表面科学としてのシリセンの面白さ： 実験・理論の現状と今後の展望

江 澤 雅 彦

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 113-8656 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1

(2014 年 1 月 15 日受付；2014 年 4 月 9 日掲載決定)

Attractive Features of Silicene as a Surface Science : Experimental and Theoretical Perspectives and Future Problems

Motohiko EZAWA

Department of Applied Physics, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

(Received January 15, 2014 ; Accepted April 9, 2014)

We review the recent progress of the study of silicene, which is a honeycomb structure of silicon atoms. Silicene shares many similar properties with graphene but has some extra exciting properties since it is a topological insulator due to its spin-orbit interactions. Silicene has so far been synthesized only on a substrate. The synthesis and the measuring physical properties of silicene are interesting playgrounds of the surface science.

KEYWORDS : silicene, topological insulator, quantum spin-Hall effects, graphene, Dirac fermions

1. は じ め に

シリセン (silicene) という物質が基板上に合成され、大変興味を持たれている。これはシリコンがハニカム格子状に整列した物質である。炭素がハニカム状に整列した物質がグラフェン (graphene) なので、シリコンでできたグラフェンと考えることもできる。この類似性からシリセンはグラフェンと多くの共通性を持っている。実際、低エネルギー励起はディラック理論で記述される。その構造は平坦な構造を持っているグラフェンとは違い、座屈 (buckle) している (Fig. 1 参照)。シリセンは比較的大きなスピン軌道相互作用を持つため、グラフェンにはないトポロジカル物性を持っている。このため、グラフェンとトポロジカル絶縁体という最近の物性の合流点に位置し、豊富な物理が期待できる物質である。また、シリコンでできていることから、従来のシリコン・デバイスとも相性が良いことが期待される。将来的にはシリセンを用いたトポロジカル・デバイスが実現する日

がくるかもしれない。

シリセンの研究に関しては理論実験ともに日本が先行している。シリコン・デバイスなどの実績も豊富なので、今後とも、日本でシリセン研究をリードし続けられると良い。

シリセンに関しては既に解説記事があるので、そちらも参照されたい^{1,2)}。文献¹⁾は著者自身によってシリセン

Fig. 1. (color online). Illustrations of (a1) graphene and (b1) silicene. Band structures of (a2) graphene and (b2) silicene.

の理論について記述されている。このため、本稿では実験的な側面や今後の展望を中心に記述したいと思う。文献²⁾では二ホウ化ジルコニウム上のシリセンの合成に関して解説がなされている。物性におけるディラック電子に関しては文献³⁾に特集がある。シリセンはトポロジカル絶縁体でもある。トポロジカル絶縁体に関しては文献⁴⁻⁶⁾を参照されたい。さらにシリセンはグラフェンとも多くの共通の性質を持っている。グラフェンに関しては文献⁷⁾をあげる。

2. シリセンの歴史

シリセンは1994年に第一原理計算によって構造安定性とディラック・コーンの存在が予言された⁸⁾。本格的な実験的合成の報告は三つの実験グループにより、独立に2012年に報告された。フランスのGuy Le Layのグループは銀基板上での走査トンネル顕微鏡 (STM 像) と角度分解光電子分光 (ARPES) の解析から、シリセンが銀基板上で、合成されたことを報告した⁹⁾ (Fig. 2)。また、東大新領域の川合・高木グループも銀基板上でのシリセンの構造が二種類あることを STM 像と LEED (Low Energy Electron Diffraction) で確認した¹⁰⁾。さらに、北陸先端大の高村グループは二ホウ化ジルコニウム (ZrB2) 上でのシリセンの合成を STM 像と ARPES で確認した¹¹⁾。また、イリジウム上でもシリセンの合成の報告がなされている¹²⁾。

3. シリセンと表面科学

シリセンは表面科学と密接な関係がある。まず、シリセンの構造安定性は第一原理計算で確認されているが、シリセンは自然界には存在しない。これはシリセンが大変反応しやすく酸化されてしまい、シリカになってしまうからである。グラフェンはグラファイトが自然に存在するので、グラファイトを引きはがすことで、グラ

