

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	テトラダイマイト構造をもつトポロジカル絶縁体における光励起電子およびフォノン超高速ダイナミクス
Title(English)	Ultrafast dynamics of photoexcited electrons and coherent phonons in topological insulators having the tetradymite structure
著者(和文)	則松桂
Author(English)	Katsura Norimatsu
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10093号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中村 一隆,笹川 崇男,小田原 修,吉本 護,和田 裕之
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10093号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	物質科学創造	専攻	申請学位 (専攻分野)： 博士 (理学)
学生氏名： Student's Name	則松 桂		指導教員 (主)： 中村 一隆
			指導教員 (副)： 笹川 崇男

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は”Ultrafast dynamics of photoexcited electrons and coherent phonons in topological insulators having the tetradymite structure” (テトラダイマイト構造を持つトポロジカル絶縁体における光励起電子とフォノン超高速ダイナミクス) と題し英文で書かれ、第一章「General introduction」、第二章「Sample characterization and experimental detail」、第三章「Phonon dynamics」、第四章「Carrier dynamics」、第五章「General conclusions」の全五章から構成されている。

第一章「General introduction」では、時間分解分光法の測定原理とトポロジカル絶縁体のこれまでに研究について概観し、本研究の目的及び意義を述べている。まず初めに、超高速現象を調べる手法として時間分解分光法の原理について記述した。また、位相の揃った格子振動 (コヒーレントフォノン) の性質や生成過程、その検出方法について紹介した。次に、トポロジカル絶縁体について説明し、研究報告例をいくつか紹介した。時間分解分光法の一つであるポンプ-プローブ法は、化学反応や構造相転移など過渡的な変化を直接観測することができる手法である。この手法を用いると、原子核のコヒーレントな振動に伴った固体の誘電率の変調を観測し、非平衡状態のフォノンの振動数や位相緩和時間 (寿命) を直接的に観測することができる。本研究では、フェムト秒レーザーを用いた時間分解過渡反射率測定法を用いて、トポロジカル絶縁体中の電子とフォノンの光励起緩和ダイナミクスを調べることを目的とし研究を行っている。

第二章「Sample characterization and experimental detail」では、試料の特性と実験装置の詳細について述べている。本研究で用いたトポロジカル絶縁体 (Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3) は、全てブリッジマン法で作製された単結晶である。この物質表面状態のエネルギー分散が単純な単一ディラックコーンをもち、テトラダイマイト構造 (D_{3d}^5) を有している。ここでは、X線回折による結晶構造解析やキャリア密度計測、また、光応答の基礎特性としてバンドギャップ測定、定常状態での反射率測定の結果について記した。

第三章「Phonon dynamics」では、近赤外光を用いた時間分解過渡反射率測定の結果について述べている。本章では、対象とするコヒーレントフォノンの振動モードに応じていくつかの手法を使い分け、全てのラマン活性振動モード (A_{1g}^1 , A_{1g}^2 , E_g^1 , E_g^2) の振動数や緩和時間を明らかにした。対称振動モード (A_{1g}^1 , A_{1g}^2) は Isotropic 配置で測定し、非対称振動モード (E_g^1 , E_g^2) は EO-sampling 配置で測定した。中でも、非対称振動モードはポンプ光の偏光依存性が強く、この結果はラマンテンソルを用いて物質内に作られる分極を考えることで説明できることが分かった。励起するポンプ光の偏光を結晶軸に対して正確に合わせることで、オーバーダンプしている振動 (E_g^1) の観測にも成功した。さらに、マイケルソン干渉計を用いてポンプ光を 2 つに分け、2 つのポンプ光の照射時間遅延を制御することで格子振動の選択励起に成功し、緩和の速い A_{1g}^2 モードの正確な寿命も求めることができた。また、剥離法で作製した厚さ約 3 nm の試料での過渡透過率計測では A_{1g}^2 モードのみが観測され、その振動数はバルクのものよりわずかに高エネ

ルギー側へシフトし寿命がのびていることが確認された (> 4.5 ps)。3種類の試料を比較したところ、振動数は原子質量に依存していることが分かり、これらの結合の強さはほぼ等しいと考えられる。

