

IV. 輸送現象

4 探針 STM で何ができるのか

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 長谷川修司・吉本真也・保原 麗

4本の探針を機械的・電氣的に独立して自由自在に、しかも有機的に制御することにより、単一探針の走査トンネル顕微鏡 (STM) では不可能な新しいナノスケール計測が可能となる。極微小の物体やデバイスの電気特性を測定できるだけでなく、電子波動関数の伝播を表わすグリーン関数の直接測定も可能となる。導電性のカーボンナノチューブ探針を利用して探針どうしを 20 nm 程度まで近づけることが可能となり、統合型 4 探針 STM コントローラの開発と合わせて、4 探針 STM 装置は完成の域に近づいている。

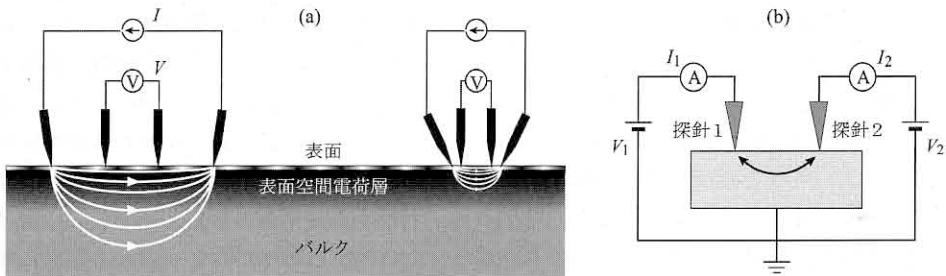
§1 はじめに

単一探針の走査トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope; STM) がもたらした学問的・技術的インパクトはいまさら言うまでもない。一個一個の原子や分子を実空間像として直接観察できるだけでなく、電子波動関数の絶対値の 2 乗 (局所状態密度) の分布をマッピングできることは、物理屋にとって革命的であった。しかし、ここで紹介するのは、複数本の探針を備えた STM 装置である。これは、単一探針 STM の単なる拡張ではなく、質的に新しいさまざまな計測を可能とする。4 探針 (Four-point probe; 4PP) 法による電気

伝導度の測定だけでなく、ナノ電界効果、グリーン関数の実空間マッピングなどが可能となり、STM の有効性を格段に広げるものと期待されている。

ナノスケール構造体の電気特性を測定するには、誘導電流やマイクロ波照射などの非接触法のほか、微細加工技術によって作成した固定微小電極に試料を直接コンタクトさせる接触法が用いられている。その他に STM や原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope; AFM) などの探針を電極として用いる手法があるが、それは空間分解能が高いことや探針配置の自由度が高いなどの特長を持つため、汎用性があり最も重要な手法と目されている¹⁻³⁾。STM 探針と試料上の固定電極との間で 2 端子電気伝導測定をした Bachtold の例¹⁾、久保らの 2 探針 STM を用いた測定⁶⁾、白木らや吉村らの 4 探針 STM を用いた 4PP 電気伝導測定^{4,7,9)} など、いくつかの測定がすでになされている。

4PP では、第 1 図 (a) に示すように、4 本の探針のうち 2 本から電流 I を試料に流し込み、このとき他の 2 本の探針で電圧降下 V を測定すると、4 端子プローブ法による抵抗値 $R = V/I$ が得られる (正確にはこれに形状因子を乗じる)。この



第 1 図 多探針 STM の利用。

(a) 4PP 法による表面電気伝導度の測定。 (b) 2 探針によるグリーン関数の測定。

方法では、2端子法と異なり、プローブと試料との間の接触抵抗の影響を排除でき、試料だけの電気抵抗を測定できる。このとき、4探針STMを使えば、第1図(a)右のように探針間隔をナノメートル程度まで縮小でき、微小領域の電気抵抗や結晶表面の1原子層の電気抵抗を測定することができる。また、4探針電極を正方形に並べることにより、結晶表面の伝導度の異方性を正確に測定できることも示されている^{10,11)}。4探針STM法は、表面電気伝導だけでなく、カーボンナノチューブ(Carbon Nanotube; CNT)やシリサイドナノワイヤなど個々のマイクロな構造体の電気伝導の測定にも適用され、ナノメートルスケールでの電子輸送物理の新しい局面が切り拓かれつつある^{12,13)}。

