

# フェムト秒時間分解走査トンネル顕微鏡が開く扉 —時間分解トンネル電流で覗く世界—

寺田 康彦\*<sup>1</sup>・吉田 昭二\*<sup>1</sup>・武内 修\*<sup>1</sup>・重川 秀実\*<sup>1,†</sup>

## What can We Probe using Femtosecond Time-Resolved STM?

Yasuhiko TERADA, Shoji YOSHIDA, Osamu TAKEUCHI and Hidemi SHIGEKAWA\*

Institute of Applied Physics, University of Tsukuba, CREST-JST, Tsukuba 305-8573 Japan

(Received December 25, 2007, Accepted March 1, 2008)

Due to the size reduction in structures, the difference in the electronic properties, for example, caused by the structural nonuniformity in each element, has an ever more crucial influence on macroscopic functions of semiconductor devices. And the direct observation of the characteristics, which provides us with the basis for the macroscopic analysis of the results, is of great importance. Thus, for further advances, a method for exploring the transient dynamics of the local quantum functions in organized small structures is eagerly desired. However, it is extremely difficult to obtain spatial and temporal resolutions simultaneously on this scale, which requires a new method; namely, new microscopy. In this paper, we introduce the shaken-pulse-pair-excited scanning tunneling microscopy (SPPX-STM), which we have developed these years. SPPX-STM enables us to observe the dynamics of electronic structures with the ultimate spatial and temporal resolutions.

### 1. はじめに

「より小さく・より速く」、ナノスケール科学技術の展開の下、限界への挑戦が進められている。例えば、微細化技術の発展にともない、半導体デバイスの加工寸法はナノスケール領域に到達し、離散したドーパントの分布や界面の粗さなど、原子スケールの局所的な構造がデバイスそのものの動作特性を左右するまでに至っている。さらに、構造の微細化に伴ってデバイスの動作速度は GHz を越え、キャリアのダイナミクスはナノ～ピコ秒のスケールで変化する。こうして微細化・高速化が高度に進んだデバイスの物理・特性を正しく評価し新しい機能を創成するためには、ドーパントやキャリアの状態を高い空間分解能で観察し、局所的に変調されたポテンシャルの中で生じるキャリアのダイナミクスを高い時間分解能で計測する技術の開発が必要不可欠である。

我々は走査トンネル顕微鏡 (Scanning tunneling microscope; STM) と量子光学の技術を組み合わせることにより、これら要求を満たす新しい計測・評価技術の開発を進めてきた<sup>1-11)</sup>。本稿では、一連の試みの中から、「遅延時間変調型パルス光対励起 STM (Shaken-pulse-pair-excited STM; SPPX-STM)」の原理と応用について解説する。

SPPX-STM は、フェムト秒 ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) 領域の超短パルス光を STM と組み合わせることで、原子レベルの空間分解能を持つ STM に超短パルス光による高い時間分解能をあわせて付与することを実現した計測手法である。STM 探針直下の試料表面をパルス光対の列で励起し、パルス対の時間間隔 (遅延時間) を変化させて対応するトンネル電流の変化を測定することにより、局所 (ナノスケール) 領域のキャリア密度の時間変化をサブピコ秒オーダーで解析することを可能にした。

まず、次章で、STM の発明当時より今日まで進められてきた両手法 (STM と量子光学の先端技術) を組み合わせる試みを概観し、これまで困難とされてきた問題点、新しい手法の特徴などを整理する。

### 2. 時間分解 STM 開発の歴史

#### 2.1 量子光学と STM の融合

現実のデバイスで対象となるのは GHz 以上の超高速現象である。これに対し、STM のトンネル電流検出は、高倍率かつ低ノイズの電流増幅プリアンプを要求するため、その測定帯域は 100 kHz 以下 (従って、時間分解能は  $10 \mu\text{s}$  以上) に制限される<sup>12,13)</sup>。そのため、通常の STM では、目的とする高速現象をトンネル電流を用いて直接計測することはできない。しかし、トンネル接合自体は数フェムト秒で応答することを考えると、原理的には超高速の STM が可能なはずである。

