

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 31 年度

受付番号 201960051

氏名 伊藤 俊

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地：マールブルク （国名：ドイツ連邦共和国）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。

テラヘルツ励起時間分解光電子分光によるトポロジカル表面電子状態の超高速光電場制御

3. 派遣期間：平成 31 年 4 月 10 日～令和 3 年 4 月 9 日

4. 受入機関名及び部局名

受入機関名：フィリップ大学マールブルク

部局名：物理学科表面物理学グループ

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意(A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

本研究課題の背景

トポロジカル物質は、その電子状態が運動量空間において持つ特異な幾何学的構造（トポロジー）に起因して、系に固有の対称性で保護された表面電子状態を持つ。最も基本的なトポロジカル物質であるトポロジカル絶縁体は、物質の中身（バルク）が絶縁体である一方で、表面にスピン偏極した金属的状態を持つ。スピンが運動量の向きと垂直に結合したヘリカルなスピン構造を持つために、散乱から保護された非散逸の表面電流を担う。この表面電子状態は、紫外光照射によって放出される光電子のエネルギーと角度を分析する角度分解光電子分光(ARPES)によって、そのバンド分散形状およびスピン偏極を直接観測することができる。さらに光源としてフェムト秒(10^{-15} 秒)超短パルスレーザーを使用し、時間遅延を与えたポンプ励起光を導入する時間分解 ARPES によってバンド構造上の超高速電子ダイナミクスを観測することもできる。

受け入れ研究者であるドイツ、マールブルク大学の Höfer 教授は、1990 年代から先駆的な研究を行ってきた時間分解 ARPES の大家であり、近年トポロジカル絶縁体を対象とする研究も展開してきた。さらに Höfer 教授は 2016 年から、同じくドイツのレーゲンスブルク大学でテラヘルツ(THz)分光の一大グループを率いる Rupert Huber 教授と 2016 年から共同研究を開始した。ペタヘルツ(Phz)領域の赤外-可視-紫外光励起光を用いる従来の時間分解 ARPES では、プローブ光の時間幅がポンプ光のサイクルよりも長く、サイクル平均化された現象しか観測できなかつたが、波長の長いテラヘルツ領域の光を用いて光のサイクルを分解した実験が可能になる。近年テラヘルツ光の発生技術の進展により、数 MV/cm から数 100 MV/cm という巨大な電場をフェムト秒領域で瞬間的に加え、電子状態を光の電場で制御する試みが始まっている。この共同研究は、時間分解 ARPES とテラヘルツ光電場を組み合わせ、トポロジカル表面電子状態が担う非散逸電流をバンド構造上で観測することを目指したものである。光サイクルを分解することが比較的容易な中心周波数 1 THz (光のサイクル時間 1 ps) の条件で、世界初のテラヘルツ励起 ARPES (THz-ARPES) が実現され、トポロジカル表面電流が光電場の時間スケールで散乱されることなく流れれる様子が観測された[1]。

本研究課題の目的と成果概要

本研究課題は、当研究員が博士課程で培った高分解能 ARPES および表面制御の技術を THz-ARPES と組み合わせることで、トポロジカル表面電子状態のより高度な光電場制御を目指したものである。一方で、上述の実験では電場強度が 2 kV/cm に留まっており、さらなる強電場条件への拡張も望まれていた。そこで渡航後の最初のテーマとして、THz-ARPES の実験条件をより高速かつより強電場の領域に拡張することを目指した。結果、 25 THz (光の 1 サイクル時間 40 fs) という multi-THz 周波数帯の光を使い、 1 MV/cm という 500 倍強い電場強度での THz-ARPES の実現に成功した。観測結果は、トポロジカル表面バンド内を光電場駆動の電流が流れる様子を描き出したのみならず、バンド分散自体が変調されるフロックエンジニアリングの可能性を示唆するものであった。フロック電子状態は完全な周期性を持つ連続光による励起に対し導入される概念であり、それが数サイクルのテラヘルツパルスそしてサブ光サイクルの時間スケールで観測されうるとすれば大変興味深い問題となる。

