

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540340

研究課題名（和文）電子系が有する幾何学的位相効果の光誘起変化

研究課題名（英文）Photoinduced phenomena originated from electron geometrical phases

研究代表者

井上 純一（INOUE JUNICHI）

独立行政法人物質・材料研究機構・理論計算科学ユニット・主任研究員

研究者番号：90323427

研究成果の概要（和文）：

2次元トポロジカル絶縁体、及び3次元トポロジカル絶縁体の表面状態を対象とし、電子の幾何学的位相に起因する物性を外部から制御する方法として、光照射することで電子の運動エネルギーが外部からの可制御パラメータになることを示し、これを利用することで時間反転対称性を持たない系ではチャーン数を、時間反転対称性を持つ系ではZ2位相不変量、あるいはこれと等価であるスピンチャーン数が可変になることを見いだした。これは電荷輸送およびスピン輸送など電子系が有する幾何学的位相が本質的な役割を果たす現象が、光照射することで光誘起変化することを意味している。

研究成果の概要（英文）：

For two-dimensional topological insulators and a surface state states on three-dimensional topological insulators, we demonstrated that an electron and spin Hall current can be controlled by an application of continuous laser beam. Underline physics of these phenomena is that the application of the laser field turns a electron hopping energy into a variable, and thus topological invariants that are uniquely fixed by given material parameters in turn become externally controllable variables. Consequently, we can expect quantized electron and spin Hall current can be photo-induced under an appropriate condition.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：光物性

1. 研究開始当初の背景.

物質系に光を照射して物質系の状態を変化させたり、さらには制御しようとする研究が盛んに行われている。これまでに、光照射に

よる金属・絶縁体転移や、磁性・非磁性転移が実際におこることが報告されている。2状態を行き来するこれらの現象は、原理的にスイッチングデバイスに応用できる可能性を

示し、さらには、転移が1次である場合には、フラッシュメモリに変わる次世代不揮発メモリとしても利用できる可能性がある。また、GaAs 半導体などでは、テラヘルツ光を照射すると、バンドギャップ内にあらたな吸収帯域が誘導されるなど、光が電子のバンド構造を変化させていることを如実に示す実験も報告[Phys. Rev. Lett. 93, 157401 (2004)]されている。これらの現象は、光をパルス照射した際に得られる。このような光の On/Off による状態変化は、光の有無に対応した物質系の最小エネルギー状態の変化として理解する事ができる。この範囲においても多彩な現象を示すが、光が持つ強度・周波数などの自由度を活用する余地がまだ残されている。そこで、照射光がもつこれらの自由度を適切に時間変化させることによって、物質系が高機能性を示し、将来の素子利用に繋がるような、能動的物質制御が実現する可能性があると考えた。ここで発現する現象は、あきらかに熱の効果ではなく光照射による効果であると言える。光の自由度の時間変化を利用する場合の利点としては、その時間変化の設計を適切にすることにより物質系を望みの状態に誘導できる可能性があることである。理論展開としては、連続光が電子系を記述するハミルトニアンにパラメータを導出し、そのパラメトリックハミルトニアンを用いることによって電子系の議論が可能になると予想される。

2. 研究の目的

(1)連続光照射された電子系の問題は、本来時間依存の問題である。更に加えて、照射光の強度・周波数などの自由度も時間に依存する、いわば2重の意味で時間に依存した問題を扱う。従来の理論的枠組みには、この範疇の問題を扱う手法はなく、またブルートフォース的な数値計算手法に頼るのでは、物理的な理解に到達しないと考えられる。そこで、2重に時間に依存した問題を扱えるような解析手法の構築を行い、照射光の効果を取り込んだ電子系のパラメトリックハミルトニアンを導出する。

(2)照射光の効果を取り込んだ電子系の有効ハミルトニアンのパラメータが断熱パラメータと見なせる場合を考える。この場合には、電子系が持つベリー位相に光学的手法による効果が期待できる。例えば、Resta[Rev. Mod. Phys. 66, 899 (1996)]や King-Smith 等 [Phys. Rev. B47, 1651 (1993)]が構築したベリー位相に基づく電気分極理論を適用できる。そこで導入されているパラメトリックハミルトニアンに含まれる断熱パラメータは計算上の仮想的な対象であった。本研究では、これが光学的な操作と結合した実在のパラメータとして機能しており、実際上の電気分