一方、超高速レーザ光学の分野では、検出回路の帯域制限を巧みに回避することが可能な時間分解分光法が開発され広く用いられている。その代表的なものとして、ポンププローブ法がある (Fig. 1)<sup>14,15)</sup>。ポンププローブ法では、パルス光対の列を試料に照射する。パルス光対の最初のパルス光をポンプ光と呼び、これにより試料を光励起し、続いて、二つめのパルス光 (プローブ光) をポンプ光からある時間遅らせて (遅延時間) 同じ試料の領域に照射し、プローブ光の反射率や透過率、散乱光などを検出する。プローブ光の吸収や散乱は試料の状態 (ポンプ光によって励起された状態の緩和の程度) に依存するから、例えば、プローブ光の反射率を、遅延時間を変えて測定することで、ポンプ光により励起された試料の電子状態の緩和現象をプローブ光の反射率の変化を通して解析することが可能になる。この場合、ポンプ光とプローブ光のパルス光対を繰り返し照射し、時間的に平均化された DC 信号を検出すればよいので、検出器は超高速で動作する必要がない。ポンププローブ法の時間分解能はパルス幅

\*<sup>1</sup> 筑波大学・院・数理物質科学研究科 (〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1) † <http://dora.bk.tsukuba.ac.jp>

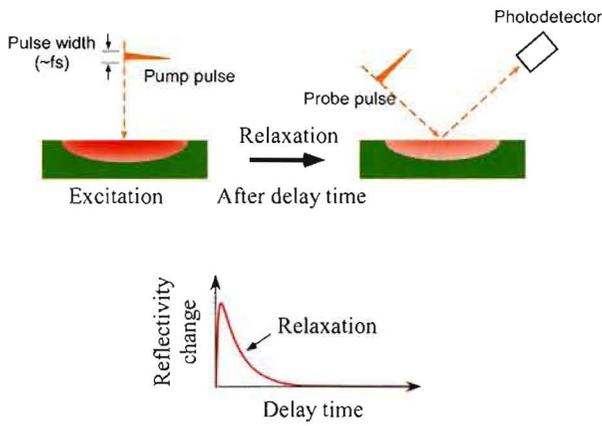


Fig. 1 Schematic illustration of the optical pump-probe technique.

でのみ決まるため、数フェムト秒にまで高めることができる。

そこで、STMの発明以来、超短パルス光の技術を組み合わせることで、STMに高い時間分解能をあわせ持たせることができないかと多くの試みが成されてきた。しかし、乗り越える壁は高く、なかなか実現には至らなかった<sup>9-13,16,17</sup>。

本章では、これまでに進められてきた代表的な方法である、光ゲートSTM、パルス光励起STM、および、我々が新しく開発したSPPX-STMの三つの方式について述べ、それぞれの手法の課題や限界、新たな取り組みなどについて概観する。

### 2.2 光ゲートSTM

光ゲートSTM (photoconductive-gate STM) では、超高速の光導電性ゲートスイッチをSTMの電流検出回路に組み込み (Fig. 2(a))、ポンプ光とプローブ光はそれぞれ、試料の励起と光導電性ゲートをスイッチするのに使われる<sup>18</sup>。ポンプ光とプローブ光の間の遅延時間を変化させることにより、ポンプ光によって励起された試料が引き起こす過渡的なトンネル電流を任意の時間にサンプリングすることができると考えられた。しかし、この方式では、検出信号は探針直下の変化ではなく、励起された電流が回路を流れる過程を含めた変化であり、また、探針-試料間およびゲートスイッチ間の二つの浮遊容量の結合から生成される変位電流が主な成分となってしまうことが明らかになった<sup>19</sup>。このため、探針直下の変化を直接捉えられないことに加え、面内方向の空間分解能は接合容量の空間的な広がりによって決まり、STM自身の持つ空間分解能には遥かに及ばない。

### 2.3 パルス光励起STM

パルス光励起STMでは単一パルス (パルス対ではない) をSTM接合部に繰り返し照射したときの探針-試料間に流れる変位電流を測定する (Fig. 2(b))。Hamersらはこの方式を採用し、Si(111)-77面でのキャリア緩和時間を10 nsの時間分解能、1 μm空間分解能で求めることに成功した<sup>20</sup>。後で詳しく述べるように、試料が半導体の場合、探針直下ではバンドの湾曲が生じるが (tip-induced band bending: TIBB) レーザ照射により励起されたキャリアの再分布によりバンドの湾曲が緩和する (表面光起電力 (surface photovoltage: SPV))<sup>13,14,16,21,22</sup>。SPVは光照射後、時間とともに