そこで 2 年目からはこのフロック電子状態と光電場駆動電流の物理を明らかにすることを目指した。THz-ARPES 実験において、 40fs の光サイクルを分解するために $10\text{-}20 \text{ fs}$ の時間分解能によって、ARPES のエネルギー分解能が著しく悪化する問題が残っていた。これに対し、高分解能 ARPES の分野で提案された曲率イメージフィルター[2]を用いることで、サブサイクル分解能を維持しながらトポロジカル表面状態の詳細なバンド分散を描き出すことに成功した。その結果、トポロジカル表面バンドが、励起テラヘルツ光のフォトンエネルギーの間隔で分裂する様子が明確に観測された。また、これらの試みと並行して、Huber 教授のグループによる、トポロジカル表面状態からのテラヘルツ励起高次高調波発生(HHG)の実験にも参加した。その第一報告は既に Nature 本誌にアクセプトされており、2021 年 5 月 20 日に掲載予定である[3]。フロック状態の形成と HHG はどちらも光と物質の相互作用が非摂動領域まで強くなったときに顕れる現象であり、両者の関係性も含めた HHG の機構は最先端のトピックである。THz-ARPES はこれら全ての現象をバンド分散上で観測することができる唯一無二のツールである。現在理論グループとの共同研究によって、THz-ARPES による観測結果の裏付けを進めるとともに、トポロジカル表面状態における強光電場現象の全体像の解明を目指している[4]。

この共同研究はレーベンスブルク大学 Huber 教授のグループのテラヘルツ光学系に Höfer 教授のグループの ARPES 装置を持ち込む形で行われているものだが、これと並行して、マールブルク大学の新しいテラヘルツ光学系の立ち上げも行った。 200 kHz の高い繰り返し周波数で 10 MV/cm クラスの電場強度を目指したものであり、やはり Huber 教授のグループのセットアップを元にしている[5]。電気光学サンプリングによるテラヘルツ光電場の測定を完了し、現在新たなトポロジカル物質上での THz-HHG の観測を目指している。さらにその測定を超高真空で行うための超小型の超高真空チャンバーを設計し組み立てを行った。Höfer 教授は "SFB1083 Internal Interfaces" という長期大型の共同研究課題の責任者であり、2021 年 3 月の中間審査において最高の評価を得て、2025 年までの継続が決定した。当研究員は SFB1083 の中の "Ultrafast Dynamics of Interface Currents" の中心メンバーとして、立ち上げたテラヘルツ光学系を元に THz-HHG と THz-ARPES を超高真空下で同一の試料に対して行う新たなプロジェクトを進めている。プロジェクト名の通り、単純なトポロジカル表面状態を超えて界面系での測定を目指すものであり、ここまでに確立した THz-ARPES の技術と系統的な試料制御を駆使し、光電場による新奇量子物質の超高速制御を基礎・応用の両面から探求していく。

①中赤外領域におけるテラヘルツ励起時間分解光電子分光(multi-THz-ARPES)の実現

2018 年に世界で初めて実現されたテラヘルツ励起時間分解光電子分光(THz-ARPES)は光の 1 サイクル内で起きる現象をバンド分散上で捉える画期的な実験である[1]。トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 の表面ディラックコーンの左右の電子分布が非対称になり、テラヘルツ光電場で電流が駆動される様子が直接観測され、フェルミ準位の光電子分布の時間変化がボルツマン方程式による教科書的な描像を完全に再現する様子が示された。一方でこの結果は、光電場が弱く、半古典的な領域にとどまっていることを意味する。現在高強度テラヘルツ波を使った分校実験では、光と物質の相互作用を摂動的に取り扱うことができない領域での実験が行われ、高次高調波発生(HHG)に代表される非自明な現象が多数報告されている。その微視的な機構をバンド分散から理解するためには THz-ARPES の電場強度を MV/cm 領域まで引き上げる必要がある。文献[1]の実験での問題は(1) 1 THz の周波数領域で Bi_2Te_3 がほぼ完全に金属的になっており表面平行方向の電場の大部分が遮蔽されていた点、そして(2) 1 THz すなわち $300 \mu\text{m}$ という長波長の光を超高真空チャンバー内まで導きタイトに集光することが困難であった点が挙げられる。これらの問題は、テラヘルツ光の中心周波数を数十 THz の通称 multi-THz 帯に上げることで解決される。系が非摂動領域に入っているかの条件(Keldysh 条件)は光の周波数にも依存するが、Huber 教授のグループはこの multi-THz 帯で HHG をはじめとする様々な新奇物性を発見し、それらが非摂動的な光物質相互作用で駆動されることを明らかにしている[6]。

