組織欠陥を内包した多結晶超伝導材料の輸送モデリング: 伝導経路の次元性と蛇行性の定量的解析

Modeling of transport in polycrystalline superconductors with microstructural defects: Quantitative analysis of meandering and dimensionality of conduction path

東京農工大学, JST-CREST ○山本 明保, 小原 拓也

Tokyo Univ. of Agricul. & Technol., JST-CREST ○Akiyasu Yamamoto, Takuya Obara

E-mail: akiyasu@cc.tuat.ac.jp

背景：多結晶超伝導材料における輸送電流の伝導経路は、組織欠陥を内包する複雑な微細組織に依存する。このような系における伝導を記述するモデルとしてパーコレーションモデルがあり、超伝導材料では MgB_2 のマクロなコネクティビティを平均場近似理論で解析した研究[1,2]などが報告されている。一方で、輸送電流のローカルな制限因子を直接推定した例はあまり報告されていない。本研究では、空隙や不純物などの絶縁相を内包した多結晶の常伝導状態の輸送機構をモデル化し、絶縁相の割合を系統的に変化させた系で数値シミュレーションを行った。伝導経路の次元性や蛇行性を定量的に評価することで、組織欠陥が伝導機構に及ぼす影響について考察した。

方法:3 次元立方サイト過程に基づくランダム抵抗網を用いて多結晶体の伝導機構をモデル化し、超伝導相は閉サイト、空隙や不純物などの絶縁相は開サイトとみなし、閉サイト間の結合は伝導を担う閉ボンドとした。系の x 両端に電圧を印加して数値シミュレーションを行い、系のマクロなコネクティビティ K(有効電気伝導度)を求めたほか、x(//V), y, z 方向のローカルなボンド電流値 I_x, I_y, I_z を分析した。Fig. 1 に計算例として、閉サイトの充填率 P が 0.4 の場合の電位分布を示す。

結果：K の P 依存性を Fig. 2 に示す。平均場近似による結果[3]と同様に、P の減少とともに K は減少し、P_c でゼロとなった。K 以上の電流値を持つ閉ボンド$|I_x|, |I_y|, |I_z| \geq K$ の割合を Fig. 2 に示す。$|I_x| \geq K$ となる確率は $P > \sim 0.5$ では 0.8 以上と高いが、$|I_y|, |I_z| \geq K$ は $P > \sim 0.8$ ではほぼゼロであり、x 方向に指向した擬 1 次元的な伝導であることが示唆される。一方、$|I_y|, |I_z| \geq K$ となる確率は P が ~0.8 を下回ると増加し、yz 方向ボンドも伝導に寄与し始める。P が~0.4 を下回ると$|I_x|, |I_y|, |I_z| \geq K$ となる確率はほぼ同じになり、伝導経路が 3 次元的に蛇行することを示唆する。蛇行性の指標となる蛇行性パラメータ Λ[4]の P 依存性（Fig. 3）では、P が~0.4 以下で急激な増大が確認された。

[1] A. Yamamoto *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **20** 658-666 (2007) [2] T. Matsushita *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **21** 015008 (2008)
[3] B. P. Watson and P. L. Leath, *Phys. Rev. B* **9** 4893-6 (1974) [4] T. Obara and A. Yamamoto, *Supercond. Sci. Technol.* **33** 074004 1-7 (2020)

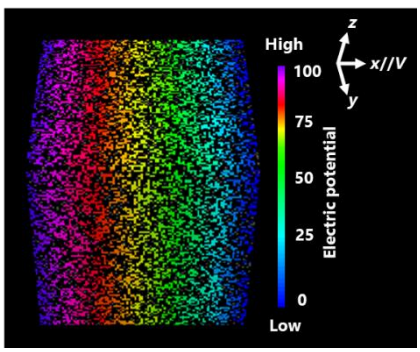


Fig. 1 An example of simulated electric potential distribution for $P = 0.4$.

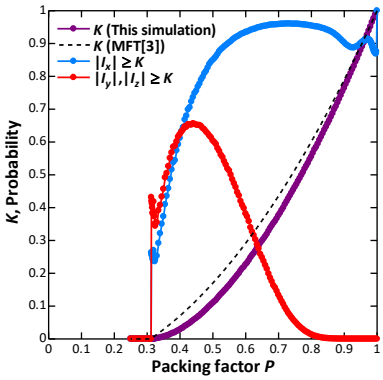


Fig. 2 P dependences of K and the probability of $|I_x|, |I_y|, |I_z| \geq K$.

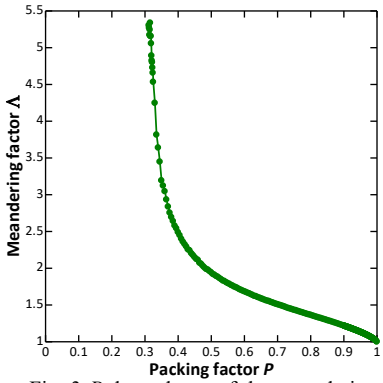


Fig. 3 P dependence of the meandering factor Λ.

© 2020年 応用物理学会