フェンを得ることができる。2010年のノーベル賞がグラフェンに対して与えられたのは記憶に新しい。一層グラフェンが鉛筆の芯をスコッチ・テープで剥離するだけで得られた。一方、グラファイトに対応するシリセンの積層構造は構造不安定で自然界に存在しない。これはシリセンが積層した構造はダイヤモンド構造のシリコンの方が構造安定なため、構造転移を起こしてしまうためである。このため、シリセンを合成するためには基板表面を使う必要がある。シリセンの実験は超高真空中で高度な技術で清浄な表面を作製可能な実験グループの独壇場になっている。

表面の状態を見るとバルクのトポロジカルな性質がわかるという原理がある。これはトポロジカル絶縁体の分野では、「バルク・エッジ対応」と呼ばれている。これは一言で言うと量子スピンホール効果などのトポロジカル絶縁体の表面にはヘリカルエッジ状態などの固有のエッジ状態が現れる。エッジ状態を観測すると、系がトポロジカルであることが否かがわかる。この観点からも表面の研究が重要であることがわかる。

シリセンの構造: Fig. 1 に見るように、グラフェンは完全にフラットな構造をしている。これは炭素が sp^2 軌道を構成しているからである。一方、シリコンの sp^2 軌道と sp^3 軌道が混成しているため、シリセンはバックルした構造をしている。シリコンの三次元構造はダイヤモンド構造にほかならず、 sp^3 軌道のみで構成されている。このため、シリセンの構造は一層のダイヤモンド構造であり、ダイヤモンド構造とハニカム構造の中間的性質を持っている。このグラフェンとシリセンの構造の違いは s 軌道と p 軌道のエネルギーの差が炭素の方がシリコンより大きいためである。シリセンのバックルした構造やシリコンが炭素より重いことの帰結としてスピン軌道相互作用が 3.9 meV あり^{13,14)}、トポロジカル絶縁体が実現している。グラフェンのスピン軌道相互作用は μeV のオーダーなので^{15,16)}、シリセンのスピン軌道相互作用はグラフェンの千倍ある。

シリセンとディラック電子: グラフェンの低エネルギー励起はディラック理論で記述される。一般的にハニカム格子の低エネルギー励起はディラック理論で記述される。グラフェンはギャップのない線形分散を持つに対し、シリセンはスピン軌道相互作用によるギャップのあるディラック分散を持つ。外場を含むシリセン系は、運動量 $(\hbar k_x, \hbar k_y)$ とフェルミ速度 v_F を用いて2行2列のディラック方程式で記述できる。

$$H_\eta = \begin{pmatrix} \Delta_{s_z}^\eta & \hbar v_F(\eta k_x - i k_y) \\ \hbar v_F(\eta k_x + i k_y) & -\Delta_{s_z}^\eta \end{pmatrix}$$

Fig. 2. (color online). (a), (b) and (c) STM and (d) ARPES images of silicene on Ag substrate. See the details in Refs. 9) and 22), from which these figures are taken.

対角成分に現れる量 Δ_z^η はディラック電子の質量である。これは簡単に対角化できて、分散関係は

$$E(k) = \pm \sqrt{(\hbar v_F)^2 k^2 + (\Delta_z^\eta)^2}$$

と求まる。ディラック・コーンが決まったスピン指数 ($s_z = \pm 1$) とバレー指数 ($\eta = \pm 1$) を持ち、そのギャップは $2|\Delta_z^\eta|$ である。

シリセンが特に面白いのは電場 E_z をシリセンに垂直にかけることでディラック質量を制御できること¹⁷⁾である。これはシリセン特有のバックル構造に起因する。シリセンは AB 副格子で形成されているが、A サイトと B サイトの高さが違う。このため、電場を垂直にかけると A サイトと B サイトの間に静電ポテンシャルが発生する。これがディラック電子の質量に寄与する。実際、 λ_{SO} をスピン軌道相互作用の大きさとして、質量は $\Delta_z^\eta = \eta s_z \lambda_{SO} - \ell E_z$ となる。電場を大きくしていくと、臨界電場でギャップが閉じ、ディラック質量の符号が反転して、量子スピンホール相から自明な相へとトポロジカル相転移する¹⁾ (Fig. 3)。

シリセンには電磁波¹⁸⁾ (λ_Ω) の照射や反強磁性秩序¹⁹⁾ (ΔM) の導入ができ、ディラック質量は

$$\Delta_z^\eta = \eta s_z \lambda_{SO} - \ell E_z + \eta \lambda_\Omega + s_z \Delta M$$