よって渡航直後から THz-ARPES を multi-THz 領域に拡張することを目指した。具体的には同じ Bi_2Te_3 を対象とし、 25 THz の周波数を選択した。対応する時間周期は 40 fs であり、光のサイクルを分解した測定を行うには少なくとも 20 fs 程度の高い時間分解能が必要になる。また超高真空下で実験を行う上では窓材の選択も重要な問題となる。残念ながら文献[1]で使用された 6 eV の紫外光と 25 THz の光両方に適した窓材は存在しないことが分かった。この問題に対し、 $3 \text{ eV} + 3 \text{ eV}$ の二光子励起により ARPES

を行うことで方針が決定された。3 eV(400 nm)の周波数帯での10 fs パルス発生については実例があるものの、ARPES チャンバー内のサンプル表面上でその時間幅を実現することは単純ではない。Huber 教授のグループの学生たちとともに、cross-correlation frequency-resolved optical gating (XFROG) を立ち上げて大気中でのパルス幅を測定しつつ、チャンバー内で二光子励起による光電子強度をモニタすることで、パルスコンプレッサーを最適化し、チャンバー内で 15 fs の時間分解能を実現した。図 1(a) に XFROG により再構築されたプロープパルスを示す。

文献[1]ではトポロジカル表面バンド内で起きる光電場駆動ダイナミクスに加え、放出後の光電子と光電場の相互作用によってバンド全体がエネルギーおよび運動量方向に揺さぶられることが報告されている。これはアト秒(10^{-18} 秒)分光の標準的な実験手法となっているアト秒 streaking に対応するものであり、この THz-streaking によりサンプル表面での光電場波形を復元することができる。パルス整形に成功した直後にエネルギー方向および運動量方向の THz-streaking の観測に成功し、最大で 1-2 MV/cm の光電場強度が得られた。25 THz の周波数領域における Bi₂Te₃ の遮蔽効果で、表面平行方向の電場強度は一桁程度落ちるので、これはサンプルに入射する電場強度として 10-20 MV/cm に対応する。図 1(b) に示すものが観測された運動量方向の THz-streaking である。このシフトを補正することによりバンド分散内で起きる真のダイナミクスを抽出できる。文献[1]で観測されたディラックコーンの非対称化がはるかに大きなエネルギー-scale で起き、ついにはコーンの片側の電子分布が完全に消失する状況までも観測された。このようにして、THz-ARPES を高速・高強度領域に拡張することに成功した。