極制御の可能性を考える。光照射によって電気分極がおこる事は当然であるが、例えば光強度の増加に対して誘起される電気分極が単調に増加するのではない、など非自明な効果を議論する。

(3)幾何学的位相に対する効果として、光照射によるチャーン数変化を議論する。チャーン数とは位相不変量の1つであり、整数量子ホール効果におけるホール伝導度に比例することが知られている。近年、ゼロでないチャーン数で特徴付けられるバンド絶縁体の新しいクラスとしてチャーン絶縁体が発見され、通常のバンド絶縁体との相転移というアイデアも提出されている [Phys. Rev. B74, 235111(2006)]. この相転移は、将来の先進的な物質相制御に繋がる大きな可能性を示唆していると思われる。しかし、これまでのところ、実際にどのように相転移を起こすかについては策が報告されていない。そこで、本申請では、連続照射光の持つ自由度を変化させ、通常のバンド絶縁体とチャーン絶縁体との転移を引き起こすことを考える。これは幾何学的量子相転移の一種であり、様々な研究領域への波及効果が期待できる。

3. 研究の方法

強度・周波数が時間依存性を持つ光(以下「時間変動光」と称する)が連続的に照射されている電子系を対象とする。断熱仮定とフロケットの定理を組み合わせることにより、照射光の効果を取り込んだ電子系の有効ハミルトニアンを、光によって操作可能なパラメータを含むパラメトリックハミルトニアンの形に定式化する。このハミルトニアンを用いて、電子系の状態を光学的に操作・制御することを考える。特に、電子系の幾何学的位相効果に引き起こす変化を議論する。

(1)時間変動光が連続的に照射されている電子系を記述する有効ハミルトニアンの導出。ここで参考とする事実、1次元系に連続光照射をすることで発現する「動的局在 (=dynamic localization)」という現象である。その本質は、光照射によって電子のホッピングエネルギーが実効的に変更されることであって、その内容は、もともとの値にベッセル関数を乗じた形になり、ベッセル関数の引数は光強度と周波数の比に比例することである。「動的局在」では1次元系固有の議論がなされており、そのままでは2次元以上の系に適用できず、また結果の適用範囲も明確でない。そこで、まず、動的局在と同等の結果を、2次元以上でも適用でき、かつ適用範囲が明確になる方法で再定式化する。

(2)格子上を運動する電子が、連続的な時間変動光と相互作用している系を考え、パラメトリックハミルトニアンを導出する。

まず、電子間相互作用、スピン軌道相互作用が無いタイトバインディング模型とする。照射する光の時間変動が、その周波数に比べて十分遅い場合、断熱仮定が適用できるので、議論すべき問題は周期を持った時間に依存する問題になる。すると、フロケットの定理が適用でき、固有値問題に焼き直せる。この固有値問題の行列は、電子系の状態と照射した光子の数状態の積を基底にして与えられ、ブロックハミルトニアンから構成される。その対角ブロックは光子の数が一定の部分空間に対応する。有る条件下では、電子系の振る舞いは、光子の数がゼロ個の部分空間に対応するブロックハミルトニアンで近似できる。この実効的な電子系のハミルトニアンのホッピングエネルギーは、動的局在が与える結果と同値になることが示され、これより、ホッピングエネルギーをパラメータとするパラメトリックハミルトニアンを得る。

(3) 1次元電子系への適用。

ポリアセチレンなど、単位胞に2原子を含む系をとり、鎖方向に分極した時間変動光を連続的に照射する場合を考える。この電子系の有効ハミルトニアンに対しベリー位相に基づく電気分極理論を適用する。ここで、導入されたパラメータが計算のための仮想的なパラメータではなく、物理的実態を持ったパラメータである点が従来と異なる事を強調する。ここでの扱いは、光と電子系の相互作用を非摂動的に取り込んだことに相当するので、得られる電気分極も線形応答の範囲を超えている。例えば、誘導される電気分極も光強度の単調関数ではなく、ベッセル関数の振動性を反映した振動を示す等、非自明な結果が期待される。