となる。スピン指数とバレー指数の選び方で、4通りの符号の選び方があるので、四つのトポロジカル量子数が存在することになる。これらは、チャーン数、スピン・チャーン数、バレー・チャーン数、スピン・バレー・チャーン数と呼ばれる。これらは上記の四つの質量を制御することで完全に制御できる。これはスピンとバレーを制御¹⁹⁾しているのので、スピン・バレートロンクスと名付けた。

3.1 シリセンと量子スピンホール効果

シリセンはグラフェンよりスピン軌道相互作用が大きく、この結果、量子スピンホール状態になることが第一原理計算によって示された¹³⁾。また、低エネルギー励起を記述する有効ハミルトニアンも提案された¹⁴⁾。これに

Fig. 3. (color online). Band gap as a function of an external field.

よって、シリセンにおいてトポロジカル物性を議論することが可能になった。そもそも量子スピンホール効果はグラフェンで提案されたが、あまりにもスピン軌道相互作用が小さすぎて現実的ではなかった。その後、HgTe/CdTe の量子井戸で量子スピンホール効果は実験的に検証された。しかし、水銀とカドミウムは毒性が強く、実験が困難であるために、その後の研究は活発ではない。また、三次元トポロジカル絶縁体を実現する物質は数多く見つかったが、二次元トポロジカル絶縁体の実現例はまだほとんどない。この観点から、シリセンがトポロジカル絶縁体であることを実験的に確認できれば大変大きいインパクトがある。

ジグザグ・エッジとアームチェア・エッジ：ハニカム格子のエッジにはジグザグ・エッジとアームチェア・エッジがある。まず、グラフェン・ナノリボンではジグザグ・エッジには平坦バンドがあり、エッジに局在した波動関数が存在する。しかし、アームチェア・エッジにはそのような状態はない。一方、シリセンはトポロジカル絶縁体なので、ジグザグとアームチェアにかかわらずにエッジに局在した波動関数が存在する。ジグザグ・エッジの $k = \pi/a$ での波動関数の進入長がスピン軌道相互作用によらずにほとんど一原子であるのに対して、アームチェア・エッジでは進入長はスピン軌道相互作用の大きさに反比例する²⁰⁾。

シリセンがトポロジカル絶縁体であることを確認できるか：前述したように系がトポロジカル絶縁体であることを確認するためにはエッジ状態を見るのが一番手取り早い。二次元トポロジカル絶縁体のエッジ状態の存在を実験的に確認するためには STM で局所状態密度を測定し、エッジにピークを確認する方法と ARPES でエッジ状態のギャップレスモードを直接観測する方法がある。通常の ARPES では三次元トポロジカル絶縁体の表面状態は観測できるが、二次元トポロジカル絶縁体の表面状態は一次元になってしまい強度がきわめて小さくまだ観測に成功した例はない。しかし、ARPES の強度を上げたり、精度を上げていくことで片鱗は見え始めている。さらに光電子顕微鏡 (PEEM) や nano-ARPES のように nm スケールの空間分解能を有する ARPES や自由電子レーザー (FEL) など非常に強い輝度の光を用いた ARPES ができれば、二次元トポロジカル絶縁体のエッジ状態も見える時代が来るかもしれない。グラフェンではジグザグ・エッジのときには、エッジにするどいピークがたつことが知られている。このため、シリセンのジグザグ・エッジに局所状態密度のピークを観測しても、それがすぐにシリセンがトポロジカル絶縁体であることの証拠にはならない。一方、グラフェンのアームチェア

Fig. 4. (color online). (a) STM image and (b) dI/dV map of zigzag and armchair edges. See the details in Ref. 21), from which these figures are taken.