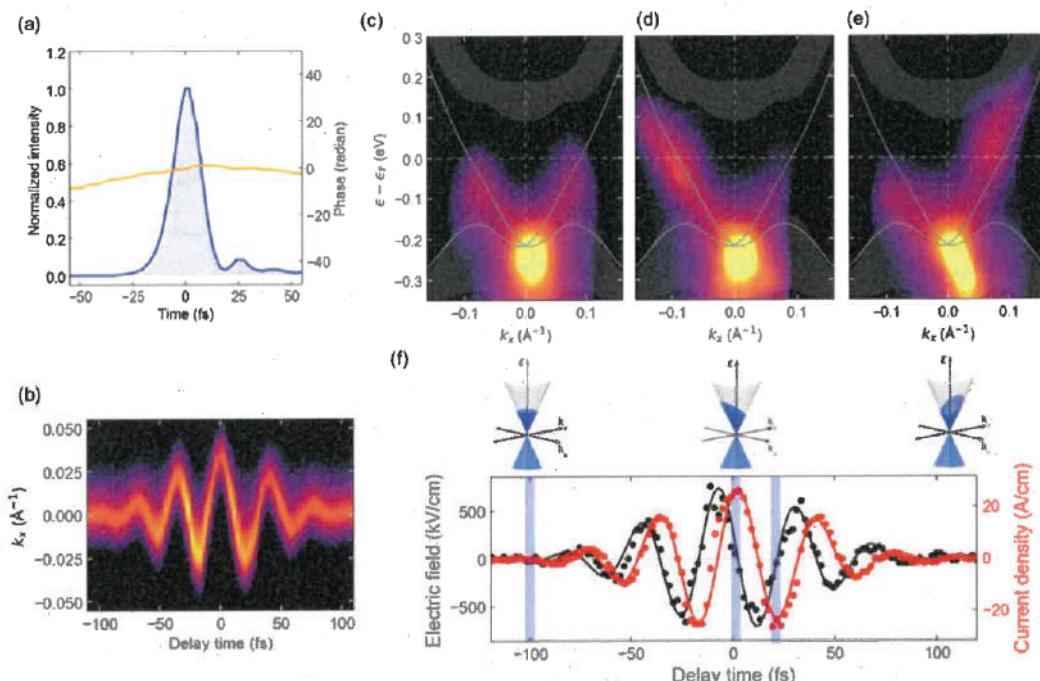


Fig. 1 (a) Reconstruction of cross-correlation frequency-resolved optical gating (XFROG) traces for the broadband 400 nm probe pulse. A blue solid line with filling shows its normalized intensity, and an orange line its phase profile. Its pulse duration (FWHM) was determined to be 15 fs. (b) THz momentum-streaking spectrogram measured on a Bi₂Te₃ surface. A strong intensity around the bulk state is integrated in the energy direction, and curvature filtering is applied. Intense multi-THz pulse at a center frequency of 26 THz, with a pulse duration of 100 fs, and with a field strength of 700 kV/cm was used. (c)-(d) Curvature-filtered ARPES images measured at a delay time of -100 fs, 0 fs, and 20 fs, respectively. Gray solid lines depict Bi₂Te₃ surface bands obtained from a DFT calculation. (f) Optical-cycle-resolved j - E characteristic of Bi₂Te₃ topological surface states. Black markers describe an electric field waveform reconstructed from momentum streaking, and a black solid line is a fitting curve. Red markers show a current-density waveform extracted from temporal shifts of electronic distributions, and a red solid line depicts a result calculated by Boltzmann equation.

②曲率イメージフィルタリングによる multi-THz-ARPES の高精度化

この multi-THz-ARPES では 10-20 fs の高い時間分解能を必要とするために、不確定性関係からエネルギー分解能が著しく悪化する。さらに 6 eV の代わりに 3 eV + 3 eV の二光子過程を使ったことにより光電子の遷移行列要素が変化し、表面バンドの光電子強度がバルクバンドに比べて圧倒的に弱くなってしまった。そのために観測された ARPES イメージはバルクの巨大な光電子ピークに支配されており、表面バンド上のダイナミクスはその上に乗ったわずかな変化としてのみ観測されていた。一方で、1 MV/cm クラスの表面電場強度を用いた実験により、バンド内の電流だけでなくバンド構造自体が変化し追加のバンド構造が現れる様子が観測されていた。しかしエネルギー方向の強いばけとバルクの巨大なバックグラウンドにより、決定的なデータとは言い難いものであった。

この問題に対し、高分解能 ARPES の分野で近年提案された曲率イメージフィルタリングを導入した [2]。これはエッジ・ピークの抽出に広く用いられてきた 2 回微分フィルタリングを改良したものであり、元の画像におけるピーク位置を精密に再現することができる。このイメージフィルタは曲率のみに注目し、ピークの絶対的高さは重要ではなくなるため、我々の ARPES 像の抱える問題に最適であった。曲率フィルタ前後のスムージング処理を最適化することでその威力は想像以上のものであり、文献[1]と同程度に鮮明な表面ディラックコーンを描き出すことに成功した(図 1(c)および図 2(a))。700 kV/cm の強電場条件においても、電子がディラックコーン上で左右に加速される半古典的な描像が得られ(図 1(d), (e))、電子分布の時間変化から抽出された電流波形はボルツマン方程式の描像と非常によく一致し、THz-ARPES がこの極端条件下でも有効であることが明らかになった(図 1(f))。

