

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 荻窪光慈

酸化物高温超伝導体はその臨界温度の高さから、次世代の超伝導材料としての期待が持たれているが、実用化のためには使用温度における臨界電流密度の向上が重要な課題である。酸化物高温超伝導体内にピンニングセンターを導入し臨界電流密度などの超伝導特性を向上させるための手法として、高エネルギー重イオン照射や高速中性子照射などの量子ビーム照射による欠陥導入が非常に有力な手法として知られている。この手法は、不純物元素ドーピングや非超伝導相析出などの他の方法と比べて、試料作製過程とは独立に行えるため材料の種類による制約が小さいこと、また、照射量・照射種・エネルギーなどの照射条件の選択により照射欠陥のサイズや密度を容易に調整できること、などの利点を持つ。本論文は、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (Bi-2212)単結晶に対して、高エネルギー重イオン照射並びに高速中性子照射と照射後熱アニール処理を行い、その際の臨界電流密度 J_c ・ピンニングポテンシャルなどの超伝導特性の変化を調べるとともに、それらの結果をもとに、量子ビーム照射と熱アニールによる欠陥形状制御のメカニズムや、試料内部の欠陥構造と磁束ピンニングメカニズムとの関連を明らかにすることを目的として行った研究成果をとりまとめたものであり、全体は6章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章は、本研究で用いた実験方法について述べており、試料の作成方法、臨界電流密度やピンニングポテンシャルの測定手法について解説している。

第3章では、高エネルギー重イオン照射実験の結果について述べると共に、その結果についての考察を行っている。180~510 MeV の Cu, Kr, Xe, Ag, Au 等の高エネルギー重イオンを $1 \times 10^{10} \sim 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスで Bi-2212 単結晶試料に照射したときの臨界電流密度と不可逆磁場のフルエンス依存性を測定したところ、Au, Ag 及び Xe イオン照射と Kr 及び Cu イオン照射とでは、 J_c のフルエンス依存性が異なり、前者では、 J_c が極大値を取るフルエンス(以下、最適フルエンス)が $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 近傍であったが、後者では上記のフルエンス範囲において、 J_c とフルエンスは単調増加関係にあった。この J_c のフルエンス依存性の相違は、各照射イオン種により形成される円柱状欠陥のサイズの相違に起因し、前者では比較的大きな径の円柱状欠陥が形成されていると考えられるが、後者では、形成される円柱状欠陥の径が小さいと考えられ、高フルエンス照射時の円柱状欠陥の重なり程度の相違にその差違を求めることにより説明を行っている。

第4章では、200MeV Au, 200MeV Ag 並びに 510MeV Kr イオンで照射した各試料

における、アニールによる J_c 変化の時間依存性についての検討を行っている。アニール温度が 673K の場合、アニール時間の増加に伴う顕著な J_c の変化は観測されなかった。これは、円柱状欠陥を構成する原子の多くが、673K 程度の温度で安定であるためと考えられる。また、アニール温度が 1073K の場合では、1h のアニールで J_c が未照射試料程度まで低下したが、これは、1073K というアニール温度が Bi-2212 の融点(1193K)の 0.9 倍程度の高温のため、欠陥が未照射試料と同程度まで回復したためであると考察している。

第 5 章では、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ という高速中性子過剰フルエンス照射済試料に対する J_c のアニールによる変化を測定している。この場合にも、 J_c の回復挙動はアニール温度により異なり、アニール温度が 673K の場合に J_c は未照射試料の値を超えて増加するが、873K のアニール温度では、 J_c は 1h のアニールで極大値に達し、その後減少した。アニール温度によって J_c の回復挙動が異なることは、欠陥を形成する Bi-2212 各構成原子種の移動挙動が、アニール温度によって異なることを示唆するとしている。すなわち 673K 程度の比較的低いアニール温度では、欠陥の回復が比較的緩やかであり、近接する欠陥クラスター同士がよりピンニングに適したサイズの複合欠陥を形成すると考えられ、そのため J_c はアニールによって増加したと考えられる。この場合には、Bi-2212 構成原子のうち O 原子は比較的低温でも動き易いことから、O 原子の移動が支配的であると考えられる。一方、873K 程度の比較的高温では、全ての種類の Bi-2212 構成原子が移動しやすいと考えられることから、欠陥の回復は速く、1h のアニール温度で複合欠陥の形成により J_c が極大になるが、その後は欠陥の消失が生じるため、 J_c が低下したと考察している。なお、ピンニングポテンシャルにおいても同様の熱アニール条件依存性が観測された。

これらの結果をもとに、高エネルギー重イオン照射、高速中性子照射、照射後熱アニールの各場合における欠陥形状の変化に関するモデルを提案している。

第 6 章は結論であり、以上の結果を総合して、高エネルギー重イオン照射および高速中性子照射、あるいは、照射後の熱アニールにより欠陥の形状を制御することが可能であること、そのことにより比較的高温でも有効に機能するピンニングセンターとして適切なサイズの複合欠陥が生成し、臨界電流密度の著しい向上をもたらすことが可能であると結論し、本手法の有効性を述べている。

以上を要約すると、本論文は、高温酸化物超伝導体の改質手法として量子ビーム照射法および照射後熱アニール法を取り上げ、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (Bi-2212)単結晶に対して、高エネルギー重イオンおよび高速中性子の照射と照射後熱アニール処理を行い、臨界電流密度 J_c ・ピンニングポテンシャルなどの超伝導特性の変化を調べるとともに、それらの結果をもとに、量子ビーム照射と熱アニールによる欠陥形状制御のメカニズムや試料内部の欠陥構造と磁束ピンニングメカニズムの関連を明らかにし、さらに本手法が高温酸化物超伝導体の改質手法として有効であることを結論したものであり、システム量子工学に寄与するところが大きい。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。