さらに第1図(b)に示すように、2本の探針を電子のコヒーレンス長以内に近づけて試料表面にトンネルコンタクトさせると、新しい計測が可能となる。通常の単一探針STMの場合(たとえば第1図(b)で探針1だけの場合)、トンネルコンダクタンス σ_1 はトンネル電流 I_1 をバイアス電圧 V_1 で微分した量であり、それはその探針の位置での局所状態密度 $\rho(r_1)$ 、つまり電子の波動関数 $\Psi(r_1)$ の絶対値の二乗に比例する；

$$\sigma_1 = \frac{\partial I_1}{\partial V_1} \propto \rho(r_1) = |\Psi(r_1)|^2 \quad (1)$$

これによって、波動関数の分布を実空間でマッピングすることができる。次に第1図(b)に示すように2本の探針が近くにあると、探針1に印加するバイアス電圧 V_1 を変化させたとき、波動関数の非局所性のために、探針2に流れるトンネル電流 I_2 がわずかに変化する。この I_2 の変化をTransconductance σ_{12} と呼び、それは2本の探針の位置 r_1 と r_2 に関する1粒子グリーン関数 $G(r_1, r_2; \varepsilon = eV_1)$ の絶対値の二乗に比例する¹⁴⁾；

$$\sigma_{12} = \frac{\partial I_2}{\partial V_1} \propto |G(r_1, r_2; \varepsilon = eV_1)|^2 \quad (2)$$

この「2探針STS(Scanning Tunneling Spectroscopy)法」によってひとたびグリーン関数が求まれば、電子バンド構造はもちろんのこと、電子系のような応答関数の情報も求めることができ、電子輸送特性やその他のダイナミクス特性についての究極的な測定となる。また、2探針ではなく4

探針を用いれば多粒子グリーン関数さえ測定でき、電子相関に関する情報も得られる。しかも、この測定は、電子のコヒーレンス長より探針を近づけて初めて可能となるものなので、必然的にナノメートルスケールの特性を測定することになり、ナノサイエンスでの極めて有力なツールとなることは間違いない。近い将来この「グリーン関数STM」が実現すれば、STMは単なる顕微鏡でなく、ユニークな物性測定装置としてますます重要性を増すものと期待している。

§2 4探針STMでの技術的課題

しかし、4探針STM法には2つの技術的問題点が未解決のまま残されている。4探針の制御装置および探針の問題である。従来は、4探針STMといっても通常の1探針STMのコントローラを4台独立に接続して動作させていたが、この状態ではこの手法の真価を発揮することはできず、完成度の低い段階と言わざるをえない。4探針のお互いの位置関係を認識しながら有機的に、かつ統一的に4探針を制御できるコントローラが切望されている。それは、また、4探針を1人のユーザーが操作できるようなユーザーフレンドリーなコントローラである必要がある。一方、探針の問題は、4つの探針をお互いにどこまで近づけられるか、という4探針STM法の最も重要な点に関わる。到達できる最小探針間隔は探針先端のマクロスコピックな曲率半径で制限され、エッチングした通常の金属探針の場合、せいぜい100~200 nm程度が限界である。ナノメートルスケールの領域での計測を行うには、これを1桁小さくする必要もある。また、探針間隔を10~20 nmまで近づけられれば電子のコヒーレンス長と同程度になり、上述したグリーン関数の直接測定など新たな計測が可能になる。そのために、極めて細くアスペクト比の高いCNT探針を採用する試みが行われている。しかし、CNT自体の電気伝導特性が測定結果に影響してしまい、有効な手段だとは考えられていなかった。しかし、最近、大阪大学グループによって、CNTを極薄金属層で被覆することに成功し、この金属被覆CNTがSTM

探針として有効に働くことが示されたので¹⁵⁾、4探針 STM への利用が有望になってきた。また、金属だけでなく、絶縁体や誘電体層、さらには強磁性体や超伝導体による CNT の被覆も可能であることが示されたので¹⁶⁾、それらを 4探針 STM に導入すれば多様な計測が可能となると期待できる。