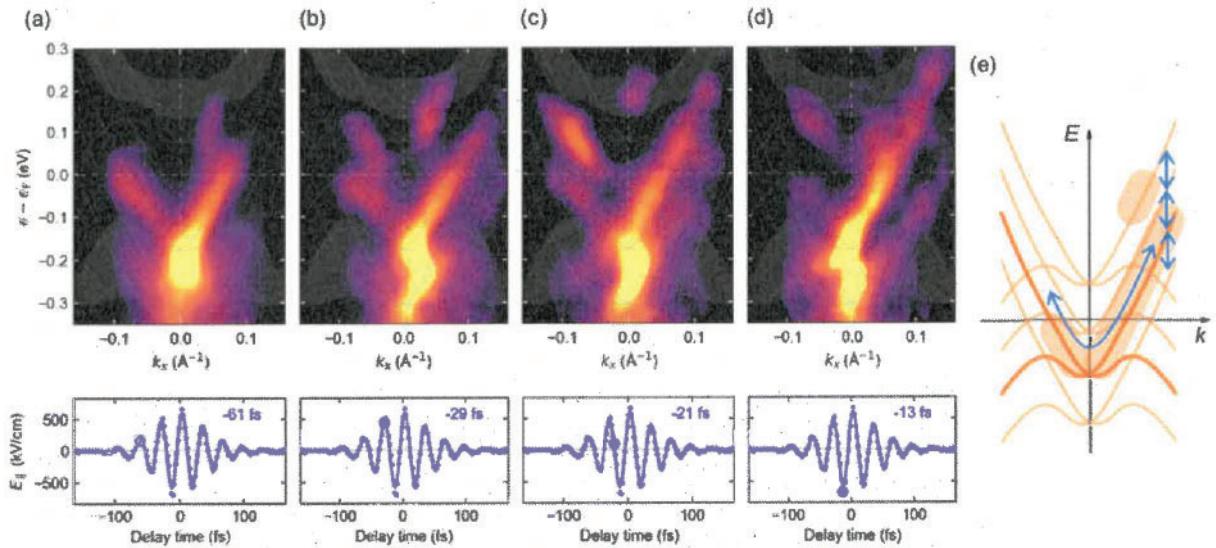


Fig. 2 (a)-(d) Top: multi-THz-ARPES images of Bi₂Te₃ processed by fine curvature image filtering, with pre-smoothing in a box of 60 meV times 0.035 Å⁻¹, at a delay time of -61 fs, -29 fs, -21 fs, and -13 fs, respectively. Bottom: electric fields reconstructed from momentum streaking (markers) together with the fitting results (curve). (e) Schematics of lightwave-driven currents flowing in Floquet-Bloch sidebands.

③multi-THz-ARPES によるフロッケバンドエンジニアリングの観測

上記の結果は 1 MV/cm オーダーの強電場領域でもボルツマン描像が適用できることを示したが、半古典描像では説明できない結果も得られた。それが①の時点でも観測されていたバンド構造自体の変化である。曲率イメージフィルタを適用する前から、ディラックコーンが分裂したような像が得られていたが、バルクバンドの強烈なバックグラウンドによりその変化はわずかなものであった。また、2 光子過程を使う実験配置のため、中間状態の影響が否定できない点があった。

時期的には②の結果を得た時期と前後するが、2020 年初めから現在まで続くコロナウイルスのパンデミックが始まり、レーザンスプルクへの移動が困難となってしまった。この期間を利用し、マールブルクのピコ秒(10^{-12} 秒)チタンサファイアレーザーを使うことで Bi₂Te₃ における 2 光子光電子分光の詳細を調べた。このレーザーは 80 MHz 繰り返しのオシレーターからパルス幅 1 ps, 平均パワー 4 W の 800 nm を出力するもので、高分解能 ARPES のために設置されている。厚さ 4 mm の LBO 結晶によって高強度の 400 nm を発生させている。オシレーター内の波長フィルタと LBO の角度を回すことによって波長を 370 nm から 430 nm の範囲で容易に変調することができ、これは multi-THz-ARPES のプローブとして使っている 10 fs, 400 nm パルスのスペクトル範囲(FWHM 20–30 nm)を網羅している。ps のパルス幅によってスペクトル幅は極めて狭く、multi-THz-ARPES で励起しているスペクトル範囲内のエネルギー構造を調べることができる。測定の結果、該当のスペクトル領域の 2 光子光電子強度はほぼ完全に一定であり、中間状態及び終状態による共鳴は存在しないことが分かった。

