

学 位 論 文 の 要 旨

Analysis of Electronic Transport in Silicene for Spintronics
スピントロニクスのためのシリセンにおける電子輸送の解析

氏 名 Peerasak

Chantngarm 印

Scientists have found that we may control the spin of electrons and utilize it in spintronics, which may provide the possibility to overcome the limitation in Moore's law. Based on similar idea, valleytronics using valley degree of freedom has been proposed, and more recently pseudospintronics using pseudospin degree of freedom has also been proposed. Spintronic, valleytronic, and pseudospintronic devices are perfect candidates for quantum computers which are expected to be much faster than classical computers. On the other hand, elemental two-dimensional materials are anticipated to play an important role in spintronics, valleytronics, and pseudospintronics. They are also called Dirac materials because their electrons behave like massless Dirac particles obeying Dirac equation instead of Schrodinger equation like the electrons in other materials. One common characteristic of elemental 2D materials is the possession of honeycomb lattice structure which results in the existence of two atoms in one unit cell, and gives rise to two sublattices, A and B. This two-sublattice system contributes to a new concept called pseudospin.

Silicene is single-layer silicon. It is a relatively new elemental two-dimensional Dirac material. The main differences of silicene from graphene are the out-of-plane buckling and the larger spin-orbit interaction that allow the band gap in silicene to be tunable by electric field. The differences also cause silicene under a certain condition to behave as a topological insulator, a group of materials that have many exotic characteristics such as quantum spin Hall effect. Combining these properties with the accumulated knowledge in silicon industry makes silicene a material with great potential for spintronic and quantum computational applications.

The aim of this dissertation is to investigate the electronic transport properties of silicene for spintronics, and particularly explore the potential of silicene as a material for light sensitive devices. The dual ferromagnetic-gated silicene junction is used as the

basic structure in our investigation which are separated into two parts. First, we study the electronic transport properties of the structure to see the effects of electric field, magnetic exchange field configuration, and chemical potential on the spin-polarized, valley-polarized, and pseudospin-polarized currents. The electric fields and magnetic exchange fields are applied to ferromagnetic gates, while chemical potentials are applied to ferromagnetic gates and the normal region between gates. Second, we investigate the effects of off-resonant circularly polarized photo irradiation onto the normal region between gates under the influence of electric fields, magnetic exchange fields, and chemical potentials.

We discovered that magnetic exchange field configuration has a significant impact in the spin, valley, and pseudospin currents, and allows the device structure to behave as a pure spin polarizer, pure valley polarizer, or a pseudospin polarizer. The junction in our study exhibits perfect spin-valley polarization in certain exchange field configurations when chemical potential is applied. We also found that the peaks splitting effect on conductance is enhanced in all exchange field configurations when a middle gate bias is applied. We also predict that the pseudospin polarization can be linearly controlled by electric field from -100% to $+100\%$ when an appropriate middle gate bias is applied. This perfectly controllable pseudospin current in silicene was found only in dual ferromagnetic-gated junctions, and is not achievable with single ferromagnetic-gated junctions.

In the second part, it is found that all components of the polarized spin-valley currents in all exchange field configurations are affected by the light irradiation, probably due to the photon dressing effect. It is interesting to see possibility of spin-valley filtering when appropriate electric fields are applied to anti-parallel junctions under the light irradiation, where we can select specific spin-valley polarization to be filtered. We discovered that by adjusting the distance between two ferromagnetic gates, the light frequency for the appearance of spin-valley polarization peak can be controlled. Our investigation also revealed a possibility to control tunneling magnetoresistance (TMR) to become giant magnetoresistance (GMR) with appropriate application of electric fields and gate-induced chemical potentials under a specific light frequency. It is found that TMR magnitude may change significantly at a specific light frequency when the strength of electric field or chemical potential reaches a certain level. We also successfully demonstrate the control of spin polarization and valley polarization over the increasing light frequency by adjusting chemical potentials.

