

氏名（本籍地）	張 博源			
学位の種類	博士（工学）			
学位記番号	博 甲 第 9789 号			
学位授与年月日	令和 3年 3月 25日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	Creation of Floquet Dirac semimetals in laser-driven semiconductor quantum wells (レーザー駆動半導体量子井戸におけるフロケディラック半金属の創成)			
主査	筑波大学教授	工学博士	日野 健一	
副査	筑波大学教授	理学博士	黒田 眞司	
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	鈴木 修吾	
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	藤岡 淳	
副査	筑波大学講師	博士(理学)	前島 展也	

論 文 の 要 旨

本論文は、光制御によって擬2次元電子系である半導体量子井戸内にDirac半金属相を創成することができることを理論的に予見し、付随して発現する結晶端の特異な電子状態(エッジ状態)の特性を明らかにしたものである。この論文は、次のように構成されている。第I章の序論に続いて、第II章で理論的な枠組みを記し、第III章で結果及び考察を行い、第IV章でまとめと結論を記載している。さらに、8つの補足を付記している。

第I章において、最初に、量子スピンホール効果の理論的提案・モデル化から実験による実証とトポロジカル絶縁体発見までの近年の歴史的な経緯が記載され、さらに最近注目されているトポロジカル半金属(Dirac, Weylならびに線ノード半金属)相への研究の展開を概説している。また、このようなトポロジカル物質には、通常のデバイスでは実現し得ない新規な応用への可能性が内在していることにも言及している。一方、基底状態におけるトポロジカル物性研究に並行して、時間周期性を有する外場によって誘起される非平衡系におけるトポロジカル状態(Floquetトポロジカル状態)の研究の現状に関する説明が行われている。さらに、Floquetトポロジカル状態には基底状態では見出しえない未知な物理的知見が内在している可能性を指摘し、このような非平衡状態・励起状態におけるトポロジカル物性研究の重要性を強調している。このような背景のもとで、この論文では、理論計算を基に、半導体量子井戸に直線偏光の連続波レーザーを照射することによってDirac半金属(Floquet-Dirac半金属)相が創成し得る可能性を精査し、それに伴うエッジ状態の物性を明らかにすることを目的としている。

第II章はA-Hの8つの節から構成されている。第II-A～II-C節において、トポロジカル物質研究の標準的な理論模型の一つであるBernevig-Hughes-Zhangモデルに電子と連続波レーザーとのバンド間およびバンド内双極子相互作用を導入したモデルを構築している。第II-D節において、当該の全物理系における対称性を明らかにし、Floquet-Dirac半金属創成に際して必須となるFloquetバンド間の円錐交差(Dirac

交差)の形成条件に関して言及している。第II-E節において、Floquet定理の帰結としてレーザーと電子の相互作用が繰り返された光着衣バンド(Floquetバンド)が導入されている。さらに、これに伴って発現が期待されるエッジ状態に関する理解を深化させるため、2つの境界条件[すなわち、エッジの方向に対する直線偏光レーザー電場が平行(境界条件A)か垂直(境界条件B)かによる方向依存性]を設定することを提示している。第II-F節において、Floquet-Dirac半金属状態を実現するために、バンド間の共鳴的な光励起に起因するac-Stark効果によってFloquetバンドの反転・交差を誘起する非線形光学機構が提案されている。さらに、第II-G~II-H節において、バルクとエッジ間の対応の統一的な理解を得るために、レーザーによる電子の誘起分極(パリティ混合の程度に対応)とFloquetバンドのChern数を導入している。

第III章はA-Gの7つの節から構成されている。第III-A節において、境界条件A下でレーザー電場の大きさの広範な領域においてFloquetバンドと付随するエッジ状態を計算した結果を示し、2次元Bloch運動量空間におけるFloquetバンドの反転およびDirac交差の発現パターンを明らかにしている。特に、FloquetバンドがDirac交差して偶然4重縮退を示すBloch運動量空間の位置(Γ 点、 X_2 点および X_1 点)と電場の大きさを特定し、これらが数学的に導出した対称性等に基づく交差の形成条件と厳密に一致することを示している。また、電場の大きさのある特定の領域において、Dirac交差のほかに、エネルギー差が1meV程度の微細なギャップを有する反交差(近似的な4重縮退)が発現することを見出し、これらが電場の大きさの変化に対して運動量空間内を移動しながら安定に存在することを示している。

