

## 審査の結果の要旨

氏名 代 俊

ナノ電気機械システム（以下、NEMS）は力、質量、磁気などの物理量の検出に有効な手段の一つとして期待されている。最近では、その構造の微小化に加えて、連成構造や3次元構造のように構造の工夫が性能向上や多機能化の鍵となっている。しかしながら、NEMSの線形特性を利用したこれら物理量の極微量検出では、その性能が量子限界に近づきつつあることが一つの課題となっている。極微量検出において、超伝導材料の電気抵抗が特定の温度で急激にゼロに近づく現象や超伝導体内部における磁束の量子化現象など、非線形特性の活用は、例えば単一光子検出で示されているように、極めて有効な手段の一つである。そこで、NEMSの構成材料の一部に超伝導材料が利用できれば、物理量の極微量検出の感度や精度の飛躍的向上が期待できる。そのためには、超伝導材料と非超伝導材料を適宜組み合わせることができ、かつ、3次元構造創成へ展開可能なナノデバイス作製法の開発が課題となる。

本研究は、上記課題を解決すべく、超伝導特性を有する3次元ナノメカニカルセンシングデバイス作製を念頭に、集束イオンビーム化学気相成長法（以下、FIB-CVD）を利用した超伝導ナノデバイスの直接作製法を提案するものである。具体的には、超伝導特性を有する材料合成が可能であり、かつ、構造創成手段として高い材料堆積レートを実現する生成ガスを選定し、超伝導特性の評価を実施している。そして、この作製法を利用した超伝導ナノデバイスの作製としてSNS ジョセフソン接合デバイスを取り上げ、その作製と性能評価を実施し、提案した作製法の有効性を示している。

まず、 $C_{14}H_{10}$  と  $W(CO)_6$  の2種を生成ガスとして選定し、生成ガス温度で制御されるガス混合比とFIBのビーム電流を制御パラメータとしてW-C材料の超伝導特性を評価している。その結果、2種のガスの混合比およびビーム電流値の組み合わせが、超伝導特性を呈するかどうかの重要なファクタとなっていることを明らかにしている。そして、その組み合わせを好適に設定することによって、絶縁材料、導体材料、半導体材料、超伝導材料のそれぞれを自在に合成できることを実験的に示している。この方法で得られた超伝導材料の臨界温度は、ビーム電流 6pA、 $C_{14}H_{10}$  と  $W(CO)_6$  の生成ガス温度  $70^{\circ}C$  において 2.8K、 $C_{14}H_{10}$  の生成ガス温度を  $60^{\circ}C$  として 5.8K であった。また、従来報告された  $W(CO)_6$  の単一ガスで得られる超伝導ナノワイヤの堆積レート  $0.8 \mu m/min$  に

比べて、本研究が混合ガスで得た超伝導ナノワイヤの堆積レートは  $3.4 \mu\text{m}/\text{min}$  であり、4.25 倍の高い堆積レートを実証している。

次に、提案した超伝導ナノ構造作製手法で得られる W-C 材料はアモルファスであることを計測結果によって示し、この事実に基づいて、その超伝導特性発生メカニズムをアモルファス材料が有する結晶の無秩序性の観点から説明を加えている。BCS 理論が提供する臨界温度  $T_c$  の式を中心に据えて、実験データをこの理論と照らし合わせることによって、得られた W-C 材料の結晶無秩序性が支配的となっている可能性を示唆している。

最後に、提案した超伝導ナノ構造作製手法を利用して SNS ジョセフソン接合デバイスを作製している。具体的には、混合ガス比と FIB のビーム電流を変えることに超伝導ナノワイヤと金属ナノワイヤとで構成される SNS ジョセフソン接合ナノデバイスを作製している。印加磁場を  $\pm 0.8\text{T}$  の範囲で変化させて V-I カーブを計測した結果、超伝導特性の一つであるフラウンホーファー振動を確認し、温度  $2.5\text{K}$  における W-C ナノワイヤのコヒーレンス長は  $270\text{nm}$  と評価している。これらの実験結果によって提案した手法が超伝導ナノデバイスを作製する技術として有効であることを実証している。

提案された超伝導ナノデバイスの直接作製法は、ビーム電流や生成ガスの混合比を変える以外は同じプロセスで絶縁材料、導体材料、半導体材料、超伝導材料の構造を創成できることに大きな特徴があり、それを実証したことは大きな成果である。構造創成の観点からは、FIB-CVD 技術をベースにしており、マスク作製工程や薄膜形成工程を経ずに 3 次元ナノ構造作製が可能であり、その作製レートを従来技術に対して大きく高めたことも重要な成果である。本研究の成果は、超伝導特性をもつ 3 次元ナノメカニカルセンシングデバイスの作製技術展開を大きく前進させるものであり、特に極低温物理学の分野や量子情報技術の分野に対して、高感度ナノセンシングデバイスを提供する作製技術として大きな寄与が期待できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。