科学者達は、電子のスピンを制御してスピントロニクスで利用することによって、ムーアの法則の限界を克服できるかもしれないと発見した。同様の考え方に基づいて、谷の自由度を利用したバレートロニクスが提案され、さらに最近では擬似スピンの自由度を利用した擬似スピントロニクスも提案された。スピントロニクス、バレートロニクス、および擬似スピントロニクスのデバイスは、従来のコンピュータよりはるかに高速だと予想される量子コンピュータを作るデバイスの候補として有望である。一方、元素でできた二次元材料はスピントロニクス、バレートロニクス、および擬似スピントロニクスのデバイスを作るために有望だと期待されている。この材料グループにおける電子は、他の材料における電子のようにシュレディンガー方程式で支配されるのではなく、ディラック方程式に従う質量のないディラック粒子のように振る舞う。そのため、ディラック電子材料とも呼ばれる。元素でできた二次元材料の共通した一つの特徴は、一つの単位格子内に二つの原子が存在するハニカム格子構造を持っていることである。その二つの原子はそれぞれ副格子 A および副格子 B と呼ばれる。そして、この二つの副格子で形成されたシステムにおいて擬似スピンという新しい概念が生まれる。

シリセンは単層シリコンであり、比較的新しく発見された二次元のディラック電子材料である。グラフェンと大きな違いは二つ有り、面外バックリング（座屈）とより大きいスピン軌道相互作用である。それによってシリセンのバンドギャップは電界で調整することが可能になる。また、この性質の違いによって特定の条件下において、シリセンは位相絶縁体として振る舞い、量子スピンホール効果などの特殊な特性を示す。これらの性質とシリコン産業に蓄積された知識によって、シリセンに対してスピントロニクスおよび量子計算分野での応用が大きく期待されている。

この論文の目的は、シリセンにおける電子輸送現象を調査し、スピントロニクス特に光デバイスにおける応用の可能性を探索するためである。本調査はダブル強磁性ゲートシリセン接合を基本構造として用いて、調査内容を二つの部分に分けることができる。前半は、提示した構造におけるスピン偏極、谷間偏極、そして擬似スピン偏極電流に対する電界、磁気交換フィールドの構成、および化学ポテンシャルの影響を調査した。ここでは、電界および交換フィールドは強磁性ゲートへ、また化学ポテンシャルは強磁性ゲートおよびゲート間の正常領域へ与えられた。後半は、電界、磁気交換フィールドの構成、および化学ポテンシャルが加えられた状態で、オフ共鳴円偏光が正常領域へ照射されたときのその効果を調査した。

本調査の結果、磁気交換フィールドの構成はスピン偏極、谷間偏極、そして擬似スピン偏極電流に大きな影響を与える。また、化学ポテンシャルが印

加されない状態で交換フィールドの構成を調整することによって、提示したデバイス構造が純スピン偏光子、純谷間偏光子、または純擬似スピン偏光子に設定することができるということが分かった。一方、デバイス構造に化学ポテンシャルが印加されたとき、特定の交換フィールドの構成において完全なスピン谷分極を示す。さらに、中間ゲートバイアスが印加されたときに、全ての交換フィールド構成においてコンダクタンスのピーク間距離がさらに広がることが分かった。また、適切な中間ゲートバイアスが加圧されたときに電界によって擬似スピン偏極を -100% から $+100\%$ まで線形的にコントロールできることを予測した。この擬似スピン偏極電流の完全な制御はダブル強磁性ゲートシリセン接合においてのみ可能で、シングル強磁性ゲートシリセン接合では実現できない。

後半では、光照射は磁気交換フィールドの全構成におけるスピン谷の分極電流の全要素に対して影響を与えたことが分かった。これは光子ドレッシング効果によるものと思われる。また、適切な電界が光照射および逆平行接合の交換フィールド構成の条件下でデバイス構造に印加されたときに、特定なスピン谷の分極をフィルタリングできる可能性があるという結果も興味深いである。また、強磁性ゲート間距離を調整することによってスピン谷分極のピークが出現する光周波数を制御できることが分かった。さらに、本調査は特定の光周波数の条件下で適切な電界およびゲート誘起化学ポテンシャルを用いればトンネル磁気抵抗 (TMR) が巨大磁気抵抗 (GMR) になるようにを制御できる可能性があることも発見した。電界または化学ポテンシャルの強さがあるレベルに達すると、特定の光周波数におけるトンネル磁気抵抗の大きさが大きく変化することも分かった。また、化学ポテンシャルを調整することにより、光周波数の増加に対してスピン偏極および谷間偏極が制御可能だということも示した。