古体物理11

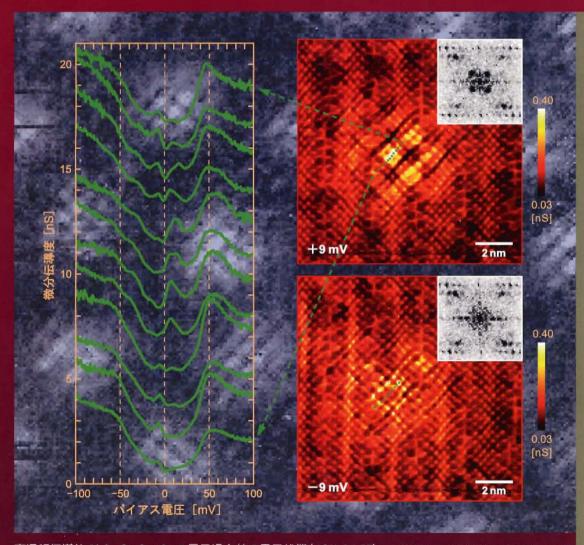
KOTBA 2 42 (11) 695-872 (2007)

No. 501

SOLID STATE PHYSICS Vol.42 2007

特集号

走査プローブ顕微鏡で見る固体物理



高温超伝導体 Bi₂Sr₂CaCu₂O_xの量子渦糸芯の電子状態(4.2K,14.5T). (東エ大・物性物理学専攻 西田研究室)

Ⅴ. 物性イメージング

光 STM と半導体キャリアーダイナミックス ---STM で観る固体の物理---

筑波大学大学院数理物質·物質創成先端科学専攻, CREST-JST 重川秀実・吉田昭二・寺田康彦・武内 修・大井川治宏

§1 はじめに

表面の研究が科学として受け入れられてきた歴史は「清浄な表面」を提供できる真空技術の発展の道程と重なるが、今日のように表面物理の世界が多くの分野にまたがる対象となったのは、様々な「表面」がナノスケール科学の舞台として注目を集め、半導体からバイオに至るまで幅広く活用され始めたことによるところが大きい、表面物理は境界条件を課した固体物理の中の一つの特別な状態と受け取られてきた時期もあるが、表面の効果が大きな役割を担うスケールでの科学や、表面(とその少し外側を含む領域)に新たな構造を作り込み、ナノスケールの科学を直接扱うことが可能な場であることの理解が深まるにつれ、多岐にわたる分野でその重要性が認識されてきた。

今後、新しい機能を有する材料や素子を開発していく上で、表面(上)の物理と表面下(固体)の物理をつなぐ領域の研究は、ますます大切さを増していくものと思われるが、ナノスケールの構造を対象としてそのダイナミックスを調べるには、それなりの計測手段が必要になる。

走査プローブ顕微鏡(SPM)は、よく知られているように表面の情報をナノスケールで取り出すことが可能な手法である¹⁻⁷⁾. プローブ(トンネル電流、力、超音波、光など)の種類により得られる情報や分解能は異なるが、いずれも実空間で解析が可能であることを特徴とし、走査トンネル顕微鏡(STM)の発明以来、STMの走査原理を基礎とした多くの関連技術が開発されてきた. 「走査プローブ顕微鏡で見る固体物理」というテーマを考えると、表面を観察する技術として発展してき

た SPM を新しい観点から捉え、表面と表面下 (固体)の物理をつなぐ情報を得るための手法として見直すことが期待されよう. もちろん、表面の影響を完全に離れることは難しいが、測定の原理 や表面の現象をうまく利用することで固体の情報を得たり、他の手法と組み合わせることで固体の物理情報をどこまで SPM のプローブに組み込むことが可能になるのか、大変興味深い課題である.

本稿では、光を STM に組み合わせることで、 表面下で起こるキャリアーのダイナミックスを透 かして見る 2 つの試みを紹介する.