ア・エッジの波動関数はエッジに局在しないので、エッジに状態密度のピークは現れない。ところが、シリセンではトポロジカル絶縁体なので、エッジの形によらず、ヘリカルエッジ状態が存在し、エッジにピークが現れる²⁰⁾。STMの局所状態密度の実験で、ジグザグとアームチェア・エッジともに状態密度のピークが観測された²¹⁾ (Fig. 4)。まさに、シリセンがトポロジカル絶縁体である最初の証拠だと著者は喜んでいたが、表面科学の専門家の意見によると、金属表面との吸着構造など他の影響でもこのような状態密度が出ることもあるので、銀盤上のシリセンがトポロジカル絶縁体であると決めるのはまだ早計のようで今後の進展が待ち遠しい。

シリセン・ナノディスクのエッジ状態：実際のサンプルはナノリボンのように無限に長いわけではなく、閉じた境界を持つ有限のサンプルである。このようなシリセン・ナノディスクのエッジ状態を調べることは大変興味深い。特に興味があるのはラフな境界を持つ系のエッジ状態である。ラフな境界はジグザグとアームチェアが交互に現れている境界と見なせる。このような系を数値的に解析して、エッジ流が迂回しながら存在し続けることがわかった (Fig. 5)。これは、エッジ状態の存在がトポロジカルに保護されているので起こっている、と解釈できる。

銀基板上のシリセンにディラック電子は存在しているのか：現在のシリセンの実験に関しては、銀基板上のシリセンにディラック電子は存在しているのかという問題が重要である。前述したように、自立したシリセンの低エネルギー状態がディラック理論で記述されることは数多くの第一原理計算で確認されており、疑問の余地がない。一方、現状では、シリセンは基板上にしか合成されていないので、基板上でディラック電子が存在しているのかが重要になる。ジルコニウム上ではARPESの結果からもディラック電子がいるようには思えない。現在のシリセン・ブームの火付け役となった Guy Le Lay グル

Fig. 5. (color online). (a) Wave function of silicene nanodisk. (b) Current flows of silicene nanodisk. See the details in Refs. 22), from which these figures are taken.

Table 1. Correspondence between the superstructure of silicene and the structure of silver substrate. Indexes p and q specifies the superstructure of silicene.

Si-superstructure	Ag-structure	p	q	ratio
3×3	4×4	3	0	1.33
2×2	$\sqrt{7} \times \sqrt{7}$	2	0	1.32
$\sqrt{7} \times \sqrt{7}$	$\sqrt{13} \times \sqrt{13}$	2	1	1.36
$2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$	$\sqrt{21} \times \sqrt{21}$	2	2	1.32
$\sqrt{7} \times \sqrt{7}$	$2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$	2	1	1.31

ープの実験結果ではARPESによって、分散を測定したところ、線形分散が見えている。最近の実験ではさらに綺麗な線形分散が見えている²³⁾。しかし、実はAg(111)の表面状態を観測しているのではないかと、という見方もあり、注意が必要である。

一方、第一原理計算で銀基板上のシリセンの電子状態が東大の押山グループらによって、計算されている^{24,25)}。銀基板とシリセンの混合はかなり強く、ディラック電子はフェルミ面上には存在していない。

また、ランダウ準位を調べて、銀基板上のシリセンに自由電子がいるのかを確かめた実験も報告されている²⁶⁾。グラフェンの場合には磁場をかけて、状態密度を測定するとランダウ準位に起因するシャープなピークが観測される。同様の実験をシリセンで行ったところ、7テスラの磁場をかけても明確なピークが観測されなかった (Fig. 6)。これはシリセンには自由電子がないことを示唆している。しかし、サンプルの大きさが十分でない可能性や不純物の影響もあるかもしれないので、さらに精度の良い実験があると望ましい。さらに、ディラック電子特有のV字型の状態密度が現れているのも興味深い。

また準粒子干渉を用いた実験から線形分散が見えたという報告もある²⁷⁾。これに関してはさらに詳細な実験を行うと実際には線形からのずれがあるという報告もなされている²⁸⁾。

このように、現状では、銀基板上のシリセンにディラ

Fig. 6. (color online). (a) and (b) STM image and (b) DOS in silicene on Ag substrate. See the details in Refs. 26), from which these figures are taken.

Fig. 7. (color online). Illustrations of silicene superstructure and the Brillouin zone of silicene superstructure. See the details in Refs. 29), from which these figures are taken.