(4) 2次元電子系への適用。グラフェンや窒化ボロン(BN)シートなど蜂の巣格子上を運動する電子に時間変動光を連続照射する事を考え、電子系の有効ハミルトニアンを導出する。1次元系との違いは、照射する偏光面の選択が顕著な違いをもたらすことである。直線偏光の場合は、電子の運動のうち偏光方向への射影成分が強く変調をうけるので、結果として有効ハミルトニアンの対称性はもともと持っていた格子形の対称性とは大きく異なる。それに対して、円偏光では各方向を均等に調をかけるので、もともとのハミルトニアンの対称性を保つ。従って、グラフェンなどディラク型のエネルギースペクトルを持つ場合、このスペクトル形状は保持され、円偏光による変調はフェルミ速度、つまり、ディラク型スペクトルの開き具合の変化として現れる。この有効ハミルトニアンに対して、1次元と同様に電気分極を議論する。Kane等によって指摘されたように[Phys. Rev. Lett. 88, 056803 (2002)], このままでは2つのディラク点からの寄与が相殺するので、

これを回避する方法として2次元面を丸めてチューブを形成し、そこでの電気分極を議論する。

(5) トポロジカル数の光制御。時間変動光を用いて、位相不変量の1つであるチャーン数を変化させることを考える。バンド絶縁体は、チャーン数がゼロである通常絶縁体と、ゼロでないチャーン数をもつチャーン絶縁体とに分類される。一方から他方の絶縁状態へと転移が起こった場合に期待される電子系の振る舞いの違いは議論されているが、実際に転移を起こす方法は未解決である。そこで、時間変動光を用いて、チャーン数を変化させ、通常絶縁体とチャーン絶縁体との光誘起転移を議論する。対象とする系は、チャーン絶縁体を与える最も簡単な模型であるハルデイン模型である。これはBNシートを記述するハミルトニアンに、第2近接ホッピングを加えたものである。時間変動光の実効的な効果は、電子のホッピングエネルギーに変調を与えることである点はこれまでと同様である。照射する光強度の関数としてチャーン数を求め、チャーン絶縁体の相関を求める。さらに、実験的検証可能性についても議論する。同様の考察をスピンチャーン数に対しても行う。

4. 研究成果

(1) エネルギー散逸無しに電流が流れる現象の1つに量子ホール効果がある。この現象は、純度の高い2次元電子系に強磁場を印可し、ランダウ準位に分裂した電子エネルギー帯間に化学ポテンシャルが位置するとき、直流伝導度がゼロであるのに対し、ホール伝導度が量子化された値を取る現象である。直流伝導度がゼロであることから、ホール電流の発生に伴うジュール熱は発生しない。ここで量子化されたホール伝導度は、系のトポロジカルな性質として理解され、チャーン数と呼ばれる位相不変量で特徴付けられる。この量は空間反転対称性と時間反転対称性が共に破れている状況で有意な値をとり得ることから、この現象は磁場の印可が避けられないと理解されていたが、最近ハルデインによって、2次元蜂の巣構造の在る状況下では磁場の印可を必要とせず整数量子ホール効果が実現することが示された。この系は2次元トポロジカル絶縁体の最初の提案である。ここで例示されたハルデイン模型では、チャーン数は系を特徴付けるパラメータによって一意に定められるものなので、外因的要素によって変更をうけない「物質定数」であるが、これを外部から制御するために、円偏光照射を考える。連続光を照射された電子系は時間的にも周期的になることから、フロケットの定理が適用可能になる。このとき、電子の自由度に加え光子の自由度も基底にとった、拡張さ

れたヒルベルト空間の状態ベクトルとして系が指定されるが、そこで、着目するエネルギースケールに対応する有効ハミルトニアンを導出すると、照射した光の強度の関数として電子の運動エネルギーが変更を受けることが示される。このことは電子の運動エネルギーを照射する光強度で制御できることを意味し、その結果として、チャーン数が照射光強度によって変化する。この結果を、横軸に時間反転対称性の破れの度合いを表すパラメータ、縦軸に空間反転対称性の破れの度合いを表すパラメータ、奥行き軸に照射する光強度をとってチャーン数をプロットして得られる相図が図1である。2枚の皮で挟まれた領域が有限のチャーン数 C を持つ領域で有り、その値は+1 か-1 の二通りで与えられることをしめす。以上から、光照射によって整数量子ホール効果が誘起されることが示されたが、照射した円偏光が通常の整数量子ホール効果を誘起する静磁場と等価な役割を果たしていると解釈できる。

