

平成27年9月4日

報道機関各位

東京工業大学
東京大学 大学院 理学系研究科・理学部
自然科学研究機構 分子科学研究所
お茶の水女子大学

ビスマス薄膜が半導体になることを実証

—次世代高速デバイスの有力材料に浮上—

【要点】

- 高品質のビスマス薄膜を作成し、その電気的性質を測定
- 半金属であるビスマスが薄膜化によって半導体になる理論を実証
- 次世代の高速デバイス開発へ新たな道

【概要】

東京工業大学大学院理工学研究科の平原徹准教授は、東京大学の長谷川修司教授、自然科学研究機構分子科学研究所の田中清尚准教授、木村真一准教授（現大阪大学教授）、お茶の水女子大学の小林功佳教授らと共同で、半金属^{注1}のビスマスを薄膜にするとその電気的な性質を半導体に変えられることを実証した。

高品質のビスマス薄膜を作成して、分子科学研究所の放射光施設 UVSOR で偏光可変の角度分解光電子分光^{注2}測定を行い、ビスマス薄膜が半導体になっていることを確認した。さらに、理論では予想されていなかった表面や界面の電子が関係した新しい現象も発見した。これらの成果により、次世代高速電子デバイス開発に新たな道を拓くことが期待できる。

ビスマスは近年盛んに研究されているグラフェンなどと同様に、シリコンなどの半導体中の電子より高速に移動できるディラック電子^{注3}を有している。しかし、このディラック電子をデバイス応用する上ではエネルギーギャップ^{注4}が開いた半導体にする必要がある。1960年代にビスマスを薄膜にすることで半導体化できることが理論的に予想されたが、これまで実験的にははっきりとした結論は出ていなかった。

本研究成果は9月3日に米国物理学会誌「フィジカルレビューレターズ(Physical Review Letters)」で公開された。

●研究の背景

高速に動作するデバイスの作製には、用いる物質中の電子の速度が速い(移動度が大きい)ことが必要である。最近、通常の電子と異なったエネルギーと運動量の分散関係を持つディラック電子が大きな移動度を持つ電子として注目され、研究が活発に行われている。例えば、ディラック電子を持つ物質として知られている炭素一層からなるグラフェンの電子の移動度は、シリコンのおよそ 10 倍の $15,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (平方センチメートル毎ボルト毎秒) である。

ビスマスは固体中でディラック電子が存在することが分かった最初の物質で、1960年代から研究されてきた。グラフェンの研究が盛んになったのは 2005 年以降であることを考えると、その歴史は非常に古いことが分かる。

デバイス動作のための重要な条件の一つは、その電氣的性質がバンドギャップを有する半導体であることである。しかし、上記のグラフェンもビスマスも半金属でバンドギャップがないために、何らかの方法で半導体にしなければならない。

1967年に旧ソ連の理論物理学者 V. B. サンドミルスキー (V. B. Sandomirskii) は、ビスマスを 30nm(ナノメートル)程度の厚さの薄膜にし、量子サイズ効果^{注5}を利用することで、半導体に変えられる(半金属半導体転移、図 1)ことを予想した。しかし、今日まで約 50 年間多くの研究が行われたものの、実際にビスマス薄膜で半金属半導体転移が起きているという明確な実験証拠はなかった。

●研究成果

今回、東工大の平原准教授らの研究グループは、高品質のビスマス薄膜を作成し、その電氣的特性を分子科学研究所のシンクロトン放射光施設 UVSOR で測定した。UVSOR の偏光可変の低エネルギー角度分光電子分光(図 2)装置を用いることにより、これまで報告例がほとんどなかったビスマス薄膜の内部の電子状態を高精度で観測することに成功した。

その結果、当初の理論よりも膜厚が厚い、70 nm の厚さの薄膜でエネルギーギャップが開き、半導体になっていることを実証した(図 3)。一方、10 nm 以下のビスマス超薄膜は、理論の予想と反してエネルギーギャップがない半金属であることも分かった。これは、厚さ 10 nm 以下では表面・界面の効果が重要であり、これを考慮した新たな理論が必要なことを示している。