さらに、試料および探針の温度が可変な 4探針 STM 装置が製作されつつある。もともと 4探針 STM には、4探針の位置決めのために走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope; SEM) が必要であるが、低温まで電気伝導測定するためには、それに加えて試料ステージ冷却機構を搭載しなければならない。しかし、SEM、冷却機構、および STM 機構は互いに矛盾する仕様が要求される。STM ユニットと試料は SEM 電子線に対して平行移動・傾斜(あるいは方位角回転)させる必要があり、なおかつ STM 探針に対して粗動機構によって試料の相対位置を変える必要がある。これらの移動機構のため試料ステージ付近が極めて複雑な構造となり、剛性が落ちて分解能低下を招く原因となる。また、STM の分解能を保証するには、STM ユニットおよび試料を剛性の高い構造にし、さらに SEM 本体から除振するほうが望ましい。しかし、そうすると、SEM 電子線と試料との間の剛性が劣化して SEM の分解能が低下してしまう。逆に、STM ユニットの剛性を高く固定してしまうと、STM の分解能が落ちる危険性が高くなる。また、STM スキャナーを試料表面に接近させて対向させたり、熱輻射シールドのため SEM 電子線の試料への入射角度や動作距離および 2 次電子検出器の試料から見込む角度などの制約がきつくなり、SEM 観察には必ずしも最適の条件とは言えない構造になる。冷却のためには、また、熱伝導が良くなるよう試料と冷却機構を硬く固定する。このような硬い接続は装置外部や冷媒タンクからの振動を試料・STM ユニット部にまで伝えてしまう。よって、SEM と STM を組み合わせた装置では、SEM の分解能が下がるために試料ステージだけの除震機構は使えないので、小さくて硬い STM ユニットを作るのが常套手段である。しかし、4探針 STM ユニットは、試料ステージ上の設置場所やサイズ

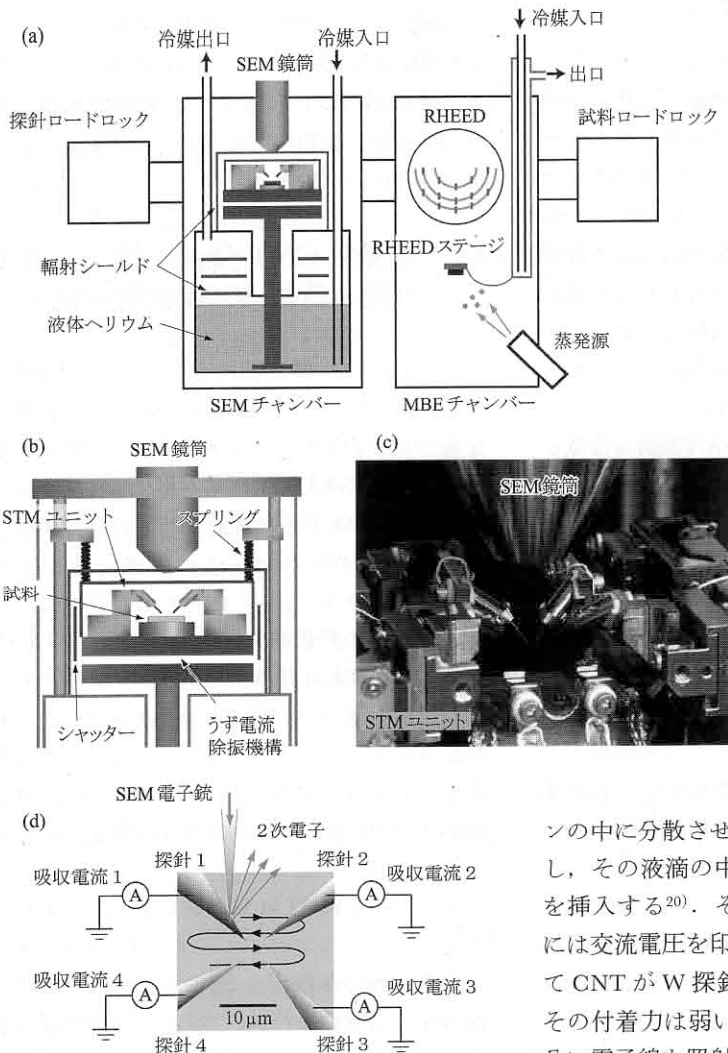
の制限のため、通常の 1 探針 STM よりもはるかに振動に弱い構造にならざるを得ない。このため、多探針 STM と SEM、冷却機構を組み合わせた装置は、振動に関して互いに矛盾した要求を満たさなければならない。

