

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400330

研究課題名(和文) 外場駆動によるブロッホ電子のコヒーレント制御

研究課題名(英文) Coherent control of Bloch electrons by external driving fields

研究代表者

萱沼 洋輔 (Kayanuma, Yosuke)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・特任教授

研究者番号：80124569

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：結晶の周期ポテンシャル中における電子状態であるブロッホ電子に空間的に一様で時間的に周期性を有する振動外場(光)を印加した時に生じる特徴的な量子状態とその時間的応答を明らかにした。振動外場の振幅と振動数の比を適切に選ぶことで、ブロッホバンドのバンドギャップを消失させることができる。この原理を応用して、ギャップを有する2バンド系での電子のブロッホ・ゼナートンネリングの制御を示した。また単層グラフェンなどのディラック円錐バンドの形態を電磁場により変形できることを見出した。超短パルス照射によるコヒーレントフォノンを利用することにより、バルク結晶の電子コヒーレンスの制御・観測のための理論を構築した。

研究成果の概要(英文)：We clarified the peculiar features of the quantum state of Bloch electrons under the influence of oscillating electromagnetic fields. It is found that, by choosing the ratio of the amplitude and the frequency of the field, it is possible to reduce, or even collapse the band gap of the Bloch states. It has been demonstrated that we can control the Bloch-Zener tunneling of electrons by applying this principle. Furthermore, we have shown that the morphology of the Dirac cone in graphene can be changed drastically by irradiating electromagnetic fields with various polarization. As an example, we have shown that the Dirac cone is deformed into Dirac wedge, where a one-dimensional manifold of zero-gap state emerges.

We have formulated the theory for the generation and detection of coherent phonons in bulk crystals. It was shown that by using the phase-locked double pulses, the coherence of the electron-phonon coupled state can be controlled and observed via the transient reflection modulation.

研究分野：物性理論

キーワード：バンドギャップ変調 動的局在 コヒーレント制御 位相干渉効果 過渡反射スペクトル 位相ロック
2連パルス ディラック円錐

1. 研究開始当初の背景

固体の電子状態を光励起により制御・改変しようとする研究の歴史は古く、特に最近では強い電場強度を持つパルスレーザー技術の進歩により、固体電子を強励起し「光誘起相転移」を引き起こそうという研究が進展している。これらの研究では、実励起に伴うバンド再編と緩和を伴うインコヒーレント過程が興味を中心となる。一方、強い振動電場あるいはパルス外場の下で起きる実励起を伴わないコヒーレントな量子過程の重要性を示唆する実験結果および理論的予測も集積し始めている。これらは、固体中のブロッホ電子のコヒーレント制御を目指すものとして、関心を集め始めていた。一方、ここ10年ほどの間に、真空中の光学格子に捕捉された冷却原子を用いた固体電子のシミュレーション技術が急展開し、実在の固体電子研究への新しい切り口を提供しつつあった。これらの研究では、極低温状態での実験であることもあって、熱緩和やデコヒーレンス過程を含まない理想的な量子制御のモデルを提供するものと期待されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、固体中の電子状態を、外部から印加した電磁場（光）などの外場によりコヒーレントに操作し、量子制御するための新原理を理論的に明らかにすることである。また、冷却原子を用いた量子シミュレーター上のコヒーレント制御も対象とする。その中心となる原理は量子位相の干渉効果である。時間をあらわに含む外場の効果は非摂動的に扱う。時間周期性のある定常外場が、空間周期性のある量子系（ブロッホ電子）に付け加わることで生まれる新たな量子干渉効果を調べる。また実在の固体中の電子だけでなく、光学格子中の冷却原子系をも対象とし、実験の提案を行う。

さらに、固体電子に振動的な外場を加える一つの手段として、超短光パルス照射によるコヒーレントフォノンを用いる方法もある。コヒーレントフォノン場中での電子応答理論も研究目的の一つとする。

3. 研究の方法

適切なモデルを設定して理論計算を行う。数値的解法と解析的手法を併用して本質を明らかにしてゆく。場合によっては大規模数値計算になるので、研究費で購入するワークステーションも用いる。コヒーレントフォノンに関する研究では、研究分担者の実験データを対象に、理論構築・データ解析・理論予測も行う。