ック電子はいるのかに関しては双方の実験が存在し、議論の余地がある。いずれにせよ、他の基板でシリセンを合成することは重要である。

シリセンの超構造：基板の上にシリセンを合成すると自立した場合は違った構造になる。一般的に周期が自立シリセンより長くなり、超構造を構成する。銀基板上で一般的な構造を Fig. 7 に示す。単位胞に 18 個のシリコンがあるので、Brillouin ゾーンは 1/9 に折りたたまれる。この結果、K 点と K' 点が同一の場所に来てしまい、自立したシリセンとは異なるトポロジカルな性質を持つ。

一般的に基板上でどのような超構造が可能かを分類することが可能である²⁹⁾。超格子を生成するベクトルを $\mathbf{g}_1 = p\mathbf{a}_1 + q\mathbf{a}_2$ とすると、シリセンの単位胞の数は $N =$

$2|\mathbf{g}_1| = 2\sqrt{p^2 + q^2 + pq}$ で与えられる。一般的に $p \geq q$ を満たす超構造が可能である。Table 1 に銀基板上のシリセンでの典型的な超構造をまとめる。超構造の比がだいたい 1.3 であることは興味深い。根拠ははっきりとしないが、合成の際の基板選びの指針になると思う。

3.2 シリセンの合成

絶縁体上にシリセンを合成できるか：現在は銀、ZrB₂、イリジウムの三つの基板上でシリセンが合成されている。しかし、この三つの基板はどれも金属である。電気伝導度を測定するためには、基板が絶縁体でないと都合が悪い。また、将来的にシリセンを用いてデバイスを作製するためにも絶縁体上にシリセンを合成することは大変重要である。これに関して、hexagonal Boron Nitride 基板上や水素終端したシリコンの 111 面上にシリセンを成長させるとフェルミ面上にディラック・コーンが出現するという理論提案がなされている^{24, 25)}。また、グラフェン上のシリセンでもディラック・コーンが存在することが第一原理計算で示された³⁰⁾。実験的にはどの基板を用いるかというのがキーポイントである。まず、表面の対称性は六回対称性か三回対称性であることが望ましい。このため、111 面を使うのが適切であることが多い。次に重要なのが、シリセンの格子間隔と基板の格子間隔の比である。これは決定的なことは言えないが、一般的には簡単な比になっていると格子整合が良いことが期待できる。是非とも実験家にはいろいろな基板を試して頂きたい。

磁性体上にシリセンを合成できるか：磁場をかけると横方向に電流が流れる現象をホール効果という。十分低温ではホール伝導度が量子化されて量子ホール効果が発現する。磁場をかけなくても磁性体を貼り付けるとホール効果が起きることが知られていて異常ホール効果と呼ばれている。これも十分低温では量子化し、量子異常ホール効果となる。シリセンでも磁性体を貼り付けると量子異常ホール効果が起きると考えられる³¹⁾。鉄、マンガン、ニッケルなどの上でシリセンが合成できると大変面白い。

超伝導体上にシリセンを合成できるか：前述したようにシリセンは量子スピンホール効果を示すことが理論的に示されている。一方、量子スピンホール効果状態に超伝導体を近接させると色々面白い現象が期待できる。たとえば、試料の端に出るヘリカル・エッジ状態に超伝導を近接効果で導入するとマヨラナ粒子が発現する。また、超伝導を近接させると量子スピンホール絶縁体から自明な絶縁体へギャップを閉じずに相転移できるなど面白い現象もある³²⁾。実は既にイリジウム基板上でシリセンの合成に成功しているが、イリジウムは 0.1 K で超伝

導になる。イリジウム基板上のシリセンを低温にすると何か面白いことが起きるかもしれない。

自立したシリセンを作製できるか：基板上にシリセンを合成すると基板の影響を多かれ少なかれ受けてしまう。究極的にはシリセンを自立 (free standing) した状態にするのが理想的である。グラフェンの場合には実際、サンプルを自立させることができ、大変美しい実験データが得られている。できるだけ基板との相互作用の小さい基板上にシリセンを作製し、引きはがすのが理想的である。他の方法としては、基板上にシリセンを合成してから、基板のみを溶かすという方法も考えられる。

3.3 ゲルマネン, スタネン, …

グラフェンが炭素のハニカム格子で、シリセンがシリコンのハニカム格子なのだから、同様に、ゲルマニウムやスズ、鉛でもハニカム格子を組むことができるのではないかと考えるは自然である。実際にそれらについて第一原理計算で計算がされており、構造安定であり、低エネルギー励起はディラック理論で記述される¹³⁾。以下の表に第一原理計算で求めた値を掲載する¹⁴⁾。理論的にはゲルマネン (germanene) やスタネン (stanene)³³⁾もシリセンと同じハミルトニアンで記述され、パラメータを入れ替えるだけで良い。パラメータを **Table 2** に示す。

