

用語解説(39)

『走査トンネル顕微鏡』

— STM ファミリー —

走査型トンネル顕微鏡 (STM, Scanning Tunneling Microscope)

STM は、金属の針(探針)の先端を(導電性)試料表面から 10 Å 以内に近付けることにより、観測可能な大きさのトンネル電流が流れることを利用した新しい顕微鏡である。つまり、STM では、局所的な試料表面の電子状態密度のプロープとして針を用いて、トンネル電流を測定する。また、圧電体を用いて、針を試料表面に沿って走査する事により画像化する。装置構成は、トンネル電流のプロープである針と走査する圧電体及び試料ホルダーからなる顕微鏡本体と、トンネル電流の検出回路、フィードバック回路、画像表示部からなる。画像の表示モードとしては、トンネル電流が一定になるように圧電体にフィードバック電圧をかけて針を上下しながら走査することにより試料表面の凹凸像(定電流像、あるいはフィードバック電圧像とも呼ぶ)を得るモードと、フィードバックをかけずにトンネル電流の変化像として測定する(このため、可変電流像、または(針の)高さ一定像とも呼ぶ)モードの二つがある。STM の特徴は、①トンネル電流が針の先端と試料表面との間隔(トンネルギャップ)に指数関数的に強く依存するため、試料に垂直な方向と水平方向の分解能が共に原子的分解能を持つことで、表面1層の原子の様子を研究するのに適している。②また、針と試料表面の間が電子のトンネルバリアーとして働くならば、真空中は勿論、ガス中、空气中や溶液中でも使用できる。③さらに、電子の状態密度のようなスペクトル測定も可能である。STM では、小さいプロープ(またはセンサー)を試料表面に近付けて試料表面の局所的な情報X (STM の場合はトンネル電流)を検出し、プロープを走査して画像を得ている。このような原理に基づく新しい顕微鏡は、STM ファミリーまたは走査型プロープ顕微鏡(SXM)と総称される。

(広大理・森田清三)

- 1) 森田清三, 御子柴宣夫: 材料科学 24, 283 (1988).
- 2) "トンネル現象の物理と応用" (培風館, 1987).

走査トンネル電子分光法 (STS, Scanning Tunneling Spectroscopy)

STM において、試料-探針間の電圧 V におけるトンネル電流 I は、探針中心での試料表面電子の局所状態密度と電子のトンネル遷移係数の積分(コンボリューション)で与えられるので、STM 像には、表面の各原子位置における電子の情報が含まれている。そのため STM は、単なる顕微鏡にとどまらず、原子尺度の分解能を有

する画期的な電子分光法としても用いることが出来る。実際には、STM の走査中、帰還回路を一時的に開き、探針を試料表面の特定位置に固定して、電圧 V を(例えば、 $-3V$ から $+3V$ まで)鋸波状に変化させ、トンネル電流 I を測定する。これは、STM 画像の各点で(または、数点毎に)行えるので、STM 像と対応した $I(V)$ 特性が得られる。 $d(\ln I)/d(\ln V)$ を V に対してプロットすると、各点における電子状態密度にほぼ対応した曲線が得られる。

また、STS の $I(V)$ 情報を用いて、ある電圧(または、ある電圧範囲)における電流値をグレイスケール像として描くと、特定エネルギーの電子状態を表面構造と対応づけることが容易になる(キッツ, CITS, Current Imaging Tunneling Spectroscopy)。

(東北大金研・橋詰富博, 桜井利夫)

- 1) R. M. Feenstra, J. Stroscio and A. P. Fein: Surf. Sci. 181, 295 (1987).
- 2) Y. Kuk and P. J. Silverman: Rev. Sci. Instrum. 60, 165 (1989) (Review).
- 3) R. J. Hamers, R. M. Tromp and J. E. Demuth: Phys. Rev. Lett. 56, 1972 (1986).

原子間力顕微鏡 (AFM, Atomic Force Microscope)

AFM は、原子間に働く非常に小さな力を測定する新型の走査型顕微鏡として、1986年に Binnig, Quate および Gerber らによって開発された。

AFM は、原理的には、STM(走査トンネル顕微鏡)と触針式表面形状測定器(Stylus Profilometer)を組み合わせたものであるが、触針式とは異なり、AFM の場合、機械的弾性によって平衡している力を試料表面との間で一定に保ちながら探針を走査する。このような微小な力の検出部としては、微細な金属箔(線)や SiO_2 膜を用いた薄膜状のカンチレバー等が利用され、中性原子間に働く引力に等しい 10^{-9}N のオーダーの力をレバーの曲がりに変換している。この微小な変位をレバーの裏側に配置した STM で検出する。変位の検出には、STM だけでなく容量測定ならびに光波干渉や光でこなども利用されている。また、変調法等の利用による検出感度の向上 (10^{-18}N) も提案されている。AFM の課題としては、原子間力が長距離力であることによる横分解能の限界をいかに高めるかにある。したがって、レバーの先の探針の先鋭さが非常に重要な問題となる。

AFM の最大の特長は、基本的に試料に対する制約がないことであり、生体を含めた非導電性試料への応用が期待されている。さらに、試料表面の磁気的力の検出への応用にも注目されている。

(静大電子研・村上健司)

- 1) G. Binnig, C. F. Quate and Ch. Gerber: Phys. Rev. Lett. 56, 930 (1986).
- 2) O. Marti, S. Gould and P. K. Hansma: Rev. Sci. Instrum. 59, 836 (1988).
- 3) B. Drake, C. B. Prater, A. L. Weisenhorn, S. A. C. Gould, T. R. Albrecht, C. F. Quate, D. S. Cannell, H. G. Hansma, P. K. Hansma: Science 243, 1586 (1989).

