

半導体先端デバイス開発のためにミュオンができること

下村浩一郎

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所

半導体や絶縁体にミュオンを注入すると、ほとんどの場合にミュオニウム (Mu) が形成されることが知られている。ミュオニウムは電子と μ^+ の束縛状態であり、物質中では軽い水素原子 (H) として振る舞う。本講演では、このミュオニウムを用いた半導体物性研究を中心に報告したい。

1) 半導体におけるミュオニウム

半導体の研究では、長年にわたり真空中のミュオニウムと同じオーダーの超微細相互作用を持つミュオニウムのみが主要な研究対象となっていた。このため、半導体の特性を支配する不純物 (構造敏感) 物性といった観点よりは、量子効果の大きな点欠陥としてのミュオンが作り出すエキゾチックな振る舞い (量子拡散等) を調べるといった観点が強かった¹³⁾。しかし最近では、ミュオニウムが半導体の性質を支配する水素同位体の様々な性質を探るための極めて重要なプローブになりつつある。一例を挙げれば、酸化亜鉛、窒化ガリウム等における非常に弱い結合状態 (超微細相互作用の小さい状態) にあるミュオニウムの発見であり、これらの半導体において水素原子が浅いドナー準位を形成して電気活性に大きな影響を与えることが明らかになった。

2) スピントロニクス研究への応用

ミュオニウムは半導体のスピントロニクスの研究にも有用となることが最近明らかになってきた。スピントロニクスの材料として、Si, Ge, グラファイトや有機半導体といった標準的な半導体を活用できれば、性能・コストの両面で通信技術に革新的発展が期待される。そのためには、スピン偏極した伝導電子 (conduction electron spin polarization CESP) を注入し、測定する実験技術を確認することが極めて重要である。これらの半導体では伝導電子のスピン軌道相互作用が弱いので、ひとたびCESPが注入されればスピン寿命は長いと期待されるが、間接遷移型のバンド構造をもつためスピン偏極の情報がルミネッセンス光に伝わりにくく、光磁気Kerr効果 (magneto optical Kerr effect MOKE) などの光学的方法を用いることができない。このことは、直接遷移型のバンド構造を持ち、純光学的な手法で、CESPの研究を行うことのできるGaAsなどとは対照的である。しかしながら、スピン偏極しているミュオニウム (Mu) を対象となる半導体に導入し、スピン偏極伝導電子とミュオニウムの間のスピン依存相互作用によってCESPを測定することが出来れば状況は一変する。最近、理研RALにおいて、スピン軌道相互作用の大きくCESPの注入法・CESPの物性などの実験研究が進んでいるn型GaAsにおいて横山・永嶺らによる本格的原理検証実験が成功した。