2020 年 8 月にレーザンスプルクでの実験が再開できることとなった。この時、試料交換ステージを新設し、これまで試料の劈開をするたびにチャンバーを大気開放する必要があったところを、真空中で複数の試料を劈開できるように改善した。限られた滞在期間における試料の表面出しの効率が大幅に改善した。良質な表面条件を得て、かつシグナル蓄積を改善することによって得た高品質な multi-THz-ARPES データに対し、曲率イメージフィルタリングによって得られた結果が図 2(a)–(d) である。テラヘルツ励起前の単一のディラックコーンが複数のサブバンドに分裂している様子が明確に観測されている。図の灰色の実線は、DFT 計算で得られた Bi₂Te₃ のバンド構造をテラヘルツ光のフォトンエネルギーの整数倍分シフトしたものであり、フロッケ-ブロッホ描像を示す。バンド構造全体の位置のズレが一部見られるものの、サブバンドのエネルギー分裂の大きさがフロッケ-ブロッホ描像とよく一致しているこ

とが分かる。

フロック状態は、時間に周期的なポテンシャル下の電子状態を記述するために導入された概念である。結晶など空間的に周期的なポテンシャルで形成されるブロック状態と対になる概念であり、光励起された結晶中においてフロック-ブロック状態が形成される。2013年に中心周波数 30 THz、パルス幅 250 fs の励起条件、そしてパルス幅 100 fs のプローブ条件による時間分解 ARPES による Bi_2Se_3 上でフロック-ブロック状態の観測が報告された。ARPES 測定では物質内の光相互作用で形成されるフロック状態に加えて、真空放出された光電子と光の相互作用によるバンド分裂も観測されうるが、同グループは理論計算と光電子分布の詳細な比較により、面内平行方向の電場において後者の寄与が無視できるほど小さいことを示している。我々の実験でも Bi_2Se_3 と同様の電子状態を持つ Bi_2Te_3 を使用しており、全く同じ議論が適用できる。一方で我々の実験は、10 fs のプローブ条件により光のサイクルを分解した ARPES である点、そしてパルス幅 100 fs、電場強度 1 MV/cm という強烈な励起条件を用いている点で大きく異なる。前者は周期的な励起で形成されるフロック状態が光の 1 サイクル内で見えるのか?という疑問を、後者はわずか 3-4 サイクルしか含まないパルスでフロック状態が形成されるのか?という疑問を提示する。この問題に対し我々は、まず先行研究で用いられた理論モデルを我々の実験状態に適用した。その結果、100 fs のプローブ条件に対し、30 THz、100 fs、1 MV/cm の励起条件でもフロック-ブロック状態が出現することが分かった。さらにプローブ条件を 10-20 fs にすることで、図 3(e) の模式図に示すように電子分布がフロック-ブロック状態の上で「加速」され、光電場に駆動される電流が流れる様子を再現することができた。一方で、従来の理論モデルではゲージ変換に対する不変性において不完全な点が残っており、それに起因するアーティファクトが生じることも分かった。最近スタンフォード SLAC の Dr. Michael Schüler がこの問題を解決した理論モデルを報告しており[7]、Dr. Schüler との共同研究により完全な計算を行うとともに、①の結果と合わせて論文の執筆を進めている[4]。

④トポロジカル表面状態からのテラヘルツ励起高次高調波発生(THz-HHG)の観測

上記の multi-THz-ARPES の実験だけでなく、Huber 教授が主導する、 Bi_2Te_3 からのテラヘルツ励起高次高調波発生(THz-HHG)の実験にも参加した。THz-HHG はバンド内を流れる電流とバンド間の分極の協奏によって形成され、光駆動ダイナミクスの重要なプローブである。測定試料のキャラクタリゼーションを行うとともに、実際の測定にも参加した。 Bi_2Te_3 のバルクバンドギャップに対応する 35 THz を境として HHG スペクトルが劇的に変化し、35 THz 以上では奇数次の高調波しか生じないのに対し、35 THz 以下では偶数次も観測された。偶数次の発生は空間反転対称性の破れを意味し、HHG が表面状態に起因していることを示唆する。さらに THz パルスのキャリア包絡線位相(carrier-envelope phase, CEP)を変調した測定により、HHG スペクトルが連続的にシフトすることが発見された。従来の HHG における CEP 由來のシフトは最高次数の高調波のみで起き、かつその次数の周りでのみ局所的に起きていたのに対し、観測されたシフトは全ての次数をスペクトル強度一定のまま連続的にシフトさせる点で全く異なるものであった。密度行列表示で厳密に光-物質相互作用を取り込んだ Schrödinger 方程式(optical Bloch equationあるいはsemiconductor Bloch equation)によりこの効果が再現され、散乱から保護されたトポロジカル表面状態における長い緩和時間(1 ps)に起因することが明らかになった。35 THz 以上での励起ではバルクバンドに多数の光キャリアが形成され、バルクの緩和時間は通常の半導体と同程度の 10 fs であり、CEP によるシフトは生じない点でも整合的である。また、有限の Berry 位相による寄与は電場と垂直方向の電流を発生させる。このシグナルも HHG の偏光状態の変化から観測された。これらの結果は既に Nature 本誌にアクセプトされており、2021 年 5 月 20 日に掲載予定である[3]。