TECHNICAL TERMS (39)

磁気力顕微鏡 (MFM, Magnetic Force Microscope)

鋭い先端を有する強磁性体探針と磁性体試料間に働く相互作用力を利用して、試料の微細磁区を観察する装置である。強磁性体で作られた探針を圧電アクチュエーターを用いて試料に沿って走査し、探針に作用する力の変化を二次分布にして表示することにより磁区が観察できる。分解能は現在のところ 0.01~0.1 μm が得られている¹⁻³⁾。原理的には真空を必要としないが、空气中を伝わる音響振動を防ぐ目的で減圧状態にすることがある。

この力は、試料探針間距離が 0.2 μm 程度としたとき、10⁻¹⁰N 程度と見積られている。この微小な力を検出するために、原子間力顕微鏡 (AFM) と同様に探針を微小なカンチレバーに取り付け、レバーの微小変位を検出する方法が採用されている。この変位の測定には、STM の構造を採用したり、あるいは光学的方法が採用されている。光学的方法としては、レーザーヘテロダイン検出法や、ファイバー干渉法、光てこ法等が考えられている。カンチレバーの背面にトンネルチップを対向させた STM 構造による変位検出は、原理的には感度が高いが、種々の吸着層が影響してカンチレバーに力を及ぼすために、力の検出感度に制限が生じ、また動作も不安定になる。これに対して光を用いる方法では、こうした問題が少ない。

探針としては、直径数 10 μm の Fe や Ni 等の強磁性体の線の先端を研磨して鋭くしたものが用いられる。研磨法としては、電解研磨法が無歪加工ということで主流となっている。カンチレバーとしては、半導体微細加工技術を駆使して SiO₂ 薄膜で作ることも行なわれているが、細く長い探針を強磁性体で製作し、その先端を直角に曲げただけのものも多用されている。

得られた像の解釈には種々の問題点があり、解釈法は確立されていない。その問題点の主なものは、カンチレバーの変位の検出に関係するものは別にして、ファンデルワールス力の影響、探針と試料の相互作用で両者の磁化状態が乱されること等である。これらの問題点は、いずれ解決されるものと考えられ、ミクロに磁区を観察する装置として将来が期待されるものである。

(室蘭工大電気電子工学・安達 洋)

- 1) Y. Martin and H. Wickramasinghe: Appl. Phys. Lett. 50, 1455 (1987).
- 2) P. Grutter, E. Meyer, H. Heinzelmann, L. Rosenthaler, H. R. Hidber and H. J. Guntherodt: J. Vac. Sci. Technol. A6, 279 (1988).
- 3) J. J. Saernz, N. Garcia and J. C. Sloncezewski: Appl. Phys. Lett. 53, 1449 (1988).

バリスティック電子顕微鏡 (BEEM, Ballistic-Electron-Emission Microscope)

BEEM 法は、金属/半導体、半導体/半導体などの界面の電子構造、およびショットキー障壁の高さなどの情報を、直接的に、しかも高い空間分解能 (~10 Å) をもって知ることのできる有力な表面分析法である。その手法は、走査型トンネル顕微鏡 (STM) を基礎としている。図 1 に STM 探針 (tip)、金属 (base) および半導体 (collector) のエネルギーバンドの模式図を示す¹⁾。STM 探

