

バリスティック伝導チャンネルの形成を目的とした、 結晶表面における1次元構造の設計とその電子状態評価

Design and Analysis of One-dimensional Electronic Structure Fabricated on
Crystal Surfaces for Ballistic-conduction Channel Formation

H28助自13

代表研究者 大 坪 嘉 之 大阪大学 大学院生命機能研究科 助教

Yoshiyuki Ohtsubo

Assistant professor, Graduate School of Frontier Biosciences, Osaka University

We have discovered the one-dimensional (1D) electronic states on 1D surface atomic structure of Bi fabricated on semiconductor InSb(001) substrates by electron diffraction, scanning tunneling microscopy (STM), and angle-resolved photoelectron spectroscopy (ARPES) experiments. The electron diffraction and STM images revealed clear 1D surface atomic structure with its width of a few atomic units. The ARPES measurements revealed that the Bi/InSb(001) surface fabricated in this work hosts the 1D state showed steep, Dirac-cone-like dispersion along the 1D atomic structure with a finite direct bandgap opening as large as 150 meV. Moreover, spin-resolved ARPES revealed the spin polarization of the 1D unoccupied states as well as that of the occupied states, the orientation of which inverted depending on the wave vector direction parallel to the 1D array on the surface. These results reveal that a spin-polarized quasi-1D carrier was realized on the surface of 1D Bi with highly efficient backscattering suppression, showing promise for use in future spintronic and energy-saving devices. In contrast to the known cases of surface ultrathin films, the 1D surface state of Bi/InSb(001) showed almost no influence from the film thickness. Since the STM measurement suggested the other mechanism of the bandgap formation due to the surface lattice distortion, further research using another substrates with different lattice constant is in progress.

研究目的

本研究の目的は、半導体表面に作製した1次元構造において、電子散乱による抵抗発生およびエネルギー散逸を極限まで抑制したバリスティック伝導チャンネルを実現することで、次世代電子デバイスの省エネルギー化及び高速化に貢献することであった。近年、グラフェンやトポロジカル絶縁体 (TI) 等で実現するディラックコーン型の分散を持つ電子状態 (ディラック電子) が電子デバイスへの応用の観点から盛ん

に研究されている。これはディラック電子の有効質量が0であり、従来のシリコン型デバイス中のキャリアと比べて百倍以上にもなる極めて高い移動度が実現しているためである。特にTI表面等で実現する特異なスピン偏極構造を持つディラック電子においては、不純物等によるキャリアの後方散乱が原則として禁止される。そのため、スピン偏極ディラック電子系は後方散乱抑制によりエネルギー散逸過程を無視できるバリスティックな伝導チャンネルの実現可能性を拓くものとして大いに注目を集めていた。

本研究においては、これまで主に均一な固体表面の2次元系において研究されていたTI表面のディラック電子系を1次元系へと拡張することを目指した。具体的には基板として結晶構造に1次元的な異方性を持つ化合物半導体を用い、その上にトポロジカル物質薄膜を成長させることにより、基板の異方性を「移植」した1次元的な表面原子構造を持つトポロジカル物質及び1次元ディラック電子系の作製を目指した。2次元スピン偏極ディラック電子系においては斜め後方へのキャリア散乱は許可されるのに対し、1次元系では理論的には全ての後方散乱が抑制されることから、完全な後方散乱の抑制、すなわち理想的なバリステック伝導チャンネルの形成が1次元ディラック電子系においては期待される。さらに、トポロジカル物質薄膜の作製条件を精密に制御することにより、薄膜の膜厚に依存した表面1次元ディラック電子系の制御、特にディラック電子系へのバンドギャップの導入とそのサイズ制御技術の確立を目指した。

概 要

本研究では電子散乱による抵抗発生およびエネルギー散逸を極限まで抑制したバリステック伝導チャンネルの実現を最終目的に設定し、半導体表面に作製したトポロジカル物質による1次元構造の作製及びその原子構造・電子状態の詳細な観測を行った。