§2 光と STM を組み合わせると

光は、自然の基本的な要素であり、我々にとって、古くから生活に密着した非常に馴染みの深い存在である。物を見ることに始まり、情報伝達の手段として使われてきたほか、物質の特性評価や化学反応の解析・制御など、科学の世界でも多くの分野に関連し広く利用されてきた。最近では、レーザー技術の進歩により、フェムト秒(10⁻¹⁵秒)を超えてアト秒(10⁻¹⁸秒)領域の短いパルス光を創り出すことも可能になり、非常に短い時間の現象を解析することもできるようになっている³,9⁻¹²)。しかし、一般に、光は空間的には波長で決まる領域で平均された情報を信号として与える。

一方,現在,半導体素子は数十 nm の領域でチャンネル構造を制御する段階に入り^{13,14)},また,単一分子を利用した素子の開発研究も盛んに進められている^{15,16)}.したがって,こうした試みを推

し進め新しい機能を実現するには、キャリアーの ダイナミックスなど材料の物理をナノスケールで 解析することが必要不可欠になる.

本節では、光と STM を組み合わせることにより、キャリアーのダイナミックスをナノスケールで、また、超高速の過程まで含めて解析することが可能となる「光変調トンネル分光法」^{2,17-19)}と「フェムト秒時間分解STM」^{1-3,20-27)}の 2 つの手法について概要を説明する.

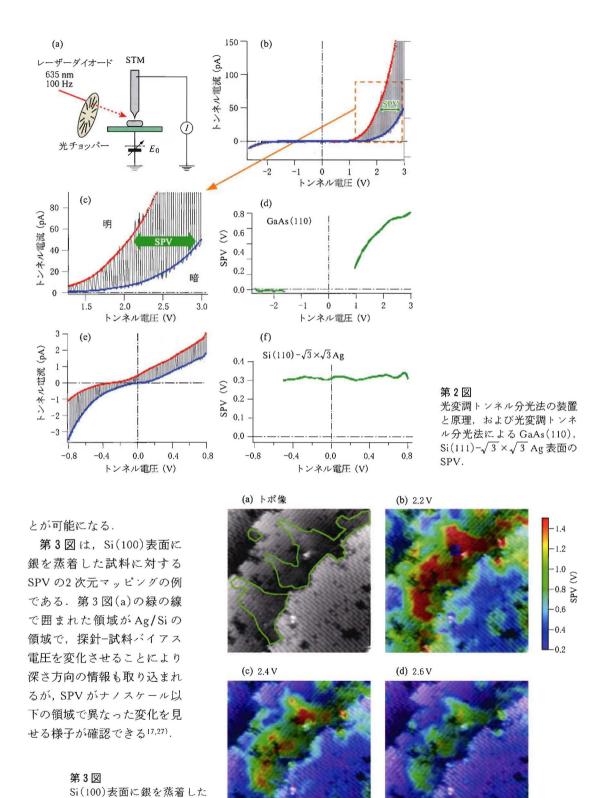
2.1 光変調トンネル分光法

探針・試料に印加するバイアス電圧を変化させてトンネル電流-バイアス電圧曲線(I-V曲線)を求めることで、電子状態の局所的な情報や吸着分子の振動モードなどに関する知見を得る方法を「トンネル分光」と呼ぶ、STM 観察と組み合わせれば、目的とする場所の電子構造を原子スケールで調べることが可能になる。こうした方法に、たとえば、光をオン・オフさせながら試料を照射する仕組みを組み合わせたのが「光変調トンネルの光法」で、光励起の有無(変調)によるトンネル電流の変化を測定することで、試料の電子構造をダイナミックスまで含めて解析することを可能にする².17-19).

半導体を試料とする場合, STM 探針(金属)と 試料の間には、金属-トンネルギャップ-半導体に より MIS (metal-insulator-semiconductor) 構造が 形成される(第1図). 半導体のキャリアー密度が 小さい場合, 試料と探針の間にかけられたバイア ス電圧による電界は、真空ギャップのみならず半 導体中にも浸透し、半導体表面近傍のバンドは探 針の電界により弯曲する(探針誘起バンド弯曲: tip-induced band bending: TIBB)²⁸⁾. この状態に バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を照射 すると、励起されたキャリアーは電界を打ち消す ように再分布しバンドの弯曲が緩和する. 光の強 度が高ければ充分な量のキャリアーが励起されて バンドは平坦になる. このバンド構造の変化が表 面フォトボルテージ(SPV)である. したがって, この場合, SPV を測定することにより, 光照射 が無い暗状態でのバンドの曲がりの大きさを知 ることが可能になる. ただし, フェルミ準位とバ ンド端との位置関係により、n型試料では試料に正バイアス電圧を(第1図(a))、p型試料では試料に負バイアス電圧を(第1図(b))印加したとき TIBB が生じることから、SPV の観察にはバイアス電圧の設定に注意が必要である.