§3 被覆型 CNT 探針を備えた温度可変 4 探針 STM 装置の開発

われわれは、第 2 図に示すように、液体ヘリウム・クライオスタットの上部に、ばね除震機構を持った STM ステージを設置し、SEM 観察時や冷却時にはばね除震機構を無効にしてチャンパーおよび SEM 電子銃鏡筒と強固に固定することで熱接触・SEM の分解能を確保することとした。銅ロッドをクライオスタットの中央に配置し、寒剤との熱接触を確保している。STM/S 測定時には、ばね除震機構を有効にして外からの振動の伝達を絶つと同時にクライオスタットからの熱伝導も絶つ。これらの工夫により、温度範囲は室温から 7 K、SEM の分解能は 20 nm、原子分解能の STM を持つ超高真空 4 探針装置を開発することに成功した¹⁷⁾。

また、多探針 STM 用の統合型コントローラを開発した。このコントローラは 4 つの STM 探針を独立に同時制御できるだけでなく、SEM 電子線の走査の制御も行い、さらに、4 つの探針を組み合わせた 4PP 電気伝導測定、SEM 電子線による吸収電流像を利用した探針位置の自動認識・自動配置が可能であり、多探針 STM/S に必要な機能が 1 台のコントローラで実現されている。そのためには、モード切り替え可能な多機能プリアンプの開発が必要であった。それは、それぞれの探針へ独立にバイアス電圧を印加したり、電位を測定したり、それぞれの探針に流れる電流を測定することができる。それらの機能によって、探針独立のバイアス電圧による STM/S 測定、2, 3, 4 端子電気伝導測定、多探針 STS (グリーン関数) 測定モードをコントローラから切り替えることができる。

その電流測定モードを利用すると、SEM と組み合わせることによって各探針位置を自動認識で



第2図
温度可変型4探針STM装置¹⁷⁾.
(a) 装置全体の概略図.
(b) 試料ステージ近傍の模式図.
(c) 輻射シールドをはずした状態
での実物の写真.
(d) 吸収電流像による探針位置の
自動認識.

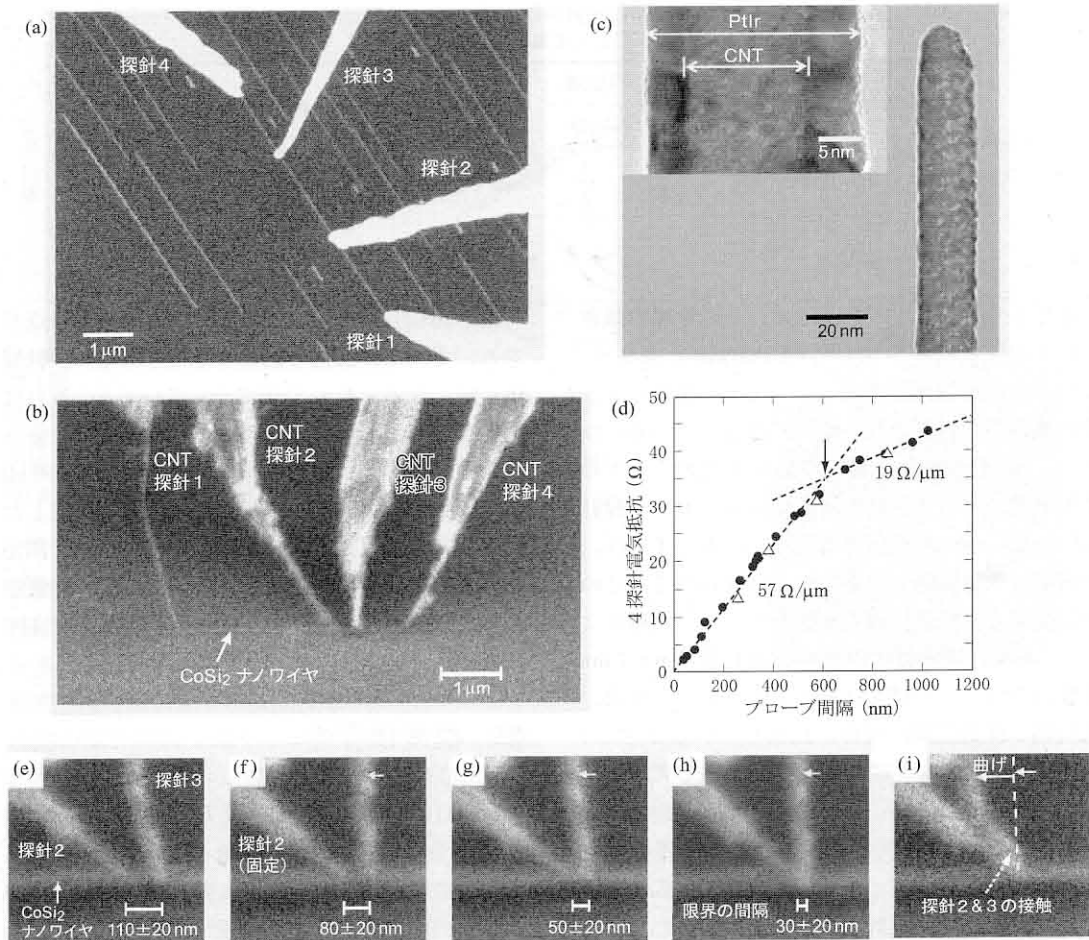
きる¹⁸⁾. 第2図(d)に示すように, 電子線を走査してSEM画像を取得している際, 各探針に流れる吸収電流を測定する. たとえば, 探針1を流れる吸収電流は, 電子線が探針1を照射しているときのみ多く流れ, 他の部分を照射しているときには流れない. よって, 探針1の吸収電流像を描くと探針1の領域のみが浮き出し, その先端を自動的に認識することができる. 同様に他の探針の位置およびその先端位置をコンピュータが自動認識できる.

