

電子-正孔散乱による運動量緩和下におけるスピン輸送の解析方法

Analysis method of spin transport subjected to the momentum relaxation due to Baber-type electron-hole scattering

○酒井 政道¹, 鯉沼 将大², 長谷川 繁彦³,埼玉大院理工¹, 栃木県産業技術センター², 阪大産研³○M. Sakai¹, Y. Koinuma², S. Hasegawa³Saitama Univ.¹, ITC of Tochigi Pref.², Osaka Univ.³

E-mail: sakai@fms.saitama-u.ac.jp

緒言 補償金属や半金属に代表される縮退したアンビポーラ性伝導体では、フェルミ気体モデルでは説明できない現象が電荷輸送や熱輸送にしばしば観測され、電子-正孔散乱（以下 Baber 散乱）によって説明されている[1-4]。最近では、補償金属 YH₂において、約 40 μm と云うグラフェン並みの室温スピン拡散長が報告された[5, 6]。本研究では、Baber 散乱による運動量緩和がスピン輸送に与える影響を解析的に扱う手法を開発している。

方法 平行スピンのキャリア同士の衝突に限定する。計算は Boltzmann 輸送方程式にもとづく。Baber 散乱による衝突項のため、複雑な連立積分方程式となり、スピン輸送の解析計算が困難である。本手法では、Baber 衝突項を電子と正孔（正確には正孔バンドに属する電子）の 2 種類の分布関数から構成する緩和近似モデルを使う。モデルの設定では、Baber 衝突項の波数積分量が電子と正孔（正孔バンドに属する電子）の入替えに対して不変と云う性質に整合させた。緩和時間モデルの適性の評価は、変分法と運動学モデルによって計算された電気抵抗の表式[2]との比較による。

結果 上記方法によって、次の連立ドリフト-拡散方程式が導出された：

$$-\frac{1}{e}\sigma_v^{(1)}\nabla^2\phi + D_v^{(1)}\nabla^2n_v^{(1)} + \text{div}\mathbf{j}_v^{(1)} - \Theta_1\text{div}\mathbf{j}_v^{(2)} = 0 \quad (v=\uparrow,\downarrow),$$

$$\frac{1}{e}\sigma_v^{(2)}\nabla^2\phi + D_v^{(2)}\nabla^2n_v^{(1)} + \Theta_2\text{div}\mathbf{j}_v^{(1)} - \text{div}\mathbf{j}_v^{(2)} = 0 \quad (v=\uparrow,\downarrow),$$

ここで e は素電荷、 $n_v^{(i)}$ と $\mathbf{j}_v^{(i)}$ はそれぞれスピンに依存したキャリア ($i=1$: 電子、 $i=2$: 正孔) の数密度および粒子流密度、 ϕ はポアソン方程式を満たすスカラーポテンシャル、 $\sigma_v^{(i)}$ と $D_v^{(i)}$ はそれぞれ各キャリアの電気伝導度および拡散係数であり、Baber 散乱をはじめそれ以外の運動量緩和機構を含めることができる。 Θ_1 と Θ_2 は、運動量緩和が Baber 散乱だけの場合は 1 であり、それ以外の機構があると 1 からずれる無次元量である ($|\Theta_1| \leq 1$ 、 $|\Theta_2| \geq 1$)。 $\text{div}\mathbf{j}_v^{(i)}$ は、各キャリアの Boltzmann 方程式を単純に波数で積分して得られる粒子数密度に関する連続条件から決まる量であり、ここに各種スピン緩和機構を緩和時間近似して代入する。上記方程式から、2 種類のスピンモードと 2 種類の電荷モードが得られ、特に $\Theta_1\Theta_2 \cong 1$ では、2 種類のスピンモードのうち、1 つは著しく大きな拡散長を示す。

[1] Baber W G 1937 *Proc. Royal Soc. London A* **158** 383

[2] Maldague P F and Kukkonen C A 1979 *Phys. Rev. B* **19** 6172

[3] Li S and Maslov D L 2018 *Phys. Rev. B* **98** 245134.

[4] Takahashi K et al 2023 *Phys. Rev. B* **107** 115158

[5] Sato K et al. 2023 *Phys. Scr.* **98** 045912.

[6] Yamazaki I et al 2025 *J. Phys.: Condens. Matter* **37** 065804