第2図 に測定系の模式図と、n-GaAs(110)表面 において測定した光強度変調トンネル分光の結果 例を示す. 光を on/off させながらバイアス電圧を 変化させてトンネル電流を測定することにより, 明状態, 暗状態に対応する二本の I-V 曲線を得る (第2図(b),(c)). 二本のカーブの電圧軸方向のず れの大きさからそれぞれのバイアス電圧において 光照射によるバンド構造の変化に関する情報が得 られる(第2図(d)). 電流ゼロの値におけるシフト 量(第2図(b)において I-V 曲線が立ち上がる電 圧の値の差)が通常議論されてきた表面光起電 力である²⁹⁾. 比較のため、Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ Ag 表面での結果を第2図(e),(f)に示す. 同表面は 金属的で TIBB が生じないため異なるバイアス電 圧にわたってほぼ一定の SPV が得られている. n-GaAs (110)表面では表面準位が無く, 第2図 (d)に見られるようにバンドの緩和量はバイアス 電圧に依存する. TIBB はドーパントの量などに よるため、こうしてバイアス電圧の影響を考慮し た解析をすることによって, 内部の情報を得るこ

第1図 探針バンド弯曲(TIBB)と表面フォトボルテージ(SPV).



試料に対する SPV の 2 次元

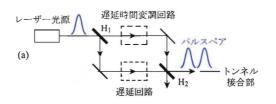
マッピング.

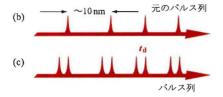
2.2 フェムト秒時間分解 STM

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持つが、外部回路の典型的な測定バンド幅は高々数十kHz 程度であるため、高速現象の測定を得意としない。一方、光を用いた測定法には、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などを用いたポンププローブ法などの超高速測定の手法が確立されている。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持たない。そこで、STM の発明以来、これまで多くの研究者が両技術の融合を試みてきた。

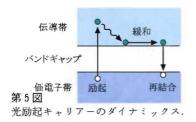
開発の歴史的な経緯やこれまでに試みられてきた様々な方法の詳細については他の解説や専門書に譲り¹⁻¹⁾,本節では、「遅延時間変調型フェムト秒時間分解 STM (Shake-Pulse-Pair-Excited STM: SPPX-STM)」^{3,20-27)}について解説する.

光学的ポンププローブ·反射率計測法(OPPR 法)9-12)では、第4図(a)-(c)に示すように、超短





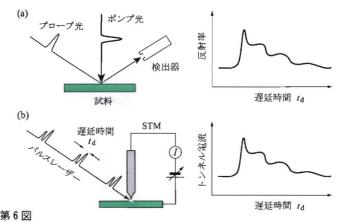
第4図 光学的ボンブブローブ法の光励起 システム.



バルスレーザーの個々のバルスを2つに分けて遅延時間はを持たせバルス対の列とする。最初のバルスは試料を励起することに使われポンプ光と呼ばれる。二つめのバルス(プローブ光)の反射率を遅延時間はを変えて測定することで、たとえば、ポンプ光により励起された試料の電子状態の緩和過程(第5図)がプローブ光の反射率の変化を通して観察される(第6図(a))、時間分解能はパルス幅によって決まりフェムト秒の領域にある。

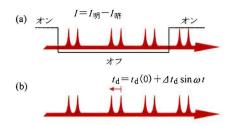
SPPX-STMでは、探針直下の試料部分をOPPR法と同様に遅延時間を持たせたパルス対で照射するが(第6図(b))、パルス対はいずれも試料を励起することに使われる。すなわち、測定するのはプローブ光の反射率ではなくSTMのトンネル電流で、遅延時間を変化させ対応するトンネル電流の変化が信号として取り込まれる。時間分解能はパルス幅で決まり、空間分解能はプローブがトンネル電流であることから原理的にはSTMの原子レベルの分解能を引き継ぐことになる。

OPPR 法,SPPX-STM ともに得られる信号は 徴弱であり、S/N 比を上げて測定するため,励起 光を変調し同じ周波数で振動する信号成分を取り 出すロックイン検出法が用いられる。OPPR 法の 場合,通常,励起光の強度を変調する方法がとら れるが(第7図(a)),SPPX-STM に同様の手法 を用いると,探針や試料が熱膨張・伸縮を起こ し,それに伴うトンネル電流の変化が雑音となっ て目的とする信号を検出することを妨げる^{1-4,30)}.