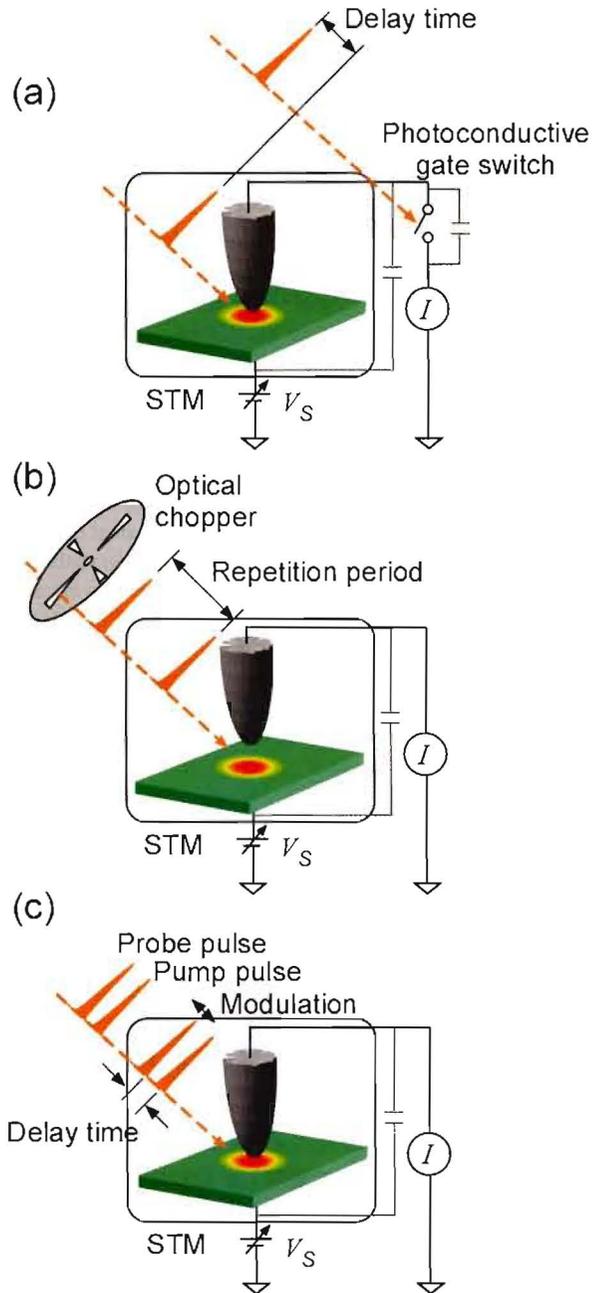


Fig. 2 Typical methods to combine STM with the optical pump-probe technique. (a) Photoconductive gated STM. (b) Pulse-excitation STM. (c) SPPX-STM.

に減少し元の状態に戻るが、このとき、探針と試料の間には浮遊容量があるため、SPVの変化に伴って変位電流が流れる。そこで、レーザー光の繰返し周期を変えると、SPVの緩和の速さと繰返し励起のタイミングにより、SPVの平均的な値が変化し、それにもない変位電流の大きさが変化する。従って、変位電流の値をレーザー光の繰返し周期の関数としてプロットすると、SPVを生み出すキャリア密度の変化に関する情報が得られることになる。

実験では、検出感度を高めるためにチョッパーを用いてレーザー強度を変調し、ロックイン検出を行っているが、トンネル電流は探針と試料間距離に指数関数的に依存するため、光強度の変調による探針や試料の熱膨張が大きな電流変化を引き起こし問題となる。彼らは、探針を試料から十分離

すことによってトンネル電流の値を下げ、変位電流のみを検出することでこの問題を回避している。トンネル電流の計測を妨げてきた変位電流を利用するという逆転の発想であるが、空間分解能を犠牲にしており、光ゲート法と同様に、得られる信号は変位電流であるため、空間分解能が接合容量の空間的な広がりによって制限される。実際に空間分解能は1  $\mu\text{m}$  程度となっており、STM 自体がもつ空間分解能に遥かに及ばない。またパルスの繰返し間隔は、レーザ光のパルス列から一定間隔のパルス列を残して他のパルス光を消光することによって変えている（この動作をパルスピックアップという）。そのため、最小の繰返し間隔は、レーザ本来の繰返し周期で決まり、通常10 ns 程度になる。これが時間分解能の制限となるため、この方式では高速の現象を追うことはできないことになる。

