

微量微粒子修飾がもたらすグラフェンのトポロジカル絶縁体転移

春山 純志 〈青山学院大学大学院理工学研究科 J-hare@ee.aoyama.ac.jp〉

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

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

近年各種トポロジカル絶縁体 (TI) の研究が盛んである。TI ではスピン軌道相互作用 (SOI) により試料バルク部でエネルギーギャップが開く一方、非 TI 物質や真空との界面ではこのギャップは消失し、フェルミ準位位置に界面状態が生じる。時間反転対称性により後方散乱から保護されたこの状態中を流れる反平行な電子スピンの対からなるスピン流の2端子抵抗値は、不純物・欠陥など試料固有の散乱要因に依らない定数 (量子抵抗 $R_Q = h/e^2$ の $1/2$) となる。この電子スピンは量子コンピューティングにおいて問題になる位相の崩れやエラーからも保護されると考えられ、量子ビットへの応用も期待されている。

二次元 TI ではバルクギャップが開く一方、試料エッジ (外周) に沿って上記反平行スピン対 (Kramers 二重項) が対向しながら走行するヘリカルエッジ状態が出現し、抵抗 $R_Q/2$ を持つ量子スピンホール効果 (QSHE) が観察される。ヘリカルエッジ状態は一次元系で外部印加電場・磁場による制御が容易なため、そのスピン流は、三次元 TI よりもスピン素子応用に適している可能性がある。

三次元 TI は Bi_2Te_3 などこれまで多く研究されてきたが、高品質なエッジを持つ二次元結晶の作製が困難なこともあり低次元 TI の報告例は少なく、 HgTe や InAs/GaSb の量子井戸中の半導体二次元系が主であった。しかしここ数年、二次元原子層で、室温を超える巨大バルクギャップや高温 (100 K) での QSHE が確認され関心を集めている。一方、グラフェンは軽元素炭素からなり面直方向の対称性も高いため SOI を本来持たないが、TI が理論上初めて予言されたのは SOI を有する仮想的グラフェンであった (2005 年 Kane & Mele)。以降、多数の理論が提案され、検証実験も多くなされてきたが、グラフェンの電子状態は表面の汚染・欠陥などに極めて敏感で、これ

まで明確な QSHE の報告はなかった。しかし、原子一個の薄さの二次元軽元素物質に SOI 導入が可能か、という命題の検証や、特異的に均一なディラック電子状態を持つグラフェンならではの TI 状態を探索することは依然興味深い。

中でも、グラフェン表面の重元素修飾は過去多くの理論が提唱されてきた。特に Wu, Alicaia らのグループは、重元素原子でグラフェン表面を被覆率僅か 1% 程度でランダムに修飾すると、重元素とグラフェン間のトンネル電流の影響が均一なディラック状態により面内に広がり、200 meV を超える SOI ギャップが導入され、安定な QSHE が出現することを算出している。

この超微量修飾法は汚染・欠陥の導入を防ぐ上で大変実用的であるため、筆者らは Bi_2Te_3 微粒子をグラフェン上に修飾し、この理論の検証に挑戦した。その結果、原始的ではあるが「医療用ナノ針」を使う方法を開発し、グラフェン表面への欠陥・汚染導入を避けつつ、被覆率僅か 3% 程度で Bi_2Te_3 微粒子を表面に分散し、微粒子の d, f 電子軌道とグラフェンのディラック状態間の良好な化学結合を形成することに成功した。この試料においてフェルミ準位をディラック点に整合させた場合、QSHE 特有の R_Q の分数倍の抵抗ピーク値が出現することを見出した。また、抵抗の温度依存性やトンネル顕微鏡による電子状態密度の観察、微粒子を想定したシミュレーションも SOI ギャップと QSHE の出現を支持し、約 $1 \times 6 \mu\text{m}^2$ にわたって約 20 K の高温まで二次元 TI 状態が存在していることを立証した。

Kane, Wu らの理論を実証し、強い化学結合を実現すれば僅か 3% 程度の微粒子被覆率でもグラフェンは TI になる可能性を見出した本実験の意義は大きい。本来グラフェンの持つ強いスピンコヒーレンスと相まって今後更なる展開が期待できる。

—Keywords—

スピン軌道相互作用 (SOI) : Dirac 方程式から導かれる相対論的効果。粒子の運動量、電場、スピンに依存した相互作用。結晶中電子に関しては主に以下の2つのタイプがある。ラッシュバ型 SOI : 試料表面・界面の面直方向空間反転対称性の破れに起因。ドレッセルハウス型 (真性) SOI : 結晶構造の反転対称性欠如で生じる内部電場に起因。