(a) 光学的ポンププローブ法と(b) フェムト秒時間分解 STM の原理.

(798) 固体物理



第7図 光励起の(a)強度変調と(b)遅延時間変調。

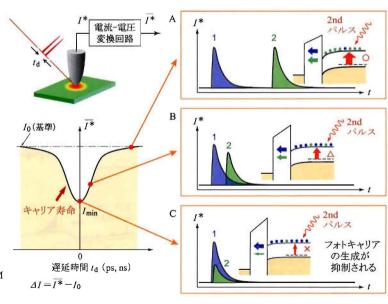
これは、トンネル電流が試料・探針間の距離に指数関数的に依存し、0.1 nm の距離の変化がトンネル電流を一桁変化させることによる。そこで、SPPX-STM では、励起光の強度を変調する代わりに遅延時間を変調させることで(第7図(b))全体としての光の強度を保つことによりこの問題を回避した。

第8図は半導体試料に対するSPPX-STM計測のモデルである.バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光で試料を照射すると価電子帯の電子が伝導体に励起され、その後、再結合などによって緩和し最初の状態に戻る.その際、探針・試料間距離や光量などの測定条件をうまく設定すると、光励起によるキャリアーのダイナミクスをトンネル電流の変化として計測することが可能になる.第8図右図のA-Cは、異なる三つの遅延時間に対する状態で、第一、および第二の

パルスで励起されたキャリアーによるトンネル電流のいたよるトンネル電流のいて、2と番号付け)で、また、ホールがトンネルでも、第一のメルルである。第一の異なる遅延時間のよるトンネル電流の関なる遅延時間の、には一つの異なるである。第二のパルスで励起される

キャリアーの量は第一のパルスにより励起された キャリアーがどの程度その準位に滞在しているか に依存するため、遅延時間が長くキャリアーの緩 和量が大きいほど増加する. したがって、第一の パルスによる影響がほぼ消えた長い遅延時間で は、第二のパルスによる励起キャリアーのトンネ ル電流への寄与は、第一のパルスによるものに等 しくなる(第8図A). 一方, 遅延時間が短くな り、第一のパルスによる励起が緩和する途中で第 二のパルスが届くようになると、第二のパルスによ る励起量は減少していく(第8図 B.C)、SPPX-STM の信号は遅延時間に対するトンネル電流の 変化であり、第8図左下図に見られるように遅延 時間ゼロで最小値をとるグラフとなる. この変化 が光励起されたキャリアーの緩和時間に対応する ことになる. 実際には、光キャリアーによる SPV の変化がトンネル電流に影響するが、詳細は割愛 する. ここでは伝導体のバンド端を励起した場合 の様子が示してあるが、励起波長を変えて異なる 準位を励起すれば、OPPR 法と同様に、その準位 での緩和過程を反映した信号が得られることに なる.

全体像を見るため、フェムト秒時間分解 STM 装置の概略を 第9図 に示す. バルス列の個々のパルスを2つに分けることでパルス対の列を作り、



第8図 フェムト秒時間分解STM で測定される物理.

STM 探針直下に照射する. パルス対の間の遅延 時間を変化させ対応するトンネル電流の変化を信 号として取り込む.この際,励起光の遅延時間を 変調し同じ周波数で振動する信号成分をロックイ ン検出することで、熱膨張の問題を回避しながら 微小信号を測定することが可能になる.