金属被覆CNT探針は, 次のようなプロセスで製作して高い歩留まりを確保できた¹⁹⁾. 最初に, 超音波洗浄器を使って多層CNTをジクロロエタ

ンの中に分散させる. その液滴を金属板上にたらし, その液滴の中に電解研磨したW探針の先端を挿入する²⁰⁾. その際, W探針と金属板との間には交流電圧を印加しておく, 誘電泳動によってCNTがW探針の先端に付着する. しかし, その付着力は弱いので, 高真空SEM中で付着部分に電子線を照射して hidrocarbon を堆積させて強固に接着する. 接着力をさらに強固にするには, この状態で数百°Cの加熱を施すと有効である. しかし, この状態では, CNTとW探針との間の電氣的接続が必ずしも良好ではないので, 最後にパルスレーザー蒸着法を利用してCNTおよびW探針全体を数nm厚さの金属薄膜でコーティングする. これによって機械的に強固で導電性の良好なCNT探針となる.

§4 探針間隔依存性

第3図(a)は, Si(110)表面上に形成されたCoSi₂ナノワイヤの電気伝導度を4PP法で測定しているときのSEM像である²¹⁾. このときは電界



第3図 (a) W 探針²¹⁾, および (b)-(i) PtIr 被覆カーボンナノチューブ探針を用いた4探針 STM 装置による電気伝導測定中の SEM 像¹³⁾. (c) PtIr 薄膜で被覆した多層 CNT 探針の先端付近の透過電子顕微鏡写真¹⁶⁾. (d) 直径 90 nm 程度の CoSi₂ ナノワイヤの電気抵抗のプローブ間隔依存性¹³⁾. 探針間隔が 600 nm 程度の所で傾きが変わっているが、それはナノワイヤの太さがそこで変化しているためである.

研磨した W 探針を使用したので、探針間隔を数百 nm 以下に縮めることはできなかった。

第3図(c)は、PtIr 薄膜で被覆した多層 CNT 探針の先端付近の透過電子顕微鏡写真である¹⁶⁾。PtIr 層が厚さ 5 nm 程度で均一に CNT を被覆しており、全体で直径 20 nm 程度の探針になっていることがわかる。第3図(b)は、このような CNT 探針 4 本を使って、CoSi₂ ナノワイヤの電気伝導度を計測しているときの SEM 写真である。外側 2 本の探針から電流を試料に流し込み、内側 2 本

の探針の間の電圧降下を測定して 4PP 電気抵抗を求める。第3図(e)-(i)は、内側 2 本の探針を極限まで近づけているときの SEM 像である。図(h)が SEM 分解能の限界まで探針を近づけたときの図であり、探針間隔はおよそ 20~30 nm 程度と見積もられている。図(i)になると、2 本の探針が接触してしまい、両者の間の電圧降下はゼロとなってしまった。図(d)が、電圧探針の間隔を変化させながら室温で測った電気抵抗値であり、探針間隔が 600 nm から約 30 nm まで直線的

第1表 4PP 電気抵抗値 R の探針間隔 L 依存性は、測定試料の次元性や伝導メカニズムによって異なる。 L_0 は局在長。

伝導メカニズム	拡散(オーミック)伝導			1D 強局在	1D 弱局在	弾道伝導
	1D	2D	3D			
R の L -依存性	L	$\frac{L^0}{(\text{定数})}$	$\frac{1}{L}$	$\exp\left(\frac{L}{L_0}\right)$	$\frac{L}{L_0-L}$	$\frac{L^0}{(\text{ばらつく})}$

に変化していることがわかる¹³⁾。この直線の傾きから1次元抵抗率が $\rho_{1D} = 57 \pm 1 \Omega/\mu\text{m}$ と求まり、これは、高品質エピタキシャル CoSi_2 薄膜の3次元抵抗率から計算される値にほぼ合っている。つまり、図(d)は拡散伝導している1次元ワイヤの電気抵抗の長さ依存性を示している。もし、探針間隔が短い所で弾道伝導になっているとすれば、抵抗値は探針間隔に依存しないはずなので、この測定結果は、拡散伝導を意味している。文献によると、 CoSi_2 の室温での平均自由行程は6~7 nm程度なので、この結果はもっともらしい。また、抵抗値が探針間隔に線形に比例していることは1次元導体の測定をしていることを意味している。つまり、測定電流が下地 Si に漏れ出ていないことを意味している。なぜなら、下地 Si 基板に電流が漏れ出ていれば、電流は3次的に広がるので、その抵抗値は探針間隔の逆数に比例して変化するはずであるから²²⁾。ナノワイヤと Si 基板界面にショットキー障壁が形成され、そのために測定電流がワイヤから漏れ出ないのである²¹⁾。

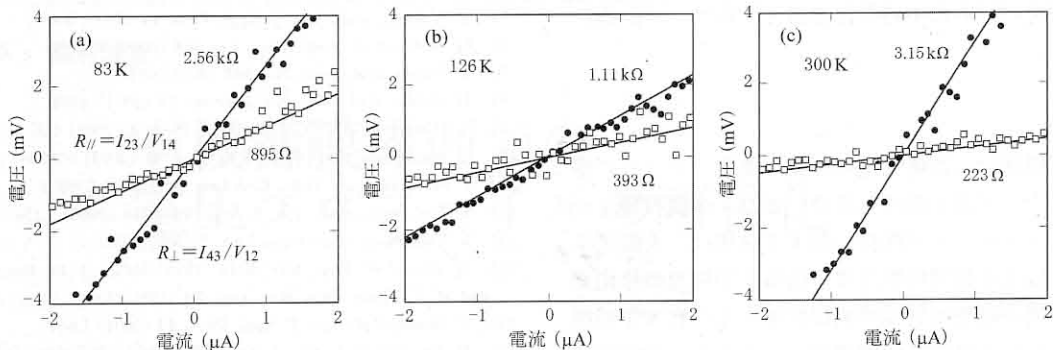
第1表に示すように、実は4PP抵抗値の探針間隔依存性から電気伝導の性質を判定することができる。今回の CoSi_2 ナノワイヤの測定では、オーム則に従う古典的な拡散伝導しか見えなかったが、液体ヘリウム温度にすれば、 CoSi_2 中のキャリアの平均自由行程が100 nm程度になるので、局在や弾道伝導などの量子伝導現象が見えると期待している。弾道伝導状態を4PP法で測定した場合、電圧降下を測定する探針自体が電子波動関数の散乱を引き起こすので、2本の電圧測定用探針での波動関数の透過確率によって見かけの抵抗値が変動する。その結果、抵抗の測定値は探針間隔に依存せずにランダムにばらつく(負の値にさえなりうる)^{23,24)}。

第3図(d)の結果についても一つ重要な点がある。それは、抵抗の値そのものである。探針間隔が短くなると数 Ω の値になっているが、これは4PP法でしか測定できない低い値である。というのは、この場合、探針と試料の接触点では50 k Ω 以上の接触抵抗があるので、2探針法で測定した場合、その接触抵抗と試料の抵抗値が直列で測定されてしまうので、試料そのものの抵抗は実質的に測定不可能となってしまふ。この意味で4PP法はナノメートルスケール計測に必須である。