この表を見るとゲルマネンのスピン軌道相互作用がとても大きいことがわかる。室温でも量子スピンホール効果を示すことが期待できる。実験的には、ゲルマネンもスタネンも合成されていない。これらの合成は表面科学として大変チャレンジングである。問題は基板に何を使うかである。シリセンよりも格子間隔が大きい、銀より重い元素の基盤を使うと良いかもしれない。

3.4 二層シリセン・多層シリセン

グラフェンでは二層、三層のサンプルを作成することができ、バンド構造が変化するなど大変興味深い性質がある。シリセンでも銀基板上で、二層のシリセンが作成されている。二層シリセンの電気的性質も興味深い³⁴⁾。二層グラフェンの場合には面間結合が弱いですが、二層シリセンの場合はむしろ面間結合の方が面内結合よりも強いという第一原理計算の結果がある。これはシリセンでは

sp³ 軌道の混成があり、ダイヤモンド格子に近い性質を持っていることと関係していると思われる。二層シリセンの ARPES でもディラック分散が見えたという実験の報告がある³⁵⁾。

さらに三層以上の多層シリセンも面白い。実験的には多層シリセンはかなりの枚数まで積層できるようである。電気的性質に枚数依存性が表れるか等、興味は尽きない。一般的に銀基板の影響は枚数が増えるほど、すくなくとも期待される。

3.5 シリセンで高温超伝導？

シリセンではなんと 40 K の超伝導が出るという実験の報告がある³⁶⁾。これは STM で状態密度を測定したところ、ギャップが開いており、40 K を超えたところでギャップが消失したという実験である。色々追試が試みられているが、まだ追試に成功したという報告はない。本当に超伝導ギャップなのか等の疑問が現在の時点では残っているが、本当であればシリセンで高温超伝導が実現していることになり、画期的な成果である。ちなみに、理論でも 10 K の BCS 超伝導が起きるという計算もある³⁷⁾。また、二層シリセンでは d+id' 波の超伝導が出るという予言もある³⁸⁾。このようにシリセンは超伝導の観点からも大変面白い現象が期待できる。

3.6 シリセンで強相関電子系？

グラフェンは電子間相互作用が小さい系である。これは炭素が軽元素であるためである。シリコンは炭素よりは重たいので、シリセンの電子間相互作用はグラフェンよりは強いと思われる。しかし、シリセンの電子間相互作用についてはまだ、ほとんどわかっていない。たとえば遮蔽効果がどれぐらいなのか、というのは興味深い。グラフェンでは遮蔽効果がほとんどないことが知られている。シリセンはグラフェンよりは遮蔽効果が強いと思われるが、定量的な解析が望まれる。グラフェンでは電子間相互作用によって、自発的にギャップが開き、ホール効果が起きる「自発的ホール効果」が提案されたが、クーロン相互作用が臨界点よりわずかに小さく、実際には実現しない。シリセンではこの「自発的ホール効果」が起きる可能性がある。さらに、相互作用が強く遮蔽も強いなら、Kane-Mele-Hubbard 模型で記述されることになり、トポロジカル・モット絶縁体を実現する可能性もある。通常のシリコンは電子間相互作用のない半導体でよく記述されることが知られているので、シリセンが強相関電子系である可能性は高くない。いずれにせよ、シリセンの電子間相互作用についての研究はまだなく、今後の進展が望まれる。

3.7 シリセンでトポロジカル・デバイス？

シリセンに電場をかけるとバンドギャップが制御でき

Table 2. Material parameters of grapheme, silicene and germanene. Transfer energy, Fermi velocity, lattice constant, spin-orbit interaction, Rashba interaction, layer distance and buckled angle.

	t (eV)	v_F (10 ⁵ m/s)	a (Å)	λ_{SO} (meV)	λ_{R2}	ℓ	θ
Graphene	2.8	9.8	2.46	10 ⁻³	0	0	90
Silicene	1.6	5.5	3.86	3.9	0.7	0.23	101.7
Germanene	1.3	4.6	4.02	43	10.7	0.33	106.5

