

## 論文内容の要旨

論文題目 Electronic transport through atomic wires and nanowires self-assembled on silicon surfaces

(シリコン表面上に自己組織的に作製されたアトミックワイヤーとナノワイヤーの電子輸送)

氏名 沖野 泰之

本研究ではシリコン表面上に自己組織的に作製されたアトミックワイヤーとナノワイヤーの電気伝導特性を調べた。一次元では電荷密度波転移、あるいはスピンと電荷の分離などの物理現象が予想される。しかしながら、純粋な一次元の物質をつくることは困難で現実には擬一次元の物質を一次元系研究の実験に用いている。さらに、その物質は完全な結晶ではなく必ず不純物を含んでしまう。本研究では微傾斜したシリコン表面上に幅が数原子サイズのアトミックワイヤー列を作製して不純物の影響を調べた。一次元の物質は物理にとってだけでなく、工業応用にとっても重要であり、実際にデバイスサイズを小さくしていくためにナノワイヤーの研究が世界的に進められている。そこで我々は孤立した幅数十 nm のナノワイヤーもシリコン表面上に作製して電気特性の評価をおこなった。アトミックワイヤーとナノワイヤーの共通点としては作製に自己組織化を利用することがあげられる。自己組織化はコストと時間という現代テクノロジーにおける問題点を解決する可能性を秘めている技術である。将来的にはナノワイヤーの幅が原子オーダーまで小さくなって、アトミックワイヤーと同列に扱われるべきだが、本研究では別々の互いに独立した研究として扱っている。

伝導測定の実験はミクロスケールのマルチプローブ法を用いて4端子測定によっておこなった。プローブの間隔を数十  $\mu\text{m}$  まで狭めることで表面近傍の領域を効果的に測定することができる。アトミックワイヤーはシリコン結晶の表面上1原子層の厚さしかないので、電気伝導を測定するために電流を流すと測定電流が結晶内部にまで流れてしまう。そこで

電流プローブの間隔を狭めることで測定電流の深さ方向への侵入深さを短くしている。また、アトミックワイヤー作製の過程でシリコン表面上に金、インジウムを蒸着すると電荷の偏りによって表面近傍のバンドが湾曲し、空乏層が形成される。この空乏層によってキャリアが表面近傍に閉じ込められ、測定電流の侵入深さはさらに短くなる。このようにしてアトミックワイヤー列の伝導度を測定することができた。ナノワイヤーの電気特性の測定は走査電子顕微鏡でナノワイヤーと測定プローブを観察しながら超高真空中で直接コンタクトさせることによりおこなった。

アトミックワイヤーの研究では電気伝導度の温度依存性と異方性を測定することで、不純物が伝導に与える影響を調べた。試料としては Si(557)-Au、Si(553)-Au、Si(111)4×1-In を用いた。Si(557)-Au と Si(553)-Au は微傾斜したシリコン表面に金原子を加熱蒸着することで作製されるアトミックワイヤー列で、各アトミックワイヤーは互いに単原子ステップで隔てられている。一方、Si(111)4×1-In は平坦な表面にできるアトミックワイヤー列であるが、基板の対称性を減らして一方向に成長させるためにわずかに傾斜した基板を用いた。電子構造は3種類とも報告されており、ワイヤーに平行な方向にはパラボリックな分散を示す。一方、ワイヤーに垂直な方向には分散がほとんどなく、一次元的な電子構造を持っているので、3つの表面とも一次元金属に特有の電荷密度波を伴った金属絶縁体転移を示すことが低温における実験から示唆されている。

電気伝導の測定をおこなったところ、Si(557)-Au と Si(553)-Au は原子構造が似ているにも関わらず、電気伝導度の温度依存性は全く異なっていた。図1にその様子を示す。Si(557)-Au は熱活性型の半導体的な伝導を示したのに対して Si(553)-Au は金属絶縁体転移の振る舞いを示した。Si(557)-Au は本質的にその表面上に多くの不純物を持つ。その不純物はアトミックワイヤーを分断して伝導パスを切る。その結果、電子が局在して熱活性型の振る舞いになると推測される。実際に活性化エネルギーを求めると、不純物で挟まれた領域のチャージングエネルギーと同じオーダーであり、我々の推論をサポートする。一方、Si(553)-Au は Si(557)-Au ほど不純物が多くないので電子を局在させることがなく、電子構造に起因する金属絶縁体転移が起こるのだと結論づけられる。局在の有無には不純物の量以外に電子のワイヤー間の飛び移りやすさも関係しており、Si(557)-Au 表面上では電子がワイヤー間を移動しにくく、局在しやすいことがわかっている。ワイヤー平行方向の伝導パスを切るという不純物の効果は Si(111)4×1-In 表面上に不純物を意図的に添加することによって実証された。不純物の量を増やしていくと電気伝導度の異方性は1に向かって減少していった。その上、Si(111)4×1-In の金属絶縁体転移温度が不純物の量とともに上がっていった。これは不純物によるピン止め効果でゆらぎの影響が減ったためだと考えられる。

ナノワイヤーの研究では室温における抵抗率をその場測定と大気暴露後の測定によって評

価してナノデバイスへの応用の可能性を調べた。試料にはコバルトシリサイドと鉄シリサイドナノワイヤーを用いた。超高真空中で加熱した Si(110)基板にコバルト、鉄を蒸着するとシリサイドを形成しながらナノワイヤーが成長する。基板に対称性の低い(110)面を用いているので、ナノワイヤーの成長方向は一方向のみに限定される。シリサイドを用いたのは高温での安定性、シリコンテクノロジーとの互換性を考えてのことである。コバルトシリサイドは抵抗が低いことが知られており、一方、鉄シリサイドは様々な相を持つことがわかっている。相は金属であり、相は光通信で用いられている波長と同程度のバンドギャップを持つ半導体で光学応用が期待されている。