●今後の展開

今回の研究は、量子サイズ効果を利用してビスマスの電氣的性質を制御できることを明確に示したものである。そして厚さが 10 nm 以下の極薄の薄膜では表面や界面に存在している電子が、物質の内部の電子の性質に大きな影響を及ぼしていることも分かった。

今後はビスマス内部の高移動度のディラック電子を利用した高速デバイスの開発、さらにビスマスの表面や界面に存在する電子を利用した極薄ナノデバイス開発という応用研究へと進展することが期待できる。

【用語説明】

- (注1) **半金属**：元素は通常、その一般的な化学的、物理的性質によって金属もしくは非金属(半導体や絶縁体)に分類される。しかし、いくつかの元素はその中間の性質を持ち、その特性による分類が難しくなる。そのような元素を半金属と言う。
- (注2) **角度分解光電子分光**：固体に光を照射すると物質の表面から電子が放出される。放出された電子は光電子と呼ばれ、光電子のエネルギーや運動量を測定すると、物質がどのような電子状態をとっているかが分かる。
- (注3) **ディラック電子**：通常の電子と異なり、英国の物理学者ディラックが1928年に発表した相対論的量子力学に従う高速電子のこと。
- (注4) **エネルギーギャップ**：シリコンに代表される半導体では、電子が占有する最高のエネルギー準位と、電子が非占有となる最低のエネルギー準位の間エネルギー差が存在する。このエネルギー差をエネルギーギャップと言い、半導体を電界効果等で制御する上での重要なパラメータになる。
- (注5) **量子サイズ効果**：物質の厚さを薄くしていくと、内部の電子がその狭い領域に閉じ込められるため、量子力学に従う振る舞いを見せるようになることを指す。今回のような数10nmの厚さのビスマス薄膜では、量子サイズ効果によって、3次元の厚いビスマスの場合と異なった電子の状態になった。

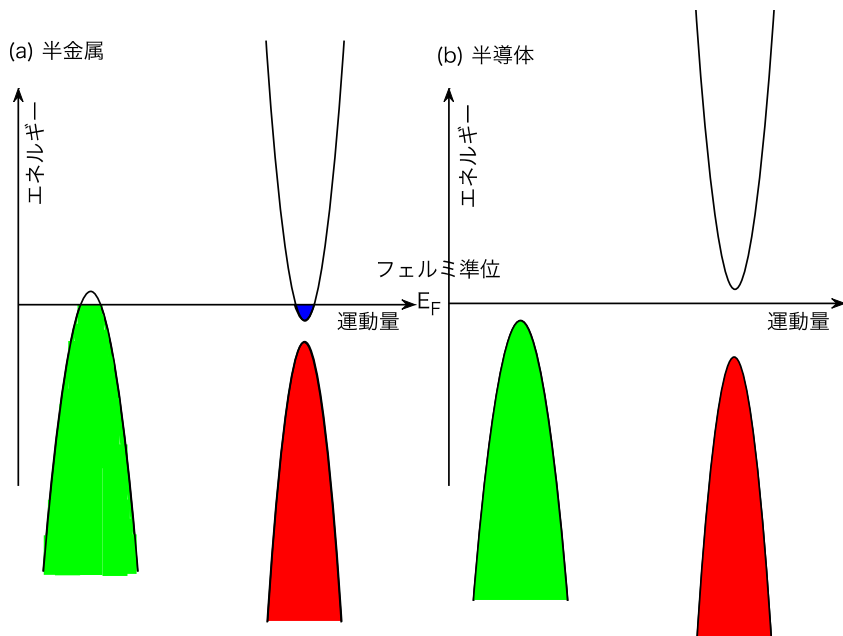


図1：ビスマス薄膜の半金属半導体転移(理論)。3次元の厚いビスマスは(a)のような半金属だが、30 nm 程度の厚さの薄膜にすると(b)のような半導体になることが予想された。