ることを前述した。電場は空間的変調させることができるので、バンドギャップを空間的に自在に変化させることができる。また、臨界電場付近で制御できれば、トポロジカル相転移を空間分解で実現できる。つまり、ある特定の領域だけをトポロジカル絶縁体にするのができ、エッジ状態を発生させることが可能である¹⁷⁾。

また、エッジ状態を用いたトポロジカル・デバイスも考えることができる。トポロジカル相ではエッジ状態があり、ナノリボンを作成すると量子化した伝導度を持つ。一方、自明な相ではエッジ状態はないので、伝導度はゼロである。よって、電場によるトポロジカル相転移にともなって伝導度を制御できる³⁹⁾ (Fig. 8)。トポロジカルなエッジ状態は不純物などに対してロバストなので、微細化したときに有効である。以上の性質から電界誘起トポロジカル量子トランジスターと名付けるのが適当である。

Fig. 8. (color online). Band structure, DOS and conductance of zigzag silicene nanoribbons for (a) the QSH insulator phase, (b) the metallic phase at the phase transition point, and (c) the trivial insulator. See the details in Refs. 39), from which these figures are taken.

Fig. 9. (color online). (a) Illustration of topological Krichhoff law. (b) and (c) Topological electronic circuit made of topological edge states.

さらに、三種類のトポロジカル絶縁体を持ってくるとトポロジカル・エッジ状態を用いて Y-junction を作成することができる⁴⁰⁾ (Fig. 9)。それぞれのエッジ状態を持つトポロジカル量子数を隣接する二つのトポロジカル絶縁体の量子数の差で定義する。接合の場所ではこれらの和は保存する。これは接合系の電流に対する保存則である Kirchhoff 則にならってトポロジカル Kirchhoff 則と呼ぶべきものである。

4. ま と め

シリセンに関して現状と今後の課題について思いつくり纏めた。シリセンに関しては2012年の実験の報告以来、研究が急速に進展している。今後の進展が楽しみな分野である。特に新規に参入する研究者が増えてくれれば、この上ない喜びである。最後に色々議論・ご指導して下さい永長直人先生、青木秀夫先生、内田慎一先生、安藤恒也先生、勝本信吾先生、Guy Le Lay 先生、長谷川修司先生、高木紀明先生、高村由起子先生、平山博之先生、小森文夫先生、斎藤晋先生、押山淳先生、白石賢二先生、上田正仁先生、田仲由喜夫先生、平原徹先生に感謝致します。

文 献

- 1) 江澤雅彦: 固体物理 **48**, 4 (2013).
- 2) 高村 (山田) 由起子, アントワニス・フロランス, ライナー・フリードライン, 尾崎泰助: 日本物理学会誌 **68**, 305 (2013).
- 3) 固体物理 特集号: ディラック電子系の固体物理 No. 11 (2010).
- 4) 表面科学 特集: トポロジカル絶縁体, 173 (2011).
- 5) 初貝安弘, 青木秀夫: 固体物理 No. 9, 457 (2010).
- 6) 村上修一: 固体物理 No. 9, 477 (2010).
- 7) 村上修一, 平原 徹, 松田 巖: 日本物理学会誌 **65**, 840 (2010).
- 8) K. Takeda and K. Shiraishi: Phys. Rev. B **50** 14916 (1994).
- 9) P. Vogt, P. De Padova, C. Quaresima, J. Avila, E. Frantzeskakis, M.C. Asensio, A. Resta, B. Ealet and G.L. Lay: Phys. Rev. Lett. **108**, 155501 (2012).
- 10) C.-L. Lin, R. Arafune, K. Kawahara, N. Tsukahara, E. Minamitani, Y. Kim, N. Takagi and M. Kawai: Appl. Phys. Express **5**, 045802 (2012).
- 11) A. Fleurence, R. Friedlein, T. Ozaki, H. Kawai, Y. Wang and Y. Yamada-Takamura: Phys. Rev. Lett. **108**, 245501 (2012).
- 12) L. Meng, Y. Wang, L. Zhang, S. Du, R. Wu, L. Li, Y. Zhang, G. Li, H. Zhou, W.A. Hofer and H.-J. Gao: Nano Lett. **13**, 685 (2013).
- 13) C.-C. Liu, W. Feng and Y. Yao: Phys. Rev. Lett. **107**, 076802 (2011).
- 14) C.-C. Liu, H. Jiang and Y. Yao: Phys. Rev. B, **84**,