4. 研究成果

(1) 振動外場によるブロッホ電子のコヒーレント制御

単色の振動電場（光）によって駆動されるブ

ロッホ電子の特異な振舞いを理論的に明らかにした。振動数の高い場合、振動電場の効果は本研究者の見出した「rapid phase approximation (早い位相の近似)」により解析的に取り扱うことができる。この結果、ブロッホバンドの band gap collapse (バンドギャップ崩壊) と呼ぶ異常が現れる。これは波数空間における動的局在とも考えることができる。その結果、バンドギャップを有す

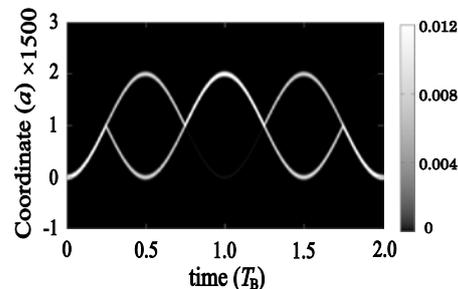


図1 ブロッホ・ゼナートンネル効果の振動外場による制御(発表論文⑤)

るブロッホ状態に振動電場を印加することでギャップの大きさを制御できることを示した。その実例として、図1のような直流電場による2バンド系のゼナートンネリングの軌跡パターンを自由に制御できることを明らかにした。

(2) 振動電場によるディラック円錐の形状制御

振動電場の振幅と振動数の比を調節することで、バンドギャップを変調し特に特別の値ではゼロにできる。これを利用すると、単層グラフェンなどに現れる質量の無いディラ

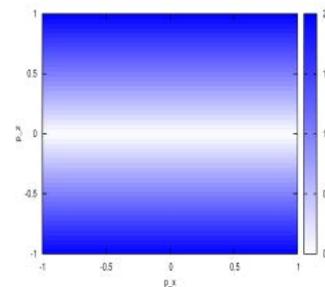


図2 ディラックの楔 (学会発表③)

ック電子のバンド（ディラック円錐）の形状を大きく変形できることを見出した。

図2は直線偏光電場下でのディラックバンドの形状（等エネルギー面の濃淡表示）である。直線状のゼロギャップ状態「ディラックの楔 (Dirac Wedge)」が実現されている。偏光を直線偏光から楕円偏光、円偏光に変えていくと、原点（ディラック点）での縮退が解

けてギャップが生じる。これらの事実は電子輸送現象に特異性を生じる可能性があることを示唆する。

(3) 位相ロック 2 連パルス照射による電子フォノン結合系のコヒーレント制御

GaAs 結晶などにおいて、アト秒精度で位相ロックされた 2 連パルスによるコヒーレントフォノン計測がなされた。この特徴的な過渡反射率のパルス間隔依存性を、理論的に解明した (発表論文④、学会発表①②)。

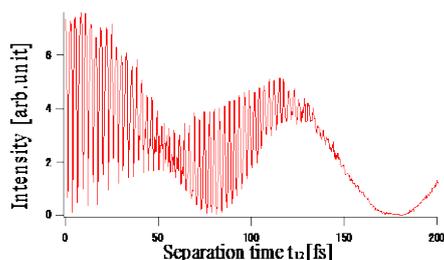


図3 過渡反射強度のパルス間隔依存性
(実験、学会発表①)

図3は90KのGaAs結晶に対してなされた過渡反射スペクトル中の振動成分の2連パルス時間間隔依存性の測定値、図4はその理論計算の結果である。横軸の単位はフェムト秒である。2.7フェムト秒の速い振動成分は電子状態の干渉を、また115フェムト秒の遅い振動成分は光学フォノンの干渉効果に起因する。

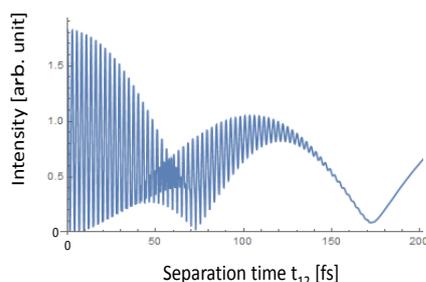


図4 過渡反射強度のパルス間隔依存性
(理論、学会発表②)

理論ではフォノンの生成機構として瞬間的誘導ラマン散乱機構と瞬間的光吸収機構の双方を考慮することで、実験データとのよい一致が得られた。これらの結果は、電子状態のコヒーレンスが低温では約100フェムト秒以上持続することを意味している。本研究により、位相ロック 2 連パルスによるフォノンの制御・観測が、電子状態のコヒーレンス計測に対しても新規の実験手法となりうる事が明らかとなった。