§5 温度依存性

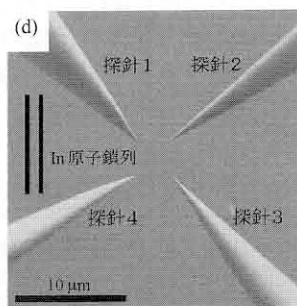
Si(111)- 4×1 -In 表面の異方的電気伝導度の温度依存性の測定を温度可変4探針STMで行った。この表面は、インジウム金属鎖列が一定間隔で特定の結晶方位に並んだ擬1次元金属的な表面として知られている。室温で、金属鎖方向に非常に高い電気伝導度を持ち、それに直角方向には2桁程度低い伝導度しか持たないことが知られている¹⁰⁾。また130 K程度以下に冷却するとパイエルズ転移を起こし、 $8 \times 2'$ 構造に転移し²⁵⁾、電気伝導度が劇的に下がるということがわかっているが²⁶⁾、その際、それぞれの方向の伝導度の変化はわかっていない。今回開発した4探針STM装置により、異方性の温度依存性が測定できる。試料として、Si(111)微斜面基板(1~10 $\Omega \cdot \text{cm}$, 1.8° off)上に 7×7 清浄表面構造を作った後、450°Cで1.05原子層のInを蒸着し、 4×1 超構造のシングルドメインを作成したものをを用いた。RHEEDにより 4×2 から $8 \times 2'$ 構造に転移することを確認した。

電気伝導測定は、4本の探針を一辺が約5 μm の正方形に並べた「正方4探針法」で行った。各



第4図

(a)-(c) 正方4探針法によるSi(111)-4×1-In表面の電気抵抗測定時の電流・電圧特性の温度依存性¹⁷⁾。黒点がIn原子鎖列に平行方向に電流を流した場合、白抜き四角がそれに直角方向に電流を流した場合。
 (d) 4探針(タングステン探針)のSEM像。



探針は、トンネル接触ではなく、探針を試料に直接接触させている。そのため接触点では試料表面をある程度破壊しているはずだが、SEM観察の範囲ではコンタクトの後は観察されず、ミクロン程度の探針間隔ではそのような構造破壊は問題にならない。Zピエゾの伸長量を接触抵抗により決定しているため、十分に優しくコンタクト(soft contact)を取っているものと考えている。

第4図は探針の配置を観察したSEM像(d)と、各温度において測定された電流電圧(I - V)特性である。 I - V 特性は、二本の探針 i, j 間に10~1000 mVの電圧をかけたときに流れる電流 I_{ij} と、その他の二本の探針 k, l 間の電圧 V_{kl} を測定した結果である。In原子鎖列は第4図(d)の試料表面上において探針1から探針4(または探針2から3)の方向に走っている。In原子鎖列に平行方向の電気抵抗 $R_{//}$ は $R_{//} = dI_{23}/dV_{14}$ で得られ(図中では白抜き四角)、In原子鎖列に垂直方向の電気抵抗 R_{\perp} は $R_{\perp} = dI_{43}/dV_{12}$ で得られる(黒丸)。

測定された抵抗値はどの温度でも異方性を示し、In原子鎖列平行方向の電気抵抗が常に低いことがわかる。しかし、温度によって異方性の度合い $R_{//}/R_{\perp}$ が変化していることもわかった。測定された抵抗値は、半導体基板、表面電荷層、および表面状態の伝導の総和であるので、この測定結果から直ちにIn原子鎖列の伝導度(表面状態伝導度)を得ることはできないが²⁷⁾、基板と表面電

荷層は等方的であるため、観測された異方性の由来は表面状態のみであるといえる。原子鎖列平行方向と垂直方向の伝導度の温度に対する依存性が異なることは、伝導メカニズムや伝導パスが方向によって異なることに起因している。バイエルス転移に起因する伝導度の変化は原子鎖に平行方向の伝導度の変化のみに関係し、それに垂直方向の伝導度の温度変化は他の要因によるが、その詳細な議論は誌面の制限から今回は割愛する。

§6 おわりに

4本の探針を電気的かつ機械的に自由自在に制御し、探針および試料の温度を液体ヘリウム温度まで可変にすることが可能な4探針STM装置を開発した。さらに、金属被覆カーボンナノチューブ探針の採用によって、探針間隔を20 nm程度まで近づけられるようになり、電子のコヒーレンス長以下に複数の探針でアクセスすることが可能となった。この装置によって、今までアクセスできなかった量子伝導の領域まで踏み込むことができる。表面およびナノ構造体の伝導物理の実験

的研究のために不可欠な装置となることは間違いない。

謝辞

本研究は、当研究室の多数の歴代メンバーの寄与によって成し遂げられた。また、金属被覆カーボンナノチューブ探針に関する成果は、大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻の片山光浩教授の研究室との共同研究である。日本学術振興会からの科学研究費補助金および科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発事業の補助を受けて株式会社ユニソクとの共同開発研究として遂行された。