#### 2.4 遅延時間変調型パルス光対励起 STM (SPPX-STM)

本節では、前節で述べてきた問題を解決することを可能にした新しい手法について述べる。光学的なポンププローブ法同様に、ポンプ光とプローブ光からなるパルス光対をトンネル接合部に繰り返し照射し、遅延時間を変化させて対応するトンネル電流の変化を DC 信号として計測することで時間分解を得る仕組みを持たせるものである (Fig. 2(c))。こうした方法は、光学的なポンププローブ法の高い時間分解を直接利用するものとして、STM の開発当初から多くの試みがなされてきた。しかし、そこには他の方法と同様、困難な課題が待ち受けていた。

光励起による信号強度は極めて微弱で、STM のフィードバック電流を100 pA 程度に設定した場合、計測されるトンネル電流変化の値は数100 fA 程度となる。ポンププローブ法では、微弱信号の検出感度を上げるために、レーザ光を周期的にチョッピングして強度を変調し、ロックインを用いて変調成分を検出する。しかし、これを時間分解 STM の変調方式として採用することはできない。なぜなら、レーザ光強度を変調すると探針が熱膨張・収縮を引き起こす。2.3節で述べたように、トンネル接合は試料・探針間距離に指数関数的に依存し、0.1 nm の変化が一桁のトンネル電流の変化を生じさせる。この熱伸縮による変調成分は、フィードバック電流値に匹敵するほど極めて大きく、本来の信号成分を覆い隠してしまう。

「如何にして微弱な信号を熱膨張の問題を避けて捉えるか?」。SPPX-STM では、検出感度を高める変調法として、ポンプ光とプローブ光の光強度ではなく遅延時間を変調する方式を採用することでこの問題を解決した。この方式では、パルス列の平均光強度はほぼ一定であるから、変調成分に与える熱伸縮の影響を最小限に抑えることができることになる。

こうして、光学的なポンププローブ法を STM に組み込むことが可能となったが、「トンネル電流で如何にしてキャリアのダイナミクスを観察することが可能なのか?」。次章で、新しく開発された手法の原理についてみてみよう。

### 3. SPPX-STM で観えるもの

#### 3.1 SPPX-STM の原理

Fig. 3 に一般的な測定のメカニズムを示す。まず一つ目のパルス (ポンプ) 光が試料を励起し、それに伴って探針-試料間を流れるトンネル電流が過渡的に変化するとする。励起状態にある試料に二つ目のパルス (プローブ) 光が照射されると、プローブ光が誘起するトンネル電流変化はポンプ光による電流変化と異なる可能性がある (Fig. 3 の B や C)。このとき、計測にかかる量、つまりトンネル電流の時間平均値もまた遅延時間依存性を持ち、試料の励起状態のダイナミクスを反映する。時間分解能は、ポンププローブ法同様に、パルス幅でのみ決まり、数フェムト秒にまで高めることができる。さらに前述の二つの方式と異なり、トンネル電流を計測するので、STM 本来の高い空間分解能を維持できることになる。光照射による試料の変化とトンネル電流の関係は、対象とする試料、現象により異なる。本稿では、半導体を試料とした場合の結果についてメカニズムを紹介する。

#### 3.2 測定結果の例

SPPX-STM によって得られた、トンネル電流変化  $\Delta I$  の遅延時間依存性の例を Fig. 4(a) に示す。試料は GaAs(001) 基板上に窒素を0.36%ドープした窒化ガリウムを450°Cで低温成長したものである。Fig. 4(a) に示すように、遅延時間に依存したトンネル電流  $\Delta I$  が得られ、遅延時間が短くなるにつれて  $\Delta I$  は減少している。また、 $\Delta I$  を指数関数型の関数でフィッティングしたところ、時定数は440 ps となっている。

#### 3.3 半導体試料からの信号の起源

半導体試料の場合について、トンネル電流の遅延時間依存性がどのような緩和現象を反映しているかを考察してみよう。Fig. 4(b) は、光学的なポンププローブ法によって得られた反射率変化測定の結果で、フィッティングすると、時定数は410 ps と導かれる。ポンププローブ法で得られる反射率変化は、光キャリア密度の時間変化を反映しており、時定数はキャリアの寿命を現している。この寿命は、 $\Delta I$  の遅延時間依存性のグラフから得られた緩和の時定数に近く、 $\Delta I$  もま