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 6 件)

- ① K.G. Nakamura, Y. Shikano and Y. Kayanuma, Phys. Rev. B 92, 144304 (7 pages), (2015). DOI 10.1103/PhysRevB.92.144304 (査読有)
- ② R. Iikubo, T. Fujiwara, T. Sekikawa, S. Sato, T. Taketsugu and Y. Kayanuma, J. Phys. Chem. Letters, 6, 2463-2468, (2015). DOI 10.1021/acs.jpcllett.5b00943. (査読有)
- ③ K. Norimatsu, M. Hada, S. Yamamoto, T. Sasagawa, M. Kitajima, Y. Kayanuma and K.G. Nakamura, J. Appl. Phys. 117, 143102 (7 pages), (2015). (査読有) DOI 10.1063/1.4917387
- ④ S. Hayashi, K. Kato, K. Norimatsu, M. Hada, Y. Kayanuma and K.G. Nakamura, Scientific Reports, 4, 4456 (5 pages), (2014). DOI 10.1038/srep0456 (査読有)
- ⑤ Y. Mizumoto and Y. Kayanuma, Phys. Rev. A 88, 023611 (4 pages), (2013). DOI 10.1103/PhysRevA.88.023611 (査読有)
- ⑥ H. Katsuki, Y. Kayanuma and K. Ohmori, Phys. Rev. B 88, 014507 (6 pages), (2013) DOI 10.1103/PhysRevB.88.014507 (査読有)

[学会発表] (計 14 件)

- ① 横田謙祐、萱沼洋輔、越智章、則松桂、近藤倫央、中村一隆、日本物理学会第71回年会、2016年3月19日、東北学院大学泉キャンパス
- ② 萱沼洋輔、横田謙祐、越智章、則松桂、近藤倫央、中村一隆、日本物理学会第71回年会、2016年3月19日、東北学院大学泉キャンパス
- ③ Y. Kayanuma and K. Saito, Excon2015, 2015年5月19日、Ecole Polytechnique Montreal, Canada.
- ④ Y. Kayanuma and K. Saito, ISUILS14, 2015年12月10日、Kauai, Hawaii, USA.
- ⑤ 萱沼洋輔、鶴田哲也、中村一隆、日本物理学会第70回年会、2015年3月23日、早稲田大学
- ⑥ 羽田真毅、則松桂、S. Keskin、鶴田哲也、五十嵐九四朗、笹川崇男、恩田健、萱沼洋輔、C. R. J. D. Miller、腰原伸也、中村一隆、日本物理学会第70回年会、2015年3月24日、早稲田大学
- ⑦ 萱沼洋輔、齋藤圭司、K. Brandner、日本物理学会第70回年会、2015年3月24日、早稲田大学
- ⑧ 萱沼洋輔、則松桂、羽田真毅、中村一隆、日本物理学会秋季大会、2014年9月7日、中部大学
- ⑨ 中村一隆、加藤啓吾、則松桂、羽田真毅、萱沼洋輔、日本物理学会秋季大会、2014年9月7日、中部大学

⑩ Y. Kayanuma, S. Hayashi, K. Kato, K. Norimatsu, M. Hayasi and K. G. Nakamura, 17th International Conference on Luminescence, 2014年7月14日、Wroclaw University, Poland

⑪ Y. Kayanuma and K. G. Nakamura, 19th International Conference on Ultrafast Phenomena, 2014年7月7日、Okinawa Convention Center

⑫ 後藤賢一、萱沼洋輔、中村一隆、日本物理学会第69回年次大会、2014年3月29日、東海大学湘南キャンパス

⑬ 萱沼洋輔、日本物理学会秋季大会、2013年9月26日、徳島大学常三島キャンパス

⑭ Y. Kayanuma, Y. Mizumoto, Y. Mori, G. Oohata and K. Mizoguchi, CLEO Europe13, 2013年5月15日、Munich, Germany
〔図書〕(計 1 件)

⑰ Y. Kayanuma, Hard X-Ray Photoelectron Spectroscopy, Springer Verlag, 2015年 (共著)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表

萱沼 洋輔 (KAYANUMA Yosuke)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・
特任教授

研究者番号 : 80124569

(2) 研究分担者 (2014年度より)

中村 一隆 (NAKAMURA Kazutaka)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・
准教授

研究者番号 : 20302979

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :