

# 同位体シリコン単結晶ナノワイヤーの大量合成に成功

量子コンピュータ、高速マイクロプロセッサ素子への道を拓く

平成13年12月 6日

独立行政法人 物質・材料研究機構

## 1. 概要

独立行政法人 物質・材料研究機構 ナノマテリアル研究所 ナノファブ리케이션研究グループ：野田哲二主幹研究員らは、同位体シリコン<sup>\*1</sup>単結晶ナノワイヤーを容易にかつ高速で合成する方法を発見した。シリコンナノワイヤーの合成は、従来、シリコン基板上に微細なパターン状の鉄や金を蒸着させ、その上に成長させる方法で行われていた。今回、Si-28濃度が99.9%の同位体濃縮シリコン粉末を浮遊帯域溶融<sup>\*2</sup>することにより、直径5~数十ナノメートルで長さが3ミリメートル以上のシリコン単結晶ナノワイヤーが3mg/hの高収量で生成されることを発見した。

この同位体単結晶シリコンは、自然界のシリコンに比べて高い熱伝導性を有しているため、動作速度10GHz以上の超高速マイクロプロセッサ用に有力な材料として考えられる。また、Si-28は核スピン<sup>\*3</sup>を持たないことから、量子コンピュータ<sup>\*4</sup>素子としても期待され、高性能素子の実現に向けて大きく貢献するものと考えられる。

## 2. 経緯

当機構では、従来より、高純度の同位体シリコン分離・材料化技術開発を進めてきた。同位体濃度が95%以上のシリコンは、自然同位体組成(Si-28:92.23%, Si-29:4.67%, Si-30:3.1%)に比べて高い熱伝導性を有する故に熱除去を容易にするため、高集積化された高速マイクロチップ材料として期待されている。また、Si-28のみで構成されるシリコンは、安定かつ均一な構造を有するため、従来の白金・イリジウム合金に代わるキログラム原器<sup>\*5</sup>としても期待されている。このため、当機構では、レーザ法によりSi-28の濃縮とキログラムレベルの量を目指す材料化技術開発を進めており、今までに、500グラムを超えるSi-28濃縮フッ化ガスを合成している。このフッ化ガスをすべてシリコン粉末に変換し、さらに単結晶棒に成長させる作業を行ってきた。同位体シリコン単結晶作製には、不純物の混入がなく、高純度の単結晶が得られる浮遊帯域溶融法が最も優れているため、同位体シリコン粉末を棒状に固めたものを帯域溶融装置により溶融結晶成長させ、シリコン鑄塊を作製した。その際、溶融部より上方部に黄色の綿状の物質が大量に生成した。生成された綿状の物質を電子顕微鏡で観察した結果、ナノワイヤーの集合体であることが分かった(図1)。さらに、高分解能顕微鏡で観察した結果、ナノワイヤーの大きさは、直径が5-50nm、長さが0.1μm-3mmであった。電子線回折による同定を行ったところ、シリコンの単結晶であることがわかった(図2)。なお、市販の高純度のシリコン粉末を固めて浮遊帯域溶融したものでは、このようなナノワイヤー生成は起こらなかった。

本方法による粉末では、同位体濃縮したフッ化シリコンガスを金属シリコンに変換する過程で数%のSiF<sub>2</sub>のようなフッ化物ならびにSiOのような酸化物が残存しており、このような非金属不純物がナノワイヤー生成に大きな役割を演じたものと考えられる。SiF<sub>2</sub>あるいはSiOは高温では気体として分解しやすいため、いったん蒸発したシリコンが、低温部でナノワイヤー状に析出したものと考えられる。

浮遊帯域溶融法は、単結晶金属、半導体を作製するのに一般的に用いられている方法であるため、今回の発見は、同位体に限定されず、単にシリコンナノワイヤーの合成法

としても大量生産の可能性を明らかにしたものである。

### 3 . 今後の展望

本研究によって、浮遊帯域溶融法という一般的な溶解方法により、同位体濃縮シリコンナノワイヤーが容易にかつ大量にできる方法を明らかにした。本実験では6mm直径のシリコン棒を溶解したが、さらに大口径試料を用いることによって、ナノワイヤーの収量を上げることができる。また、現在までのところ、ナノワイヤーのサイズは、5-50nmのばらつきがあるため、今後、溶融部分の移動速度、反応容器内に流す不活性ガスの流量制御などにより、ナノワイヤーのサイズの均一化を図る。また、同位体シリコンナノワイヤーの優れた熱伝導性を検証するとともに、核磁気特性を調べ量子コンピュータ素子としての可能性を明らかにする予定である。