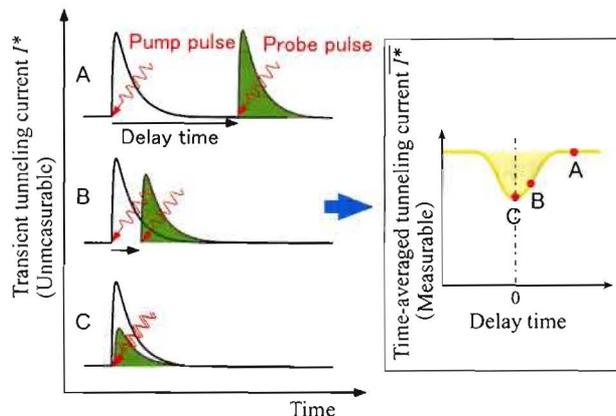


Fig. 3 Delay-time dependent tunneling current induced by a laser-pulse pair (left), and time-averaged tunneling current as a function of the delay time (right).

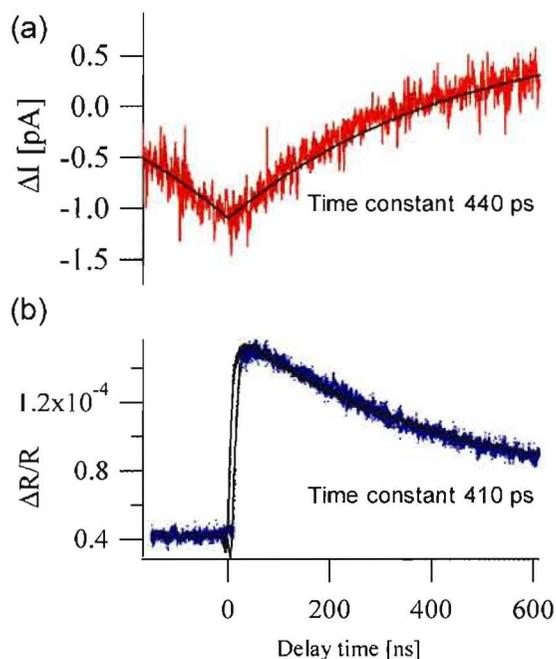


Fig. 4 (a) An example of SPPX-STM signal (upper, red) with an exponential fit (black line). (b) Time evolution of  $\Delta R/R$  (blue) measured by the optical pump-probe technique with an exponential fit (black line). Sample is a  $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$  ( $x=0.36\%$ ).

た、キャリア密度の時間変化を反映していると予想される。

半導体を試料として STM 測定を行うと、多くの場合、バイアス電圧として印加される高電界の影響で Fig. 5 (a) のようにバンド構造が湾曲する (探針誘起バンド湾曲, TIBB). TIBB の極性と大きさは、バイアス電圧、局所的な仕事関数、ドーピング量、キャリア密度、バンドギャップ内準位などに依存する量である。試料にパルス光の照射を行い、光キャリアを注入すると、キャリアは試料表面の電界を打ち消す方向に再分布し TIBB が緩和する (Fig. 5 (b)). 暗状態からの表面ポテンシャルの変化が表面光起電力 (SPV) である。SPV の変化分だけバイアス電圧はトンネルギャップにかかるようになり、トンネル障壁が下がってトンネル電流が増加する。

光励起された状態はその後緩和して元の状態に戻っていくが、二つの過程が含まれる。一つは、(1) バルク側で起こるキャリアの再結合による光キャリア密度の減衰で、再結合の速さに依存する (Fig. 5 (c)). もう一つは、(2) 表面近傍のポテンシャルに捉えられていた少数キャリアの放出で、表面では再結合の確率は小さいため熱的な過程などが支配的となり (1) の過程より遅い変化を示す。 (2) の過程により表面の少数キャリア密度が減少すると SPV は緩和し、トンネル電流も照射前と同じ状態に戻っていく。

(2) の過程は遅いとして (1) の過程を考えてみる。遅延時間が十分長く、試料が緩和し終わったときに 2 つ目のプローブ光が照射した場合 (Fig. 3A), プローブ光が引き起こすトンネル電流の変化は、ポンプ光によるものと同じ時間変化を示す。一方、遅延時間が短く、ポンプ光により生成されたキャリアがまだ励起状態に残っている間にプローブ光が照射され

