ed. by M. Yamashita, H. Shigekawa and R. Morita: *Femtosecond Nanometer Technology, Springer Series in Optical Sciences*, vol. 99 (2004).
- 9) O. Takeuchi, M. Aoyama, R. Oshima, Y. Okada, H. Oigawa, N. Sano, R. Morita, M. Yamashita and H. Shigekawa: *Appl. Phys. Lett.* **85** (14), (2004) in press.
- 10) R. Oshima, N. Kurihara, H. Shigekawa and Y. Okada:

Physica E **21**, 414 (2004).

- 11) O. Takeuchi, S. Yoshida and H. Shigekawa: *Appl. Phys. Lett.* **84** (18), 3645 (2004).
- 12) S. Yasuda, T. Nakamura, M. Matsumoto and H. Shigekawa: *J. Am. Chem. Soc.* **125**, 16430 (2003).
- 13) R. Oshima, A. Ohmae and Y. Okada: *J. Crystal Growth* **261**, 11 (2004).
- 14) D. Zubarev, V. Morozov and G. Ropke: *Statistical Mechanics of Nonequilibrium Processes, Vol. 1* (Akademie Verlag, Berlin, 1996).

(2004年6月19日 受理)



しげあき ひでみ
重川 秀実

主にプローブ顕微鏡を用いた極限計測・量子マニピュレーション。息抜きは映画とサウナに楽しいお酒、にっこり笑って…!



たけうち たけし
武内 修

プローブ顕微鏡を用いた表面物理。分子間相互作用の解析や、超短パルス光を組み込んだ時空両領域での極限計測技術の開発など。歌唱力は業界一。アーー!



あおやま まさひろ
青山 正宏

数理物質科学研究科在。時間分解STMの開発と局所物性研究への展開。光に乗って夢を追う!



おおいがわ じろ
大井川 治宏

プローブ顕微鏡、電子分光法などによる半導体表面界面の物性に関する研究。太い指でも手先は器用!