近年、グラフェンやトポロジカル絶縁体をはじめとするいわゆるトポロジカル物質等で実現するディラックコーン型の分散を持つ電子状態(ディラック電子)が電子デバイスへの応用の観点から盛んに研究されている。これはディラック電子の有効質量が0であり、従来のシリコン型デバイス中のキャリアと比べてはるかに高い移動度が実現しているためである。これら

のディラック電子は不純物による散乱の抑制、つまりバリステック伝導チャンネルの実現という観点からも注目を集めている。トポロジカル物質の典型的なディラック電子は波数(運動量)空間において特異なスピン偏極構造を持ち、そのために非磁性の不純物による散乱では丁度逆方向への散乱(後方散乱)を起こすことができない。そのため、トポロジカル物質表面のディラック電子は不純物や表面原子ステップに遭遇しても後方散乱を起こさないという、所謂バリステック伝導機構が実現すると考えられている。従来提案されてきたバリステック伝導機構はカーボンナノチューブ等のように電子の散乱体となる不純物がほぼ存在しない系におけるものであったが、上述の様な後方散乱過程自体を禁止する伝導機構はより広範な系においてバリステック伝導チャンネル実現の可能性を拓くものであり、電子散乱によるエネルギー散逸を抑制した次世代電子デバイスへの応用を視野に盛んに研究されている。

本研究ではこれまで世界中で行われてきた2次元ディラック電子の研究成果をさらに一歩進め、上述の後方散乱抑制機構がより高効率で発現すると予想される1次元ディラック電子状態を半導体表面に作製し、その電子構造をnm単位の原子構造制御により実現しようと試みた。1次元トポロジカル物質薄膜の作製に際しては、分子線エピタキシー(MBE)法を用い、結晶構造に1次元的な異方性を持つ化合物半導体InSbの(001)表面を基盤として採用した。この上に強いスピン軌道相互作用を持つことで知られるBiをMBE成長させることでトポロジカル物質薄膜の形成に成功した。

得られたInSb(001)基板上のBi薄膜の表面原子構造は電子回折及び走査トンネル顕微鏡(STM)により観察すると、この表面には数原子から数十原子程度の幅を持ち数十nmの長さ

を持つ1次元的な針状構造が形成されることが明らかになった。表面1次元構造は基板の対称性を反映して1方向に揃って配向しており、マクロな電子物性測定においても針状構造の長手方向と横断方向を曖昧さを排して区別できることがわかった。電子回折実験により、針状構造間の距離はランダムであるが、針内部の原子間距離は一定の間隔を保っているよく規定された原子構造を持つことと、Bi積層量を変化させても表面原子構造が定性的には変化せずに1次元的な構造のままで保たれることが明らかになった。

このBiによる表面1次元構造の電子状態について、スピン・角度分解光電子分光によりその電子状態およびスピン・軌道偏極構造を詳細に調査した。得られた電子状態のバンド分散は針状構造の長手方向には急峻で有効質量の極めて小さいディラックコーンに似た分散を示す一方で、針横断方向にはわずかな分散しか示さなかった。この結果は原子構造の観測結果とよく対応し、表面針状構造の長手方向が支配的な1次元的な伝導経路が形成されていることを示唆する。さらに、電子状態のスピン偏極について調査した結果、この1次元電子状態が多くの特ポロジカル物質で見られるような時間反転対称性を保つ形でのスピン偏極構造を保持していることが判明した。これは上述の後方散乱抑制機構の起源となる特徴であり、本表面構造でも後方散乱抑制機構が発現することを強く示唆する。また、得られたバンド分散では既知の特ポロジカル物質の表面状態とは異なり、バンド頂点近傍に150 meV 程度のバンドギャップが開いていた。これは例えばこの系をFET素子などに応用する際には不可欠な特性であり、今後の応用可能性を強く後押しする特徴である。

以上のように、この1年の研究により本研究の最終的な目標である1次元バリステック伝

導チャンネルの形成に繋がる重要な結果を得ることができた。今後は実験系の準備ができ次第、作製した表面1次元系で実際に後方散乱が抑制されているか否か等の実証へと研究を進める予定である。

— 以下割愛 —