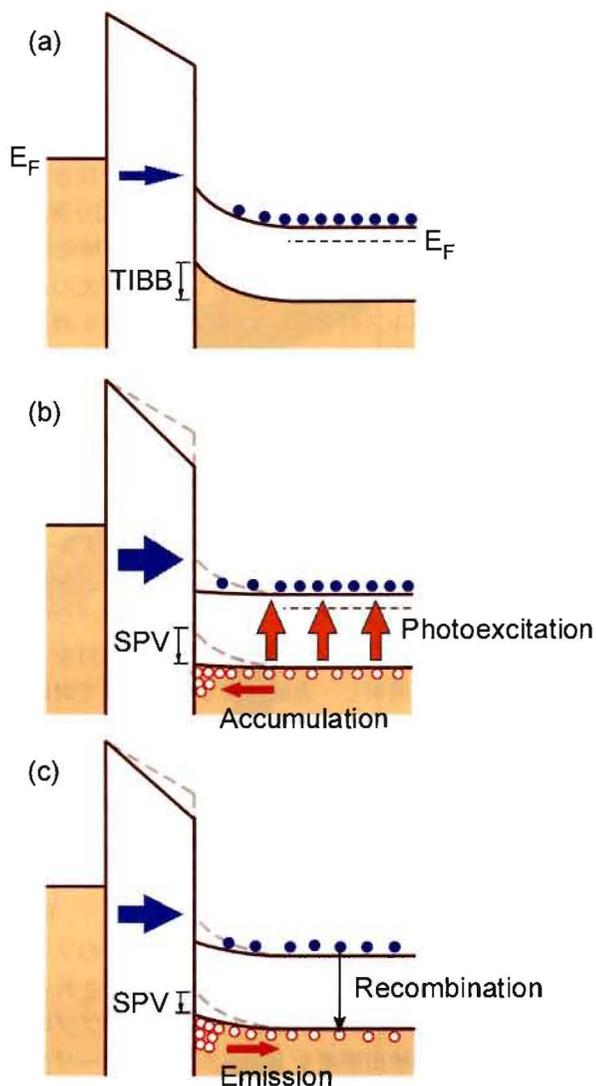


Fig. 5 Change in the band structure of a n-type sample under STM tip due to photo-illumination. (a) Before pulse excitation (dark state). (b) Upon photoexcitation. (c) Relaxation following the excitation.

ると (Fig. 3 の B と C), プローブ光によるキャリアの生成は残存するキャリアに邪魔されて減少する。これを吸収飽和と呼び、2.1 節で述べたポンププローブ法では、吸収飽和によるプローブ光の反射率の変化から、光キャリア密度の時間変化を計測している。SPPX-STM の場合、吸収飽和による生成キャリアの総数の変化は SPV の大きさに影響を及ぼし、障壁の変化の大きさが変わるためトンネル電流の大きさが変化する。観測される量は、それぞれのパルス光による過渡的なトンネル電流変化ではなく、時間的に平均されたトンネル電流の総和であるが、この量もまた遅延時間に依存する。吸収飽和の効果は遅延時間がキャリア寿命に比べて小さい場合に強く、反対にずっと長い場合にはほとんどゼロになる。従って、遅延時間が短くなるにつれて計測されるトンネル電流信号は減少する。この遅延時間依存性は、Fig. 4 (b) の実験結果と一致し、 $\Delta I$  の遅延時間依存性からキャリアの寿命を定量的に導くことができる。

(2) の SPV の緩和は、先に述べたように、SPV によりトン

ネル障壁が変化するために生じるもので、光強度に対し飽和的な非線型の関係を持つ。SPVの緩和は表面近傍のポテンシャルに捕獲されたキャリアの放出であるため、減衰時間よりも長い時間スケールで起こる。これは試料の種類によらず、実際、Fig. 4で示したGaNaAs試料の場合も、より長い遅延時間範囲においてもう一つ別の成分が現れることが確認されている。

#### 4. SPPX-STMの応用 一時間分解信号の空間マッピング

3章で述べたように、SPPX-STMでは、ポンププローブ法と同様に、吸収飽和の現象を介して光キャリア密度の時間変化を捉える。ポンププローブ法との違いは、トンネル電流をプローブとして用いる点で、それゆえ、SPPX-STMはSTM本来の空間分解能を持つことが期待される。従って、試料表面を二次元的に走査して時間分解信号を測定すれば、局所キャリアダイナミクスの空間マッピングが可能となる。

