

超電導膜の大電流化のための柱状欠陥導入とその生成機構

背景

高温超電導材料は、磁場中では内部に量子化した磁束を侵入させて超電導状態を保持する。この超電導材料に電気抵抗ゼロで電流を流すには、電流によりローレンツ力を受けた磁束の動きを止める必要があり、磁束が安定に存在できる nm レベルの結晶欠陥等の常電導部分（ピンニングセンター）を導入しなければならない。パルスレーザー蒸着法*1により作製したREBa₂Cu₃O_y超電導膜*2において、BaZrO₃等の不純物を原料に混ぜると膜内部に自己組織化した直径数nmレベルの細い柱状の不純物ナノロッドが生成し、それがピンニングセンターとして有効であることが見出されている。より大きな電流を流すためには、ナノロッドの形状・分布を最適化する必要があるが、その生成機構は解明されていない。

目的

作製条件とナノロッドの微細構造の関係を明らかにし、ナノロッド生成の機構解明に資する。

主な成果

1. ナノロッド構造の不純物添加量・材料依存性

ナノロッドのピンニングセンターとしての概念図を図1に示す。不純物添加量を1wt%から12wt%まで変化させた場合、全ての添加量でナノロッドが生成した。この添加量領域では、図2に示すようにナノロッド径は約10nmでほぼ同じであり、添加量の増加に対してナノロッドの数密度が増加することがわかった。高添加量の約10wt%において、図3に示すように不純物が凝縮せず、最密充填構造になる三角格子状にナノロッド構造を作ることを確認した。さらに、格子定数が僅かに異なるBaZrO₃とBaSnO₃では、ナノロッド径が変化した。作製温度等の条件が同じ場合、ナノロッド径は添加量に依存せず、材料によって決まることから、界面エネルギーがナノロッドの生成に影響することが示唆された。

2. ナノロッド生成と歪場

膜厚が1 μmの超電導膜において、図4に示す特徴的な平面透過電子顕微鏡像が得られた。この像は、ナノロッドが膜中で曲がった状態を上から見ており、曲がったナノロッドはランダムに分布せず、ひとつの線上に配列した。つまり、ナノロッドは下地にナノロッドが存在する部分で選択的に成長した。半導体のナノドットの積層構造において、積層したナノドットが結晶歪みの影響により厚さ方向に配列するという結果から類推すると、超電導膜内のナノロッドにおいても結晶歪みがナノロッドの生成位置に影響することが示唆された。

本研究は、九州工業大学、名古屋大学、九州大学、東京大学、静岡大学、首都大学東京と共同で、(独)科学技術振興機構からの受託研究として実施し、(社)未踏科学協会より超伝導科学技術賞を受賞した。

今後の展開

ナノロッドの形状・分布を制御するための作製条件のパラメーターが把握できた。現在、高温超電導テープ線材へのナノロッドの適用が始まっており、近い将来、磁場中で大電流を流せる高温超電導テープ線材の開発と超電導機器への適用が期待される。

主担当者 電力技術研究所 電力応用領域 上席研究員 一瀬 中

関連論文 “Microstructures of REBa₂Cu₃O_y adding BaZrO₃ or BaSnO₃”, Physica C 468, p.1627, 2008年9月