第四章「Carrier dynamics」では、近赤外光と中赤外光での時間分解過渡反射率測定の結果を述べている。本章では、p型の Sb_2Te_3 単結晶の光励起における表面電子のダイナミクスを、バルクのキャリア応答（表面近傍のホール数の変化）から調べた。反射率スペクトルの初期応答は、プラズマエッジを境に低エネルギーでは減少し、高エネルギー側では増加することが分かった。この結果は、光励起直後 1 ps 以内に表面状態に電子が供給されることによりドルーデ重率が過渡的に減少し、それに伴ってプラズマ周波数が低エネルギー側へシフトしたことが原因であると考えられる。その後、光励起電子は緩和時定数 ($\tau = 3.3$ ps) で緩和する。これは、一般的な半導体 GaAs ($\tau \approx 10$ ns) に比べて非常に速く、また、同様にディラックコーンをもつグラフェン ($\tau = 1.7$ ps) と同程度であるということが分かった。以上の結果は、時間分解角度分解光電子分光法での時間スケールともよく一致しており、 Sb_2Te_3 は表面状態を介して緩和するため他の物質に比べ電子緩和が非常に速いと言える。

第五章「General conclusions」では、光励起した非平衡状態における電子-格子相互作用に触れながら、トポロジカル絶縁体の光励起電子・フォノンダイナミクスについて結論を述べた。光励起電子は電子との相互作用により、1 ps 以内にコヒーレントフォノンを生成する。それと同時に p 型の場合は表面状態に電子が供給される。このとき、表面近傍に存在していたホールは電子との再結合によりキャリアが相対的に減少し、プラズマ周波数が低エネルギー側へ減少する。その後、コヒーレントフォノンの全振動モードは 4 ps 以内に緩和し、光励起電子は表面状態を介して 10 ps 以内に緩和する。この電子の速い緩和過程は、ディラック型分散の表面状態をもつトポロジカル絶縁体特有の性質を表わしている。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻 : Department of	物質科学創造	専攻	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 (理学) Doctor of (Science)
学生氏名 : Student's Name	則松 桂		指導教員 (主) : Academic Advisor(main)	中村 一隆
			指導教員 (副) : Academic Advisor(sub)	笹川 崇男

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

The dynamics of phonons and electrons can be directly studied by femtosecond time-resolved reflectance spectroscopy. Phonons are excited coherently in solids by irradiation of femtosecond laser pulses, whose duration much shorter than the period of the atomic vibration (coherent phonon). Here, I apply this technique for the topological insulators, which behave as a semiconductor in the bulk and metal-like conductivity on its edge and surface. The dynamics of photoexcited electrons and phonons in topological insulators would be closely related with intrinsic features for electronic applications. However, the quantitatively measurements of them is still lacking.

In this dissertation, following results consist of two parts: phonon dynamics and carrier dynamics. First, I observed all the Raman active optical phonons (E_g^1 , E_g^2 , A_{1g}^1 , and A_{1g}^2) in topological insulators (Sb_2Te_3 , Bi_2Te_3 , and Bi_2Se_3) using femtosecond time-resolved near-infrared (IR) reflectivity measurements. Amplitude of these coherent phonons strongly depends on polarization of an excitation pulse, and I clarified their lifetimes. Secondly, the dynamics of photoexcited topological insulators (*p*-type Sb_2Te_3) has been studied using the time-resolved mid-IR reflectivity measurements. It is found that the photoexcited relaxation process is as follows: electrons were excited in the bulk-conduction band and generate coherent phonons (< 1 ps). These coherent phonons relax to the equilibrium state within 4 ps. In addition, electrons on the surface (Dirac Fermions) are supplied from the bulk-valence band because of the generated holes in the bulk-valence band via auger electron transition (< 1 ps). Thereafter, the excited electrons go back to the bulk-valence band within 10 ps via recombination of holes with electrons relaxed through a Dirac cone surface state. The faster relaxation time ($\tau = 3.3$ ps) implies a characteristic of topological insulator having a Dirac cone surface state, like similarly to a graphene.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).