ここでは、例として、ヘテロ半導体試料に対して空間マッピングした結果を示す。測定の模式図をFig. 6(a)に示す。試料はGaAs基板の上に成長させたAlGaAs(膜厚1 $\mu\text{m}$ )/低温成長GaAs(LTGaAs)(膜厚1 $\mu\text{m}$ )である。時間分解能も併せて実証するため、LTGaAs層は、十分低温の成長条件にしてキャリアの再結合寿命をピコ秒オーダーにまで短

くした。また、基板GaAs領域からのキャリアの流入による影響をなくすため、GaAsよりもバンドギャップの広いAlGaAs層を挟んでいる。さらにAlGaAsのバンドギャップエネルギー(1.97 eV)よりも、パルス光の励起エネルギーを十分低く(1.55 eV)設定しており、この領域では光キャリアは生成しない。

遅延時間を固定した状態でAlGaAs/LTGaAs界面付近で探針を走査させ、そのときの $\Delta I$ の値を空間マッピングしたものをFig. 7(b)に示す。遅延時間が2 psのときには、界面を境にコントラストの違いがはっきりとみられる。LTGaAs領域では遅延時間が2 psの場合、吸収飽和により $\Delta I$ が負の大きな値をもつため、像の右側が暗くみえている。この左右のコントラストは、遅延時間が長くなるにつれてなくなっていき、11 nsのときはほぼ空間的に一樣になっている。このように、遅延時間を変えたときのコントラストの変化をみれば、キャリアダイナミクスの空間的な情報を得ることができる。

左右の明暗のコントラストは、界面を境にはほぼ50 nm程度で変化している。この $\Delta I$ の染み込み長はTIBBの広がりによって決まっている。時間分解STMでは、このTIBBの及ぶ領域に拡散してきた光キャリアを検出しているので、その範囲内の平均的な寿命の情報を得ていることになる。TIBBの空間的な広がり、試料の特性、バイアス電圧、探針の形状などによって決まり、例えば、より高ドープの試料であれば、スクリーニング効果により、広がりはずっと小さくなる。実際、光照射の有無によるI-V曲線の変化からSPVを求め、暗状態でのTIBBの大きさ(即ち局所領域のキャリア密度)を解析することが可能な「光変調トンネル分光法」<sup>12,13,22-25)</sup>により測定した実験では、ナノスケールの空間分解能を示す結果が得られることが確認されており、時間分解STMの空間分解能も同程度まで高くすることが可能であると考えられる。

#### 5. まとめ

本稿では、超短パルスレーザーとSTMを組み合わせることで高い時間分解能をSTMに付与することを可能にした「遅延時間変調型パルス光対励起STM(Shaken-pulse-pair-excited STM; SPPX-STM)」について解説した。半導体試料の場合SPPX-STMで観測にかかるのは、光励起されたキャリア密度の時間変化である。本稿ではキャリア再結合過程を例に挙げたが、ドリフトや拡散過程なども局所的なキャリア密度変化を引き起こすため、これらのダイナミクスに関する空間情報も得られることになる。実際には、一般的なメカニズムの項目で述べたように、光強度に対して非線形性を持つとよく、その他の過程も計測可能である。今後、局所物性の基礎的な研究と併せて、より実用的なデバイス構造に対し、動作状況に近い状態でのダイナミクスを可視化することにより、超高速デバイスの特性をナノスケールで解析することが可能になるなど、応用面での幅広い展開が期待される。