光 STM で覗く世界 **§**3

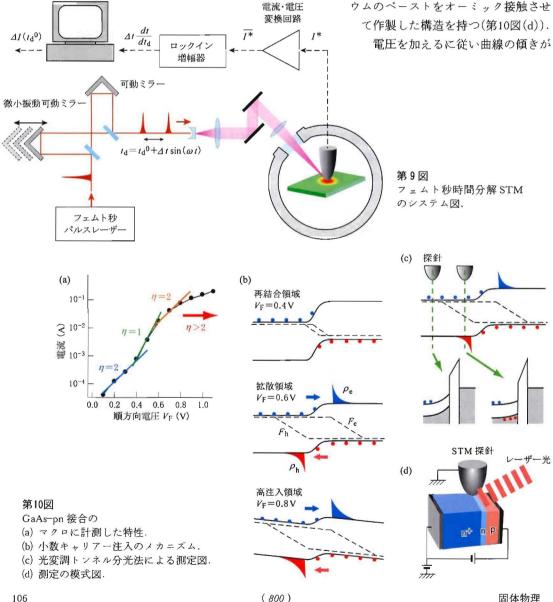
本節では、§2で説明した2つの手法を実際に

適用した例を紹介する.

3.1 動作状態の素子を流れるキャリアー の可視化

第10図(a)は、マクロな方法で求めた GaAs-pn 接合の順方向バイアス電圧・電流(Ir-Vr)特性であ る. 試料は, n型(Si-ドープ, 2.0×10¹⁸ cm⁻³, 500 nm)とp型(Be-ドープ, 2.0×10^{18} cm⁻³, 500 nm) の GaAs 層を n+-GaAs(001) 基板(Si-ドープ, 8.3× 1018 cm-3) 上にエピタキシャル成長させ、p 型表

> 面に Au-Zn 電極をまた基板側にインジ ウムのペーストをオーミック接触させ

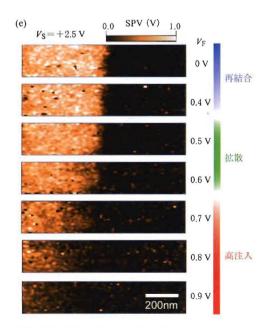


変化していくが、その様子は、 $I_F = \exp(qV_F/\eta kT)$ と表わされる。q,k,Tはそれぞれ、単位電荷、ボルツマン定数、試料の温度である。 η の値によって低バイアス側から以下の3つの領域に区別されてモデルが立てられ、素子の特性が説明され評価されてきた(第10図(b)):

- (1) 再結合領域(η=2):注入された少数キャリアーが空乏層領域で再結合。
- (2) 拡散領域(η=1):少数キャリアーが中性領域 に注入される。
- (3) 高注入領域(η≥2):少数キャリアーの注入が 大きくなり、空乏層の両側の中性領域でも電圧 降下が顕著になる³¹⁾.

実際の素子の特性はこのモデルによりよく再現されるが、これまで微視的に直接確認されたわけではなかった。本節では、§2.1で述べた「光変調トンネル分光法」^{2,17-19)}の適用例として、基本素子である GaAs の p n 接合の小数キャリアー注入の様子を解析してみよう。半導体素子特性を動作下で、またナノスケールで評価することは、今後の機能素子開発において重要な課題である。

§2.1 で述べたように、表面フォトボルテージ



(e) SPV 2 次元マッピング・順方向バイアス電圧依存性.

(SPV)を計測すると探針誘起バンド弯曲(TIBB)の大きさに関する情報が得られる. 光照射を行うと TIBB が緩和するが, それは光励起によりキャリアーが生成され電場が遮蔽されるからで, pn接合などにおいてキャリアーが注入されると, 同様の機構によりバンド構造は緩和する. 注入された少数キャリアーは再結合して減少していくため,キャリアー密度は,接合部から離れるに従い減少していく. したがって, 探針を2次元的に走査して SPV の値を求めることにより(第10図(c)), TIBB の値, すなわち, キャリアー密度の2次元分布を評価することが可能になる.

