

# 半導体の電気伝導における Zitterbewegung (ジグザグ運動)

中村 壮智 (東京大学物性研究所 taketomo@issp.u-tokyo.ac.jp)

勝本 信吾 (東京大学物性研究所 kats@issp.u-tokyo.ac.jp)

Zitterbewegung (ZB) は Schrödinger が Dirac 方程式の研究で見出したもので、一般には粒子が何らかの相互作用により2つの速度状態の間を遷移することに伴う振動現象である。その振動数は相互作用による準位間反発のエネルギーギャップに相当し、Schrödinger のオリジナルである真空中の電子に伴う ZB は、それが実際に起こるものであったとしても、実験的観測は振動数の高さや微小な振幅から事実上不可能である。固体中の電子では、格子ポテンシャルや多体効果、更には人工構造などに由来する様々な準位間反発ギャップが存在する。これらの準位の指数となる自由度が、電子の運動自由度自身であったり、運動自由度と何らかの形で結合していれば ZB、すなわち異なる速度状態間のコヒーレント振動を生じる可能性がある。

このような固体中の電子の ZB で、実験的な観測可能性が議論されてきたのが、半導体中の Rashba 型スピン軌道相互作用を起源とするものである。スピン軌道相互作用は、運動量に応じてスピンに対する有効磁場を生じ Zeeman 効果と類似のギャップを与えるが、この時スピン自由度は軌道自由度と結合しているので、何らかの方法でコヒーレンス振動(スピン空間で見ればスピン歳差運動)を起こせば、速度空間でも振動、すなわち ZB が生じる。実空間内ではこれは電子の蛇行運動となる。理論的な検討では、パラメーターの調整や、超微細でクリーンな構造、初期状態の準備など、難しい条件をクリアすれば、実験でもぎりぎり観測可能という厳しい結果を報告しているものが多く、実際明瞭な実験結果はほとんど報告されていなかった。

筆者らはこれまでの実験の提案とは異なる

方法で、Rashba 型スピン軌道相互作用を起源とする ZB の検証を行った。すなわち、狭ギャップ半導体である InAs 量子井戸中の二次元電子系に生じる ZB を、量子ポイントコンタクト(QPC)を電子の注入電極と収集電極に使い、比較的大きな試料に生じる再現性のある伝導度ゆらぎ(不規則な磁気抵抗)として検証した。QPC では伝導度が量子化伝導度  $G_q = 2e^2/h$  単位で量子化される。QPC を構成する系が Rashba 型スピン軌道相互作用を有していると、QPC の伝導度がちょうど  $G_q$  である時、これを通過する電子のスピンは高い偏極度で偏極される。これを注入時の初期状態準備に用いた。また、結晶や構造の乱れから来る散乱により ZB の蛇行を増幅して収集電極での分解能を補強している。

以上の道具立ての上で、二次元電子面に平行な磁場の Zeeman 効果によりギャップを変調することで、ZB の振動数を変調したところ、磁場に対して再現性を持つ電気伝導度のゆらぎ(不規則な振動)を観測した。良く似た伝導度ゆらぎをもたらす現象は他にも知られているが、ここで観測されたものは、ゆらぎの磁場強度・方向に対する特性、注入電極・収集電極の位置関係による変化、更に電極に QPC を使用せずスピン偏極しない電子で測定すると、同じ試料の電気伝導度からあっさりゆらぎが失われてしまうことから、当初期待された ZB によるものであることが明らかになった。

Dirac 方程式を満たす波動関数は、(スピン自由度2)×(粒子反粒子自由度2)の4元を必要とし、後者(粒子反粒子)がオリジナルな ZB の原因であるが、ここではスピン軌道結合を通して前者(スピン)が ZB を生じさせていることになる。

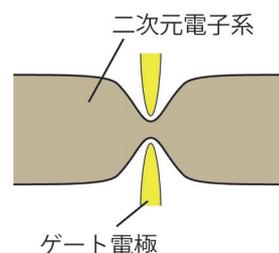
## —Keywords—

### スピン軌道相互作用：

Dirac 方程式から導かれる相対論的効果で、粒子の運動量と電場、スピンの依存した相互作用。結晶中の電子では表面や界面などの非対称構造に起因する Rashba 型とバルク結晶構造の反転対称性の欠如に起因する Dresselhaus 型の2つが主である。

### 量子ポイントコンタクト：

二(三)次元伝導体に接続したくびれ状の構造。短い一次元伝導体とみなせて、その伝導度は量子化伝導度  $G_q = 2e^2/h$  の整数倍に量子化される。量子化伝導度の分子の2はスピンの縮退によるもので、磁場などの縮退を解くような相互作用がある場合は  $G_q/2$  の整数倍となる。



二次元電子系に形成した量子ポイントコンタクトの模式図。形状はゲート電圧によって電子数を増減させる、あるいはエッチングによって物理的に切り取ることによって整形する。