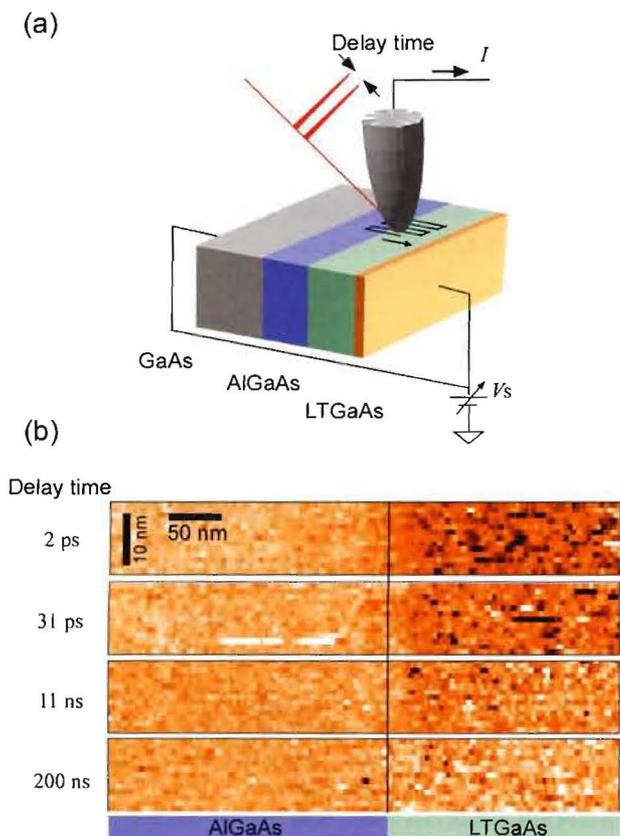


Fig. 6 Example of SPPX-STM mapping for a GaAs/AlGaAs/LTGaAs heterostructural sample. (a) Schematic illustration of the mapping process. (b) A sequence of  $\Delta I$  mappings measured at different delay times over a boundary between AlGaAs and LTGaAs regions.

〔文 献〕

- 1) O. Takeuchi, R. Morita, M. Yamashita and H. Shigekawa: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) 4994.
- 2) O. Takeuchi, M. Aoyama, R. Oshima, Y. Okada, H. Oigawa, N. Sano, H. Shigekawa, R. Morita and M. Yamashita: *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 3268.
- 3) O. Takeuchi, M. Aoyama and H. Shigekawa: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 5354.
- 4) O. Takeuchi, M. Aoyama, M. Kondo, A. Taninaka, Y. Terada and H. Shigekawa: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 1926.
- 5) 寺田康彦, 青山正宏, 近藤博之, 武内 修, 重川秀実: 薄膜表面物理分科会・ニュースレター **128** (2006) 9.
- 6) Y. Terada, M. Aoyama, H. Kondo, A. Taninaka, O. Takeuchi and H. Shigekawa: *Nanotechnology*, **18** (2007) 044028.
- 7) 重川秀実, 吉田昭二, 寺田康彦, 武内 修, 大井川治宏: 固体物理, **42** (2007) 795.
- 8) 重川秀実, 武内 修, 青山正宏, 大井川治宏: 応用物理, **73** (2004) 1318.
- 9) H. Shigekawa, S. Yoshida, O. Takeuchi, M. Aoyama, Y. Terada, H. Kondo and H. Oigawa: *Thin Solid Film*, **516** (2008) 92348.
- 10) H. Shigekawa, O. Takeuchi and M. Aoyama: *Sci. & Technol. of Advanced Materials*, **6** (2005) 582.
- 11) Mono-Cycle Photonics and Optical Scanning Tunneling Microscopy —Route to Femtosecond Angstrom Technology— ed. by M. Yamashita, H. Shigekawa and R. Morita (Springer, 2005)
- 12) 実戦ナノテクノロジー・走査プローブ顕微鏡と局所分光, 重川秀実, 吉村雅満, 坂田 亮, 河津璋 編, 裳華房, 2005.
- 13) 朝倉物性物理シリーズ・極限実験技術・走査プローブ顕微鏡, 重川秀実 朝倉出版 2003.
- 14) A. Othonos, *J. Appl. Phys.*, **83** (1998) 1789.
- 15) レーザー光学物性, 長澤信方 編, 丸善, 1995.
- 16) S. Grafstrom: *J. Appl. Phys.*, **91** (2002) 1717.
- 17) 重川秀実, 表面科学, **20** (1999) 336.
- 18) S. Weiss, D. F. Ogletree, D. Botkin, M. Salmeron and D. S. Chemla: *Appl. Phys. Lett.*, **63** (1993) 2567.
- 19) R. H. M. Groeneveld and H. van Kempen: *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 2294.
- 20) R. J. Hamers and D. G. Cahill: *Appl. Phys. Lett.*, **57** (1990) 2031.
- 21) S. Yoshida, J. Kikuchi, Y. Kanitani, O. Takeuchi, H. Oigawa and H. Shigekawa, *e-journal, Surf. Sci. & Technol.*, **4** (2006) 192.
- 22) O. Takeuchi, S. Yoshida and H. Shigekawa: *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 3645.
- 23) S. Yoshida, Y. Kanitani, R. Oshima, Y. Okada, O. Takeuchi and H. Shigekawa: *Phys. Rev. Lett.*, **98** (2007) 026802.
- 24) 吉田昭二, 蟹谷裕也, 武内 修, 重川秀実, 表面科学, **28** (2007) 111.
- 25) S. Yoshida, Y. Kanitani, O. Takeuchi and H. Shigekawa: *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 102105.