電気特性を調べると、両者とも基板のシリコンとは電氣的に良く絶縁されていた。これは界面に形成されたショットキーバリアがキャリアをナノワイヤーの内部に閉じ込めているためである。接触抵抗の影響をなくすため、図2のように同一ナノワイヤー上で4端子測定を行なったところ、幅60nmのコバルトシリサイドナノワイヤーの抵抗率は $30\ \mu\ \text{cm}$ で伝導性の良い金属と同程度の値を示した。一方、幅90nmの鉄シリサイドナノワイヤーの抵抗率は $410\ \mu\ \text{cm}$ で金属と半導体の中間程度の値であった。コバルトシリサイドナノワイヤーは大気暴露後も抵抗率がほとんど変わらず、ナノデバイスで配線として用いることが可能であることがわかった。大気暴露で抵抗率が変化しないのは、大気暴露によってナノワイヤーの表面は酸化されてしまうが、その酸化膜が保護膜となって内部の酸化を防いだものと考えられる。また、このことは幅60nmでは室温においてサイズ効果が現れないことを示している。鉄シリサイドは抵抗率が高いので配線としての利用が見込めないが、アニールして相に相転移させることでトランジスタや光学デバイスへの応用が考えられる。

本研究では一次元系のテンプレートとして幅1~2nmのアトミックワイヤー列と幅60~90nmのナノワイヤーを自己組織的に作製し、電気伝導の面から研究をおこなった。アトミックワイヤーの電気伝導には原子サイズの不純物が大きく影響を与え、電子構造とは矛盾する振る舞いも見られた。このことから、ナノスケールでの不均一性を調べることが重要であることがわかった。一方、ナノワイヤーの電気特性を評価してナノデバイスへの応用可能性を探ることもおこなった。本研究はナノ構造体の伝導特性を調べるのにミクロスケールのマルチプローブ法が有効であることを示した。このことは原子分解能を持った電気伝導測定の実現可能性を示した。

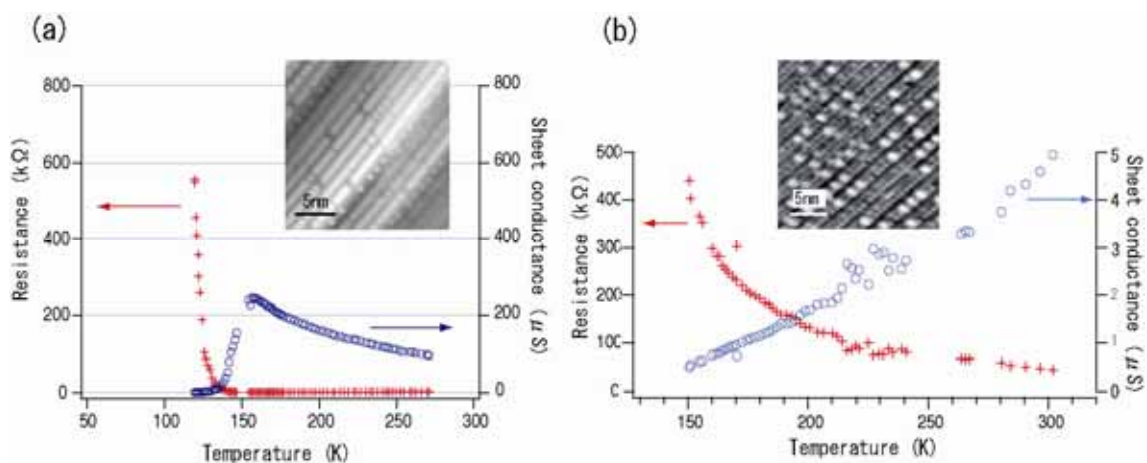


図1 . (a) Si(553)-Au と(b) Si(557)-Au の表面状態電気伝導度、抵抗値の温度依存性。挿入図は走査トンネル顕微鏡像。

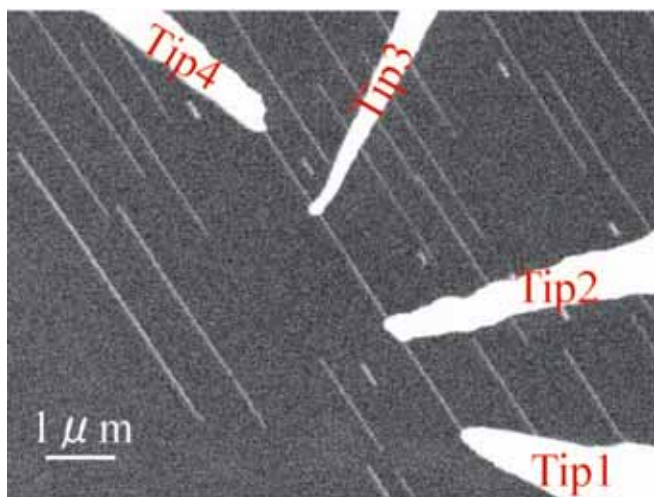


図2 . 幅60nmのコバルトシリサイドナノワイヤーの走査電子顕微鏡像。超高真空中で4端子測定をしている様子。