- 195430 (2011).
- 15) H. Min, J.E. Hill, N.A. Sinitsyn, B.R. Sahu, L. Kleinman and A.H. MacDonald : *Phys. Rev. B* **74**, 165310 (2006).
 - 16) Y. Yao, F. Ye, X.-L. Qi, S.-C. Zhang and Z. Fang : *Phys. Rev. B* **75**, 041401 (R) (2007).
 - 17) M. Ezawa : *New J. Phys.* **14**, 033003 (2012).
 - 18) M. Ezawa : *Phys. Rev. Lett.* **110**, 026603 (2013).
 - 19) M. Ezawa : *Phys. Rev. B* **87**, 155415 (2013).
 - 20) M. Ezawa and N. Nagaosa : *Phys. Rev. B* **88**, 121401 (R) (2013).
 - 21) B. Feng, H. Li, C.-C. Liu, T. Shao, P. Cheng, Y. Yao, S. Meng, L. Chen and K. Wu : *ACS Nano* **7**, 9049 (2013).
 - 22) K. Kikutake, M. Ezawa and N. Nagaosa : *Phys. Rev. B* **88**, 115432 (2013).
 - 23) J. Avila, P. De Padova, S. Cho, I. Colambo, S. Lorcy, C. Quaresima, P. Vogt, A. Resta, G. Le Lay and M.C. Asensio : *J. Phys. : Condens. Matter* **25** 262001 (2013).
 - 24) Z.-X. Guo, S. Furuya, J. Iwata, A. Oshiyama : *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 063714 (2013).
 - 25) Z.-X. Guo, S. Furuya, J. Iwata, A. Oshiyama : *Phys. Rev. B* **87**, 235435 (2013).
 - 26) C.-L. Lin, R. Arafune, K. Kawahara, M. Kanno, N. Tsukahara, E. Minamitani, Y. Kim, M. Kawai and N. Takagi : *Phys. Rev. Lett.* **110**, 076801 (2013).
 - 27) L. Chen, C.-C. Liu, B. Feng, X. He, P. Cheng, Z. Ding, S. Meng, Y. Yao and K. Wu : *Phys. Rev. Lett.* **109**, 056804 (2012).
 - 28) R. Arafune, C.-L. Lin, R. Nagao, M. Kawai and N. Takagi : *Phys. Rev. Lett.* **110**, 229701 (2013).
 - 29) M. Ezawa : *Eur. Phys. J. B* **86**, 139 (2013).
 - 30) Y. Cai, C.-P. Chuu, C.M. Wei and M.Y. Chou : *Phys. Rev. B* **88**, 245408 (2013).
 - 31) M. Ezawa : *Phys. Rev. Lett.* **109**, 055502 (2012).
 - 32) M. Ezawa, Y. Tanaka and N. Nagaosa : *Sci. Rep.* **3**, 2790 (2013).
 - 33) Y. Xu, B. Yan, H. -J. Zhang, J. Wang, G. Xu, P. Tang, W. Duan and S.-C. Zhang : *Phys. Rev. Lett.* **111**, 136804 (2013).
 - 34) M. Ezawa : *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 104713 (2012).
 - 35) P. De Padova, P. Vogt, A. Resta, J. Avila, I. Razado-Colambo, C. Quaresima, C. Ottaviani, B. Olivieri, T. Bruhn, T. Hirahara, T. Shirai, S. Hasegawa, M.C. Asensio and G.L. Lay : *Appl. Phys. Lett.* **102**, 163106 (2013).
 - 36) L. Chen, B. Feng and K. Wu : *Appl. Phys. Lett.* **102**, 081602 (2013).
 - 37) W. Wan, Y. Ge, F. Yang and Y. Yao : *EPL*, **104**, 36001 (2013).
 - 38) F. Liu, C.-C. Liu, K. Wu, F. Yang and Y. Yao : *Phys. Rev. Lett.* **111**, 066804 (2013).
 - 39) M. Ezawa : *Appl. Phys. Lett.* **102**, 172103 (2013).
 - 40) M. Ezawa : *Phys. Rev. B* **88**, 161406 (R) (2013).