〔参考文献〕

- 1) A. Bachtold, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 6082.
- 2) X. Lin, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 043103.
- 3) O. Guise, *et al.*: Rev. Sci. Instr. **76** (2005) 045107.
- 4) M. Ishikawa, M. Yoshimura, and K. Ueda: Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) 1502.
- 5) K. Takami, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L120.
- 6) O. Kubo, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 254101.
- 7) I. Shiraki, *et al.*: Surf. Sci. **493** (2001) 633.
- 8) H. Grube, *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **72** (2001) 4388.
- 9) S. Hasegawa, *et al.*: Current Appl. Phys. **2** (2002) 465.
- 10) T. Kanagawa, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 036805.
- 11) I. Matsuda, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 236801.
- 12) S. Yoshimoto, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L1563.
- 13) S. Yoshimoto, *et al.*: Nano Lett. **7** (2007) 956.
- 14) Q. Niu, *et al.*: Phys. Rev. B **51** (1995) 5502; J. M. Byers and M. E. Flatte: Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 306.
- 15) T. Ikuno, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) L644.
- 16) H. Konishi, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) 3690; M. Kishida, *et al.*: e-J. Surf. Sci. Nanotech. **3** (2005) 417.
- 17) R. Hobara, *et al.*: Rev. Sci. Instr. **78** (2007) 053705.
- 18) 保原 麗, ほか:「プローブ位置決め装置」(特許出願中).
- 19) H. Konishi, *et al.*: Rev. Sci. Instr. **78** (2007) 013703.
- 20) R. Hobara, *et al.*: e-J. Surf. Sci. Nanotech. **5** (2007) 94.
- 21) H. Okino, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 233108.
- 22) S. Hasegawa, *et al.*: Surf. Rev. Lett. **6** (2003) 963.
- 23) S. Datta: *Electronic Transport in Mesoscopic Systems* (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).
- 24) B. Gao, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 196802.
- 25) H. W. Yeom, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 4898.
- 26) T. Tanikawa, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 016801.
- 27) S. Hasegawa, *et al.*: Prog. Surf. Sci. **60** (1999) 89.

アグネ技術センター 発行

固体物理学概論

H.P. Myers 著, 永澤 耿 訳, A5判・並製函入・644頁, 定価 6,300円(本体 6,000円)

物理学, 物質科学および工学部の物理系の学部学生のために書かれた固体物理学の入門書として, この種の本では他に例を見ない実験物理学者により書かれたものである。豊富な図表を使い, 実験方法・装置についての説明も加えて, 現象や法則を具体的に理解できる工夫がなされている。

序論／第1章 物質と固体物理学の方法／第2章 結晶学／第3章 回折／第4章 結晶中の欠陥／第5章 格子振動／第6章 金属的挙動と自由電子気体／第7章 周期ポテンシャル／第8章 純金属の凝集／第9章 金属の物理的性質／第10章 半導体／第11章 磁性／第12章 誘電体／第13章 超伝導／第14章 表面物理学の概観／第15章 原子核と固体物理／問題の略解／物理定数と電子ボルト(eV)の換算表

金属物性基礎講座 第6巻 半導体と半金属

(社)日本金属学会 編, 井垣謙三 責任編集, A5判・上製函入・533頁, 定価 8,400円(本体 8,000円)

半導体と半金属を物性・材料の立場から見た本格的総合解説書。半導体の基礎的特性と現象を豊富な図をもとに, わかりやすく解説, 半金属, 化合物半導体, 照射効果, 強磁場の影響など広範な新分野を詳しく紹介する。膨大な引用文献, 多数の付図, 充実した索引と相俟って, 半導体の研究・開発のバイブル的利用価値を持つ。

1. 電子と正孔(大塚穎三)／2. キャリヤーの輸送(大塚穎三)／3. 光学的性質(大塚穎三)／4. 発光とエクシトン(大塚穎三)／5. 接合(大塚穎三)／6. 界面現象(川路紳治)／7.1 ビスマス—半金属の典型として(鈴木満)／7.2 グラファイト—もう一つの典型半金属(田沼静一)／8. 化合物半導体(井垣謙三)／9. 半導体の照射効果(斉藤晴男・福岡登)／10. 強磁場下におけるインジウム・アンチモナイド(大塚穎三)