第III-B~III-D節において、ディラック交差がそれぞれ Γ 点、 X_2 点および X_1 点に発現する電場の近傍におけるFloquetバンドの変調パターンと付随する境界条件A下のエッジ状態を計算した結果を示している。特に、円錐交差が現れるDirac半金属相には、特異なエッジ状態(Dirac-Tamm状態)が発現し、電場の大きさの変化に応じて非自明なエッジ状態(トポロジカルエッジ状態)もしくは自明なエッジ状態(非トポロジカルエッジ状態、Tamm状態)へ連続的に相転移することを見出している。さらに、2次元運動量空間における誘起分極の分布を計算し、その値がゼロになる等値線が上記のエッジ状態の発現領域と整合する対応関係を見出している。また、FloquetバンドにおけるChern数の変化も誘起分極の分布の変化によって説明できることを示している。以上のように、誘起分極によってFloquetバンドにおけるトポロジカル秩序の変化を統一的に説明できることを見出している。

第III-E節において、境界条件B下のエッジ状態の計算結果を示し、上記で示した境界条件A下でのエッジ状態と比較している。具体的には、境界条件B下では、境界条件A下と異なり、有意なエッジ状態が現れることがないことを示している。さらに、このような境界条件依存性は、誘起分極のゼロ等値線によって一意に説明できることを示している。第III-F節において、第III-A節で言及した近似的な4重縮退に関する詳細な議論を行っている。とりわけ、これが発現する物理的な起因および境界条件A下でのエッジ状態の発現に決定的に重要な役割を果たしていることを示している。第III-G節において、ここで見出した3種類のエッジ状態(すなわち、トポロジカルエッジ状態、Dirac-Tamm状態およびTamm状態)における電子の局在性・非局在性に関して議論している。とくに、Dirac-Tamm状態は、交差点の極近傍ではバルクにおける円錐交差する連続状態と結合するため非局在化し、他の領域ならびに他のエッジ状態とは異なる振舞をすることを数値的に示している。

第IV章において、本研究の総括を行い、さらに特筆すべき新規性を列挙している。とりわけ、Floquet-

Dirac半金属相創成の理論的な予見と特異なエッジ状態の発現の可能性を強調している。さらに、近似的な4重縮退がレーザー電場の変化に対して安定に存在することに起因して、境界条件A下の当該Floquet系のエッジ状態とジグザグ境界条件下のグラフェンリボンに現れるエッジ状態の間に緊密な類似性があることを指摘している。また、この研究で見出されたDirac半金属相と関連するエッジ状態を観測するため、実験法を提案しその可能性に関して言及している。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

- 予備審査におけるプレゼンテーションと比較して、スライドの内容や発表原稿が十分準備されたとの指摘があった。
- 半導体量子井戸に高強度のパルスレーザーを照射して生成される電子の光伝導度を測定する実験法の提案に関して、高密度励起された電子の緩和時間やパルス幅から見積もられるエネルギー分解能が、この研究で予見しているバンド反転したギャップやエッジ状態のエネルギー準位を観測するうえで十分か否か質疑があった。ここで提案された実験法はまだ具体性が十分ではないため、当該系のFloquetバンドの計算だけでなくパルスレーザーに誘起される量子ダイナミクスを取り込んだ研究の必要性がある旨回答された。
- この研究はパリティが異なる半導体量子井戸の sp バンド間の光遷移に基づくものであるが、 pp バンドのようなパリティが同じ場合にもFloquet-Dirac半金属相や付随するエッジ状態が生成し得るかどうか質疑があった。パリティが同じ場合、レーザーと電子の相互作用を含めた全系の対称性が当該系と異なってくるが、本研究での解析と同様な手法でFloquetバンドの交差条件を導出することは可能である旨回答があった。さらに、 pp バンド間の共鳴的な光遷移過程は支配的でなくなるため、二光子過程による光遷移を考慮したac-Stark効果を検討する必要があることが付加された。
- この研究の成果はScientific Reports誌に掲載済であるが、発表者の貢献度が数値計算を遂行した以外にどれほどあったかという指摘があった。指導教員の助力がある程度必要であったことは確かであったが、誘起分極の計算結果に対するバルク-エッジ対応の解釈など本研究の重要なポイントに積極的な貢献があった旨回答があった。

〔最終試験結果〕

令和3年2月18日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。