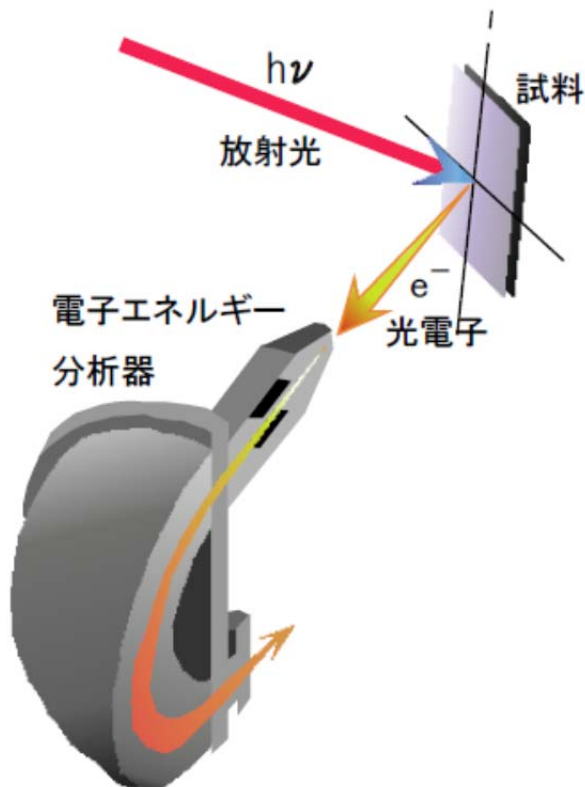


図2：角度分解光電子分光法の原理。

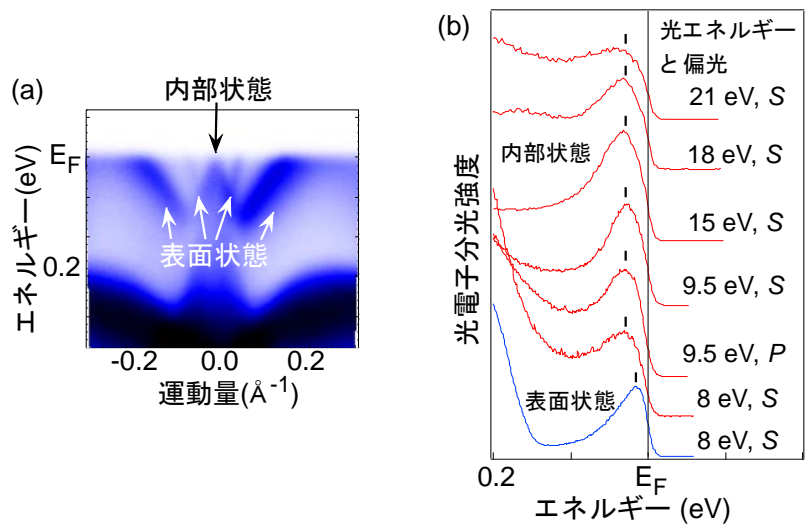


図 3 : 測定された実験データ。(a)はエネルギーと運動量のイメージを示しており、(b)が光電子分光強度のスペクトル。内部状態はフェルミ準位(E_F)にピークがなく半導体だが、表面状態はフェルミ準位を横切る金属である。内部状態は通常は測定条件(光エネルギーや光の偏光)を変えるとピーク位置が変化するが、薄膜では量子サイズ効果により測定条件を変えてもピーク位置が変化しない。

【論文情報】

雑誌名: *Physical Review Letters*

論文タイトル: **Role of Quantum and Surface-State Effects in the Bulk Fermi-Level Position of Ultrathin Bi Films**

著者: T. Hirahara, T. Shirai, T. Hajiri, M. Matsunami, K. Tanaka, S. Kimura, S. Hasegawa, and K. Kobayashi

DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.106803

【問い合わせ先】

東京工業大学 大学院理工学研究科 物性物理学専攻准教授 平原徹

E-mail: hirahara@phys.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2365

FAX: 03-5734-2365

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻教授 長谷川修司

E-mail: shuji@surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp

TEL: 03-5841-4167

【取材申し込み先】

東京工業大学 広報センター

E-mail: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975

FAX: 03-5734-3661

東京大学大学院理学系研究科・理学部

特任専門職員 武田 加奈子、准教授・広報室副室長 横山 広美

TEL: 03-5841-8856 E-mail: kouhou@adm.s.u-tokyo.ac.jp