第10図(e)は、第10図(a)の FV特性を測定したのと同じ試料に対し、順方向バイアスを変化させて SPV 2 次元マッピングの電圧による変化を可視化した結果である。第10図(d)にあるように、試料は真空中で劈開し、清浄な(110)面の pn 接合を含む領域に対して光変調トンネル分光法による計測を行った。光励起はレーザーダイオード(波長 635 nm)をスポットサイズ 2 μm に絞って探針直下を照射し、100 Hz でオン・オフすることで光強度を変調した。SPV は弱い光で測定可能であるのと、光のスポットを絞り探針直下に集光することで熱膨張の問題を回避できる。

接合部から距離xにおける注入少数キャリアー の密度は

 $ho_{\rm ex} =
ho(x_0, V_{\rm F}) \exp\left(-(x-x_0)/L_{\rm p}\right)$ (1) と表わされ,それによる表面フォトボルテージの変化分は

$$\Delta_{\text{SPV}} = C \ln \left(\rho_{\text{ex}} / \rho_0 \right) \tag{2}$$

と表わされる、ここで、 L_0 はホールの拡散長、 ρ_0

は規格化のための因子,Cは比例定数である.

(1), (2) より

$$\Delta_{\text{SPV}} = C \left(-\frac{x - x_0}{L_0} + \ln \left(\frac{\rho \left(x_0, V_F \right)}{\rho_0} \right) \right)$$
 (3)

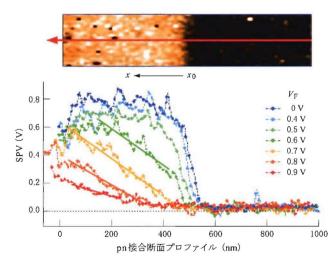
となり、 Δ_{SPV} は接合部からの距離に対し直線的に変化することになる。第11図 上図のように pn接合の界面を横切る赤い矢印に沿った断面を、第10図(d)の各 SPV 像について求めたものを第11図下に示す。各順方向バイアス電圧に対し Δ_{SPV} の傾きは直線となっており、式(3)によりよく表わされる。そこで、たとえば、二つの異なる順方向バイアス電圧に対して得られる Δ_{SPV} の関係

$$\Delta_{\text{SPV}}(x_0, 0.7 \text{ V}) - \Delta_{\text{SPV}}(x_0, 0.6 \text{ V})$$

= $C \ln \left(\rho(x_0, 0.7 \text{ V}) / \rho(x_0, 0.6 \text{ V}) \right)$

と合わせて, $\rho(x_0, 0.7 \, \text{V})/\rho(x_0, 0.6 \, \text{V})$ の値がマクロな I-V曲線から得られる $I_{0.7} \vee I_{0.6} \vee$ に等しいことを仮定すると C の値が得られ,拡散長 L_p を求めることができる.

それぞれの順方向バイアス電圧に対し得られた拡散長を第1表にまとめてある。300 K では、ホールの移動度は主にフォノン散乱によって決まる。Si ドープの n型 GaAs では、その値は理論的な考察から最大で400 nm とされており、得られた値と整合する³²⁾。高い順方向バイアスでは中性領域にもバイアスが印加されるため、見かけ上、拡散長が大きくなって現れている。

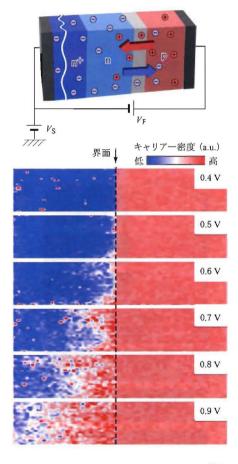


第11図 第10図の SPV 2 次元マッピングの断面図.

 Δ_{SPV} の変化をキャリアー密度に焼き直したのが 第12図 で、ホール注入の様子を可視化した結果となる。場所による揺らぎは、接合部の構造的な乱れやドーパント、欠陥などの空間的な揺らぎによって生じるが、現在、半導体素子の構造は数十nmの領域に達しており、今後の素子開発において、こうした解析手法がますます重要になる。

第1表 ホール拡散長の順方向バイアス電圧依存症.

| 順方向電圧(V) | 正孔拡散長(nm) |
|----------|--------------|
| 0.5 | 181 ± 28 |
| 0.6 | 183 ± 15 |
| 0.7 | 180 ± 9 |
| 0.8 | 222 ± 12 |
| 0.9 | 429 ± 32 |

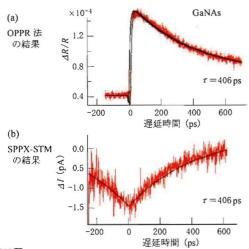


第12図 ホール注入の順方向バイアス電圧 依存性.