*1：高性能超電導テープ線材を作製する方法の一つ。パルスレーザーをターゲットに照射し、ターゲット原料を基板上に堆積させる。

*2：REBa₂Cu₃O_y超電導膜、REは希土類元素で、主にY（イットリウム）が用いられる。

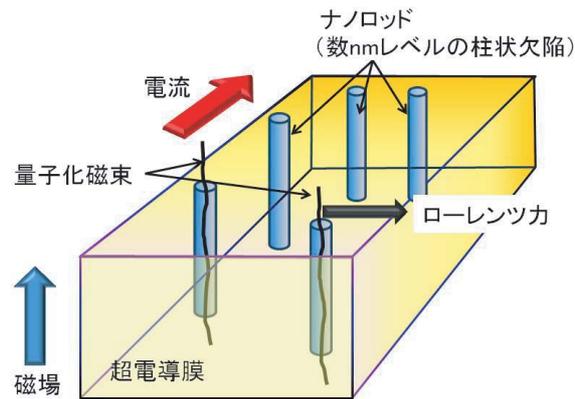
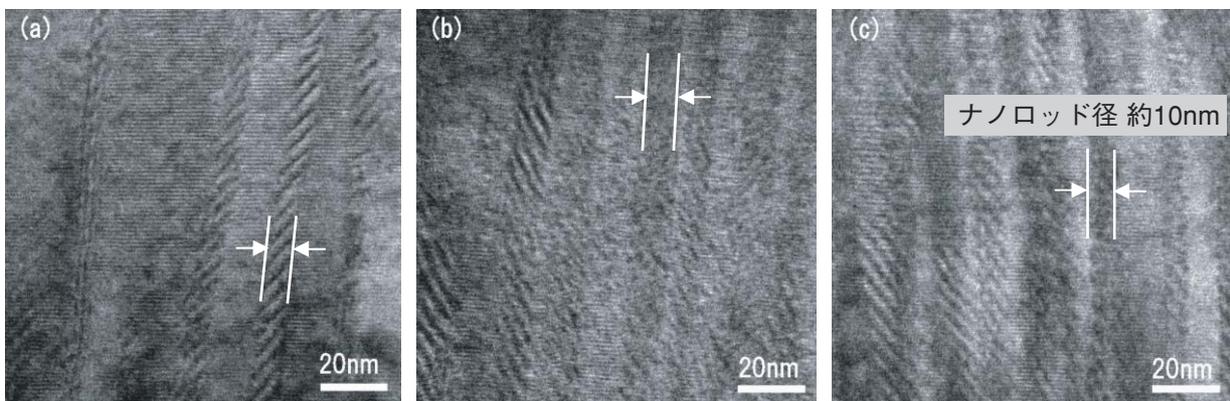


図1 ピンニングセンターとして機能するナノロッド（常電導の数nmレベルの柱状欠陥）の概念図



添加量:4wt%

添加量:6wt%

添加量:12wt%

図2 BaZrO₃添加量を変えたYBa₂Cu₃O₇超電導膜の断面透過電子顕微鏡写真

上下方向に伸びた斜め縞・縦縞の部分ナノロッドである。添加量を変えてもナノロッド径は変化せず、数密度が増すことがわかる。

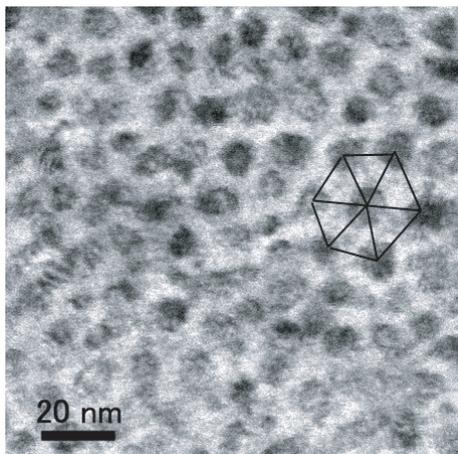


図3 約10wt%のBaZrO₃を添加したYBa₂Cu₃O₇超電導膜の平面透過電子顕微鏡像

ナノロッドの伸びた方向から観察し、各々の濃い円形の部分が一本のナノロッドである。図中に示したように、ナノロッドは三角格子を形成し、各ナノロッドに1本の量子化した磁束が止められる。

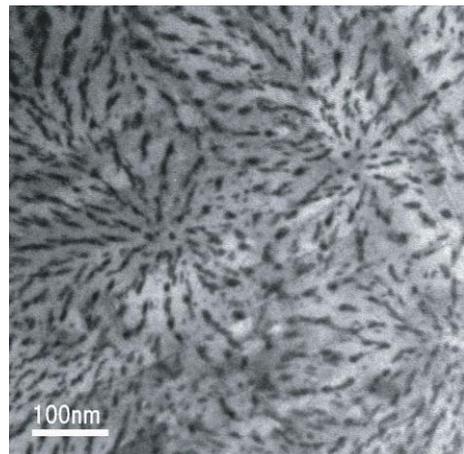


図4 BaZrO₃を添加したYBa₂Cu₃O₇超電導膜の特徴的な平面透過電子顕微鏡像

図3と同様にナノロッドの伸びた方向から観察した。点状のナノロッドを中心にして、いくつもの楕円状の点が重なり、一本の軌跡を描く。ひとつの軌跡の広がり約400nmである。広がりの中心の点状部分はナノロッドがまっすぐ成長し、周りの部分はナノロッドが曲がって成長していることを意味する。