#### <用語解説>

##### \* 1 同位体シリコン

自然界のシリコンは、Si-28, Si-29, Si-30 からなる。このうち偶数のSi-28とSi-30は核スピンを持たないため、Si-28あるいはSi-30のみからなるシリコンは核スピンを利用した量子コンピュータ素子材料として考えられている。また、Si-28は、熱伝導度が自然のシリコンに比べて40%以上も高いといわれており、熱除去が容易になるため、デバイスのサイズが小さくなり、高速スイッチ化(現在のペンティアムプロセッサでクロック数が最高1.5GHzまで来ているが、10GHz以上に対応できる)が可能といわれている。

##### \* 2 浮遊帯域溶融法

高純度単結晶シリコンなどの作製方法のひとつ。ランプの集光加熱により棒状に固めた試料のある部分を溶融し、試料の上下移動とともに溶融部が移動することによって、試料の精製がなされ、また種結晶上に単結晶を成長させることができる。るつぼを使わないため、試料外部からの汚染がなく、高純度化が図れる。

##### \* 3 核スピン

原子核のエネルギー準位のこと。原子番号、質量とも偶数の同位体では核スピンは0(ゼロ)。Si-29は1/2のスピンのもつ。核スピンを利用した現象として核磁気共鳴があり、医学診断などに使われている。

##### \* 4 量子コンピュータ

量子状態をビットとして扱くと、N個の量子状態(Nキュービット)で $2^N$ のサイズの演算空間となり、大規模な並列計算が可能となる。核スピンを利用したものは半導体核スピン量子計算機と呼ばれる。Si-28基板に核スピンを持つP-31を約20nm間隔で埋め込むと、それぞれが1キュービットとなる。

##### \* 5 キログラム原器

Pt-Ir合金からなるものでフランスに保管されている。そのコピーが各国にある。日本には2基。環境条件により数 $\mu$ gで変動するといわれている。

( 問い合わせ先 )

独立行政法人 物質・材料研究機構

総務部総務課広報係 TEL : 0298-59-2026

( 研究内容に関すること )

独立行政法人 物質・材料研究機構

ナノマテリアル研究所 ナノファブリケーション研究グループ

主幹研究員 野田 哲二 TEL : 0298-59-5028 , noda.tetsuji@nims.go.jp

主任研究員 鈴木 裕 TEL : 0298-59-2847, suzuki.hiroshi@nims.go.jp

科学技術特別研究員 胡全利 TEL : 0298-59-2846, hu.quanli@nims.go.jp

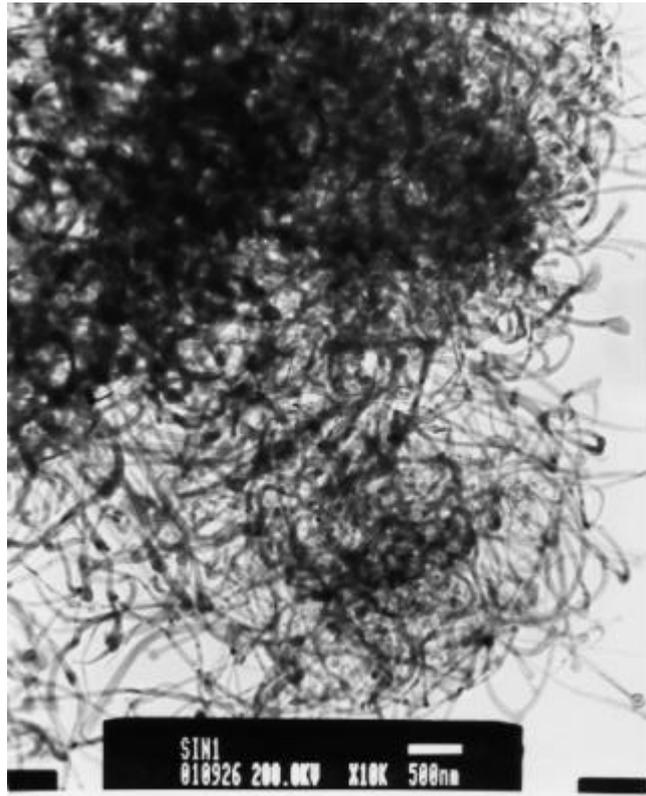
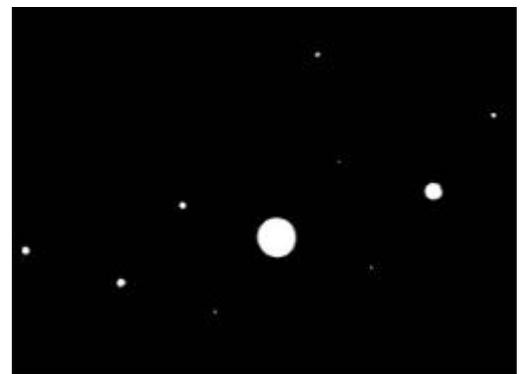


図1 綿状の Si-28 同位体シリコン単結晶ナノワイヤー



Si(110)の回折写真

図2 同位体シリコン単結晶ナノワイヤーの電子顕微鏡写真と電子線回折結果