108 (802) 固体物理

3.2 時間分解トンネル信号と 光励起キャリアーダイナミックス

本節では、§2.2 で説明した SPPX-STM の手法



第13図 GaNAs に対する (a) OPPR 法と (b) SPPX-STM の 計測結果

を実際に適用した例を紹介する^{25,26,33)}. 第13図は、同じ GaNAs 試料に対して、波長 800 nm、パルス幅 100 fs、繰り返し周波数 80 MHzのレーザー光を用い、OPPR 法、SPPX-STM の両手法で計測した結果である.SPPX-STMは、遅延時間に対してトンネル電流変化の大きさを信号としてプロットしたもので、第13図(b)に見られるように、トンネル電流の信号は、遅延時間ゼロで最小値をとり、遅延時間が大きくなるとともにゼロに向かって緩和していく.この結果は、§2 の第8図で述べたモデルとよく対応する.また、SPPX-STMで求めた緩和時間は 444 ps で OPPR 法により得られたキャリアーの寿命406 ps と良く一致している.

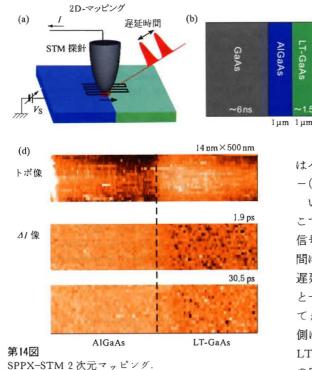
次に、GaAs 上に AlGaAs および LT-GaAs をそれぞれ $1 \mu m$ 成長させた試料 (第14図(b))を真空中で劈開し、AlGaAs、LT-GaAs の界面を含む領域に対して時間分解信号の 2 次元マッピングを行った。LT-GaAs は、低温で成長させることにより欠陥を導入し寿命を短くした試料で、第14図(c)に示すように 5.9 ps の寿命を持つ。AlGaAs に対して

LT-GaAs

(c)

) ₀

-400 --600 --800 -1 -40 -20



(a) 測定方法, (b) 試料の構造, (c) 時間分解測定結果, (d) 2次元マッピング.

はバンドギャップ(2.3 eV)より励起光のエネルギー(1.55 eV)が低いためキャリアーは励起されない、いろいろなデータの取り方が可能であるが、ここでは、遅延時間を固定して表面を走査しながら信号を取り込むことで(第14図(a))、ある遅延時間における信号を2次元的にマッピングしている。遅延時間1.9 ps, 30.5 ps における結果を STM 像と一緒に第14図(d)に示す。第8図,第14図で見てきたように、信号は遅延時間の小さな所で負側に振れることに対応し、2次元遅延時間像ではLT-GaAs の部分が暗く表示され、時間によりその明るさが変化しているのがわかる。最初のパルスで励起されたキャリアーは再結合などにより減

0 20 40

遅延時間 (ps)

少していくため、第14図(d)は、励起後1.9 ps, 30.5 ps において残存するキャリアーがどのように分布するかを示す図になっている。このように、異なる遅延時間において得られた図を並べると、キャリアーのダイナミックスを2次元的に可視化して解析することが可能で、局所的な構造を持つ試料であれば、それら構造がキャリアーのダイナミックスに与える影響を直接観察できる。

§4 まとめ

光と STM を組み合わせることで、試料のキャリアーダイナミックスをナノスケールで観察することが可能な 2 つの手法について述べてきた. ステップなど表面特有の構造が影響する現象も観察されるが、ドーパントや原子欠陥のポテンシャルへの影響や、光励起によるキャリアーの寿命など、表面下の物理的な過程を覗き見ることも可能である. 光とプローブの組み合わせにより、新しい可能性を秘めた加工・制御も可能で+ス,3+)、厚み・深みのある表面を対象とすることによって、今後、更なる新しい科学技術が展開していくことを心から期待してやまない.