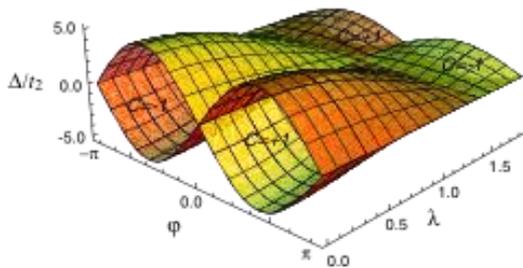


図1. チャーン数 C の光誘起変化

(2) 次に、空間反転対称性は破っているが、時間反転対称性は保たれている系でも同様の現象を考える。対称性の観点からは、時間反転対称性が保たれていることにより電荷の量子ホール効果はあり得ないが、スピンの量子ホール効果は存在しても良い。実際グラフェンや、HgTe 量子井戸、あるいは3次元トポロジカル絶縁体の表面状態でこのような現象が観測されるとする理論予想がなされた。この現象を特徴付ける量は、 Z 2位相不変量、あるいはこれと等価なスピンチャーン数である。これらの量も、系を特徴付けるパラメータによって一意に定まる不変量であるから、そのままでは「物質定数」であるが、(1)と同様のアイデアを用い、電子の運動エネルギーを照射した光強度で可制御変数とすることで、 Z 2位相不変量、あるいはスピンチャーン数が外部から制御可能になることを示した。図1に対応する相図を描いたものが図2であり、光照射することでスピンチャーン数 C_s が変化することが示されている。ここで得られた成果は、スピントロニクスなどスピン輸送に基づくデバイス応用する際

に重要になると期待できる。

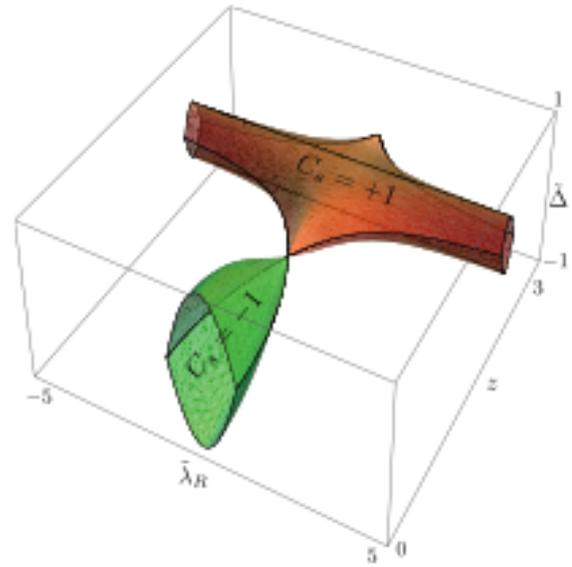


図2. スピンチャーン数 C_s の光誘起変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

1. Jun-ichi Inoue, 査読有り, An optical test for identifying topological insulator thin films, *Optics Express* 21, 2013, 8564-8569
2. Jun-ichi Inoue and Akihiro Tanaka, 査読有り, Photoinduced spin Chern number change in a two-dimensional quantum spin Hall insulator with broken spin rotational symmetry, *Physical Review* B85, 2012, 125425/1-125425/7
3. Jun-ichi Inoue, 査読有り, Valley-contrastive selection rules of a nonlinear optical transition in graphene with an energy gap, *Physical Review* B83, 2011, 205404/1-205404/5
4. Jun-ichi Inoue, 査読有り, Optical tuning of Berry phase effect in topological insulators, *Journal of Luminescence*, 131, 2011, 482-485
5. Jun-ichi Inoue and Akihiro Tanaka, 査読有り, Photoinduced transition between conventional insulators in two-dimensional electronic systems, *Physical Review Letters* 105, 2010 017401/1-017401/4

[学会発表] (計1件)

Jun-ichi Inoue, Optical tuning of Berry phase effect in topological insulators,

17th international conference on dynamical
processes in excited states in solids,
2011/07/25 シカゴ(アメリカ)

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 純一 (INOUE JUNICHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・理論計
算科学ユニット・主任研究員

研究者番号：90323427

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし