

相対論的電子を有する 高性能熱電・熱磁気材料の開拓

理学研究科 物理学専攻

准教授 酒井 英明

Researchmap <https://researchmap.jp/7000018618>



研究の概要

相対論的運動方程式に従う伝導キャリア（ディラック電子など）をもつ物質は、従来の金属や半導体を凌駕する超高移動度を示すため注目を集めている。このような卓越した伝導特性は、エレクトロニクス応用に加え、環境にやさしい熱電発電応用でも有望である。しかし、これまで熱電発電へ応用可能なディラック電子系バルク材料は皆無であった。これに対し我々のグループでは、ディラック電子伝導層と絶縁ブロック層が交互に積層した層状バルク物質を合成し、ブロック層の元素置換により、ディラック電子の高易動度を保持したまま、幅広いキャリア濃度制御に成功した。この結果、優れた熱電性能をキャリア濃度により最適化できること明らかにし、熱電・熱磁気材料としてのポテンシャルを実証した。

に増加し続け、 $x=1\%$ の最高値は母物質の約5倍に達する。半古典理論によると、この振る舞いは通常の放物線バンドでは説明できず、バンド端まで移動度が落ちないディラック電子バンドに起因することが明らかとなった。このようにネルンスト効果には、ディラック電子バンド特有の増大メカニズムがあることを初めて実証した。

研究の意義と将来展望

本物質系で最適化された電力因子は、既存の熱電材料の性能を上回る値である。ただし、優れた性能が発現する温度領域が100 K付近であるため、低温熱源での応用が期待される。今後は、駆動温度領域の高温化や、熱伝導率の低下を目指したブロック層を設計し、物質開拓を進める予定である。また、本物質系では熱磁気効果（磁場または自らの磁化により、熱勾配と垂直方向に熱起電力が発生する現象）も巨大であり、キャリア濃度により系統的に制御できることが明らかとなった。本効果を利用した革新的な環境発電への応用も期待される。

研究の背景と結果

廃熱を電気エネルギーへ直接変換する熱電変換技術は、環境調和型発電として注目されている。この効率を決定する最も重要な因子の一つは、電力因子 = (熱電能) × (電気伝導率)² である。通常金属では、電気伝導率を上昇させるためにキャリア濃度を増加させると、熱電能が減少するトレードオフの関係となるため、低キャリア濃度でも高い電気伝導率を有する物質が有望となる。本研究では電力因子の飛躍的増大が見込める物質として、エネルギーと運動量が線形関係の特殊なバンド構造を持つディラック電子系物質に着目し、その開拓を行った。これまで熱電発電へ応用可能なバルク材料は皆無であったが、我々のグループは近年、ディラック電子伝導層と絶縁ブロック層が交互に積層した層状物質の合成に成功した（図1）。そこで、実際に高い易動度が観測された EuMnBi_2 を母物質とし、元素置換による幅広いキャリア濃度制御に取り組んだ。

As-grownの単結晶試料では、わずかに正孔キャリアがドーピングされているため、 Eu^{2+} を Gd^{3+} で部分置換することにより正孔キャリアの濃度を減少させた。興味深いことに、ゼーベック係数の大きさは、Gd置換量 x の増加に対し非単調な振る舞いを示す（図2）。 $x=0.5\%$ までは、キャリア濃度の減少に対応してゼーベック係数は増加するが、 $x=0.8\%$ 以降は減少に転ずる。さらに $x=6\%$ 付近でゼーベック係数の符号が負へ転換する。このように、 p 型から n 型までディラック点を越えてフェルミエネルギーを制御できることがわかった。

一方、熱磁気効果に対応するネルンスト係数は、Gd置換に対し単調

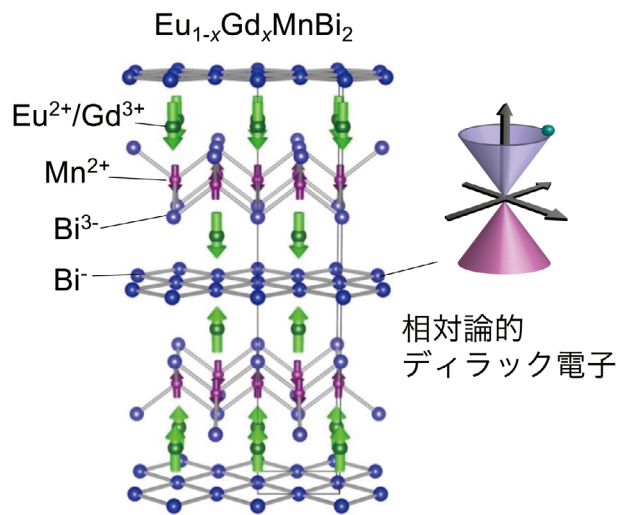


図1

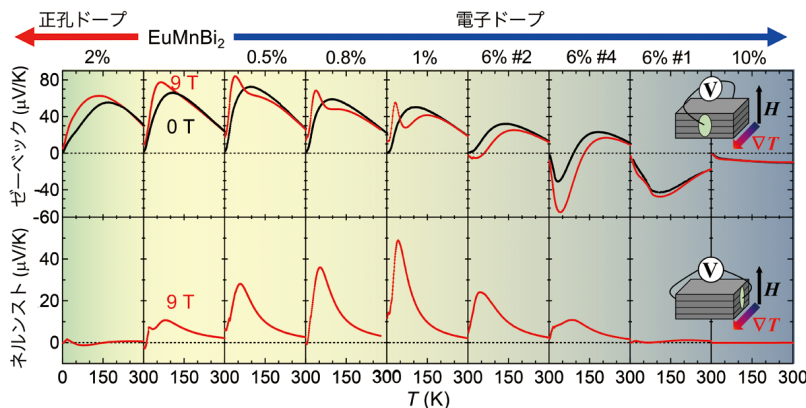


図2

特許

論文

Tsuruda, Keigo; Sakai, Hideaki et al. Enhancing thermopower and Nernst signal of high-mobility Dirac carriers by Fermi level tuning in the layered magnet EuMnBi_2 . Adv. Funct. Mater. 2021, Volume 31, p. 2102275, doi: 10.1002/adfm.202102275
Sakai, Hideaki. High-field Studies on Layered Magnetic and Polar Dirac Metals. J. Phys. Soc. Jpn. 2022, Volume 91, p. 101001, doi: 10.7566/JPSJ.91.101001

参考URL

<http://hide-sakai.net>

キーワード

熱電効果、ネルンスト効果、高易動度、ディラック電子、トポロジカル物質