[参考文献]

- 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,2003)
- 2) 重川秀実,吉村雅満,坂田 亮,河津 璋編:実戦ナノテクノロジー・走査プローブ顕微鏡と局所分光(裳華房,2005)。
- M. Yamashita, H. Shigekawa and R. Morita: Femtosecond Nanometer Technology (Springer, 2004).
- 4) 重川秀実: 表面科学 20 (1999) 337
- 3) 斎木敏治,戸田泰則:ナノスケールの光物性(オーム社, 2004)
- 6) 小間 篇編:実験物理学講座10表面物性測定(丸善, 2001)。
- 7) 大津元一, 小林 潔: 近接場光の基礎(オーム社, 2003).
- 森田清三:はじめてのナノブローブ技術(工業調査会, 2001).
- 9) 平尾一之,邸 建栄編:フェムト秒テクノロジー(化学 同人, 2006).
- 10) 長澤信方:物性物理の新展開 レーザー光学物性(丸善, 1993).
- J. Shah: Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanstructures, Solid-State Sciences (Springer, 1999).
- 12) 齋藤富士郎:超高速光デバイス(共立出版, 1998).

- 13) S. Roy and A. Asenov: Science 309 (2005) 388.
- 14) P. De Wolf, R. Stephenson, T. Trenkler, T. Clarysse, T. Hantschel and W. Vandervorst: J Vac. Sci. Technol. B 18 (2000) 361.
- A. Aviram and M. A. Ratner: Chem. Phys. Lett. 29 (1974)
- C. P. Collier, E. W. Wong, M. Belohradsky, F. M. Raymo, J. F. Stoddart, P. J. Kuekes, R. S. Williams and J. R. Heath: Science 285 (1999) 391.
- O. Takeuchi, S. Yoshida and H. Shigekawa: Appl. Phys. Lett. 84 (2004) 3645.
- S. Yoshida, Y. Kanitani, R. Oshima, O. Takcuchi, Y. Okada and H. Shigekawa: Phys. Rev. Lctt. 98 (2007) 026802.
- 19) 吉田昭二, 蟹谷裕也, 武内 修, 重川秀実: 表面科学 28, 2 (2007) 111.
- 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.
- 21) 重川秀実. 武内 修, 青山正宏, 大井川治宏: 応用物理 73 (2004) 1318.
- O. Takeuchi, M. Aoyama and H. Shigekawa: Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) 5354.
- H. Shigekawa, O. Takeuchi and M. Aoyama: Sci. & Technol. of Advanced Materials 6 (2005) 582.
- O. Takeuchi, M. Aoyama, M. Kondo, A. Taninaka, Y
 Terada and H. Shigekawa: Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) 1926.
- Y Terada, M. Aoyama, H. Kondo, A. Taninaka, O. Takeuchi and H. Shigekawa: Nanotechnology 18 (2007) 044028.
- 26) 寺田康彦,青山正宏,近藤博行,武内 修,重川秀実: 応用物理学会・薄膜表面物理分科会 News Letter, No. 128 (2006).
- H. Shigekawa, S. Yoshida, O. Takeuchi, M. Aoyama Y. Terada, H. Kondo and H. Oigawa: Thin Solid Film (2007) in press.
- S. Yoshida, J. Kikuchi, Y. Kanitani, O. Takeuchi, H. Oigawa and H. Shigekawa: e-journal, Surf. Sci. & Technol. 4 (2006) 192.
- 29) L. Kronik and Y. Shapira: Surf. Sci. Rep. 37 (1999) 1.
- S. Grafstrom, P. Schuller, J. Kowalski and R. Neumann: J. Appl. Phys. 83 (1998) 3453.
- 31) S. M. ジィー: "半導体デバイス―基礎理論とプロセス技術"(産業図書, 2004).
- 32) B. Sieber: Bater. Sci. Eng. B 24 (1994) 35.
- Y. Terada, M. Aoyama, H. Kondo, N. Ebisawa, S. Yoshida,
 O. Takeuchi Y. Hirayama and H. Shigekawa: unpublished.
- D. Futaba, R. Morita, M. Yamashita, S. Tomita and H. Shigekawa: Appl. Phys. Lett. 83 (2003) 2333.

本誌のご購入にあたって

本誌をご購入いただくには、お近くの書店に注文して取り寄せるか、当社に直接ご注文ください.

110