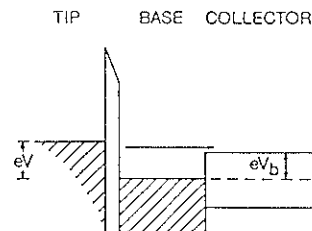


図 1

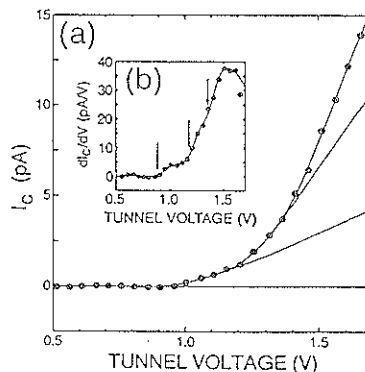


図 2

針から放出されるバリスティック電子は真空を通過して金属膜に注入される。これらのバリスティック電子のいくつかは、エネルギー損失なしに金属膜を通過し、半導体との界面に到達することができる。ここで、探針と金属膜との間の電圧であるトンネルバイアス (V) が、ショットキー障壁の高さ (V_b) より大きければ、これらの電子の多くは、この障壁を飛び越して半導体中に入ることができ、金属と半導体間にコレクター電流 (I_c) が観測される。また、V_b よりも小さな電圧では、障壁を飛び越えることができず、I_c はゼロとなる。つまり、V = V_b が I_c のしきい値となる。こうして、探針と金属膜表面との距離を一定に保ち、トンネル電圧を変化させると、界面のショットキー障壁や電子構造の情報および金属膜のバルクにおける電子の透過特性などを含んだ I_c-V 曲線が得られる。また、探針を表面上で二次元走査することにより、界面の電子構造の空間的情報を STM 像と同時に得ることができる。

図 2 (a), (b) はそれぞれ Au/GaAs 試料に対して得られた BEEM の I_c-V, dI_c/dV-V スペクトルである²⁾。ドットは実験値、実線は理論計算値であり、両者の一致は非常によい。0.89, 1.18, 1.36 V の位置に 3 つのしきい値が観測され、それぞれ Γ, L, X 点に存在する GaAs 伝導帯の極小値に対応する。また測定場所によるしきい値の変化 (~0.1 eV) も観測されており、GaAs の伝導帯の空間的な変化を反映していると考えられている。

(東大工・吉村雅尚)

- 1) W. J. Kaiser and L. D. Bell: Phys. Rev. Lett. 60 (14), 1406 (1988).
- 2) L. D. Bell and W. J. Kaiser: Phys. Rev. Lett. 61 (20), 2368 (1988).

走査型イオン伝導顕微鏡 (SICM, Scanning Ion-Conductance Microscope)

SICM は、生物学や電気生理学への応用のために開発された STM フェミリーの一つで、マイクロピペット先端部から流れ出るイオン電流を利用して、非伝導性表面の形状を描き出すことができる。SICM の走査プローブは、電解液で内部を満たされたマイクロピペットであり、その先端の開口部を電解液で覆われた非伝導性試料面に近づけ、ピペット内部と試料面を覆う電解液との間に流れるイオン電流を測定する。マイクロピペットの開口部を試料面に近づけると、イオンが流れ出る両者の間の空間が狭くなり、イオンのコンダクタンスは減少する。したがって、イオン電流が一定になるように開口部と試料面との距離を制御しながらピペットを試料面に沿って走査すれば、ピペットの軌跡は試料面をなぞるように変位し試料面の形状を描き出すことになる。SICM の分解能はマイクロピペットの開口部によって決まり、先端の内径と外径が小さければ、深い溝も分解能よく描きだせる。現在、内径 0.05~0.1, 外径 0.1~0.2 μm 程のピペットを用いて、0.2 μm 程の面内分解能が得られている。この顕微鏡は、細胞膜表面のイオンチャンネルが開閉する際に流れ出る微小なイオン電流を検出できるので、生きている細胞の電気的挙動を調べる目的に向いている。

(東工大総合理工・富取正彦)

- 1) P. K. Hansma, B. Drake, O. Marti, S. A. C. Gould and C. B. Prater: *Science* **243**, 641 (1989).

走査型超音波探針顕微鏡 (Scanning Ultrasonic Tip Microscope)
トンネル音響顕微鏡 (Tunneling Acoustic Microscope)

STM でのトンネル電流の代わりに超音波振動を探針に与え、超音波の信号を用いて探針を制御する顕微鏡が国内から相次いで提案された。探針にパルス超音波振動を発生させ、探針側で反射波を利用して探針先端の接触を検出するのが超音波探針顕微鏡¹⁾である。一方、探針を連続的に超音波振動させ、試料の裏面に貼った圧電体で透過波を検出して探針を制御するのがトンネル音響顕微鏡²⁾である。

超音波探針顕微鏡では、STM 探針の根元に貼った圧電体により、超音波パルスを探針に送り込む。探針先端で反射した超音波パルスは再び、圧電体で検出される。探針先端が試料表面に接触していないときに対して、探針先端が振動して試料表面に接触すると、超音波の一部は、探針先端より試料に透過する。その結果、探針の根元の圧電体で受信される超音波エコーの振幅、位相に変化が生ずる。超音波音速測定に用いられる超音波パルス重畳法³⁾を用いて探針先端の 1 nm 以下の接触を検出でき、この信号を探針制御に用いる。大きな特徴として、導電性試料であれば、同じ探針を用いて STM 像を観察することが可能である。現在のところ原子的な分解能は得られておらず、水平分解能は数 nm である。

(青学大理工・魚住清彦)

- 1) K. Uozumi and K. Yamamuro: *Jpn. Appl. Phys.* **28**, L1297 (1989).
2) K. Takata, T. Hasegawa, S. Hosaka, S. Hosoki and T. Komada: *Appl. Phys. Lett.* **55**, 1718 (1989).
3) H. J. McSkimin: *J. Acoust. Soc. Am.* **33**, 12 (1961).