⑤トポロジカル表面状態における光電場励起電流-フォノン変換の可能性

コロナウイルスのパンデミックにより multi-THz-ARPES のプロジェクトが止まっている間に、文献[1]に掲載しきれなかった 1 THz の励起条件による THz-ARPES データの系統的な見直しを行い、面内方向のテラヘルツ電場によりフォノンモードが励起されていることを発見した。励起テラヘルツスペクトルの範囲にバルクの赤外活性モードが存在せず、また和周波ラマンモードにも合致しないことから、表面フォノンモードとしてモードを特定した。DFT 計算による frozen phonon calculations を行うことで、実験により観測されたバンドのシフトに対応する原子変異を調べ、巨大なモードが非常に効率的に励起されていることが分かった。当初表面の赤外活性モードが励起されたと考えていたが、面直方向と比べ面内方向の励起における振動が圧倒的に大きく、また Bi_2Te_3 の 2-3 QL (quintuple layer) の表面モードが特異的に励起されていることから、光電場で駆動される電流がさらにフォノンモードをコヒーレントの励起している可能性が示唆されている。このシナリオをサポートするための理論モデルを構築するとともに、論文の執筆を進めている[8]。

⑥高繰り返し THz 光学系および小型超高真空チャンバーの立ち上げと今後の展開

2019 年 10 月から、マールブルクの Höfer 教授のグループで新しい THz 光学系の立ち上げを開始した。レーザンスブルクとの共同研究で用いているレーザーが 3 kHz の繰り返し周波数を持つものに対し、新しいレーザーは 200 kHz の繰り返し動作し、我々表面研究者が得意とする系統的な制御された試料系の測定を効率的に行うことを目指したものである。一方で 1 パルスあたりのエネルギーは小さくなるが、

同じく Huber 教授のグループの実験で 190 kHz の繰り返し周波数においても 中心周波数 40 kHz, パルス幅 150 fs の条件において 10 MV/cm の電場強度が得られている[5]. Huber 教授のグループのサポートを得て, 同様の光学系の立ち上げを進めた. さらに表面系試料に高強度テラヘルツ光を照射するための小型の超高真空チャンバーを設計し組み上げを行った.

さらに 2020 年 10 月からこの THz 光学系を, マールブルクの既存の時間分解 ARPES 装置と結合することで高繰り返しの THz-ARPES を目指す計画が開始された. 図 3(a)の模式図がセットアップの全体像を示す. ARPES チャンバーに接続された試料準備チャンバーで超高真空下での試料制御を行って THz-ARPES を行う一方, 通称 vacuum suitcase と呼ばれる持ち運び可能な移動可能な超高真空チャンバーを介して試料を上述の分光用小型超高真空チャンバーに運び, 同一の試料からの THz-HHG を観測する計画である. 図 3(b), (c)の写真に示すように図 3(a)の左半分は既に立ち上がっている. vacuum suitcase の運用は Höfer 教授のグループの他のメンバーが日常的に行っている. 現在, 電気光学サンプリング(EOS)によるテラヘルツ電場波形のキャラクタリゼーションを行っており, 大気条件下での THz-HHG 測定を進めている. その後, 超高真空下での THz-HHG 測定を行うとともに, 表面に原子層を蒸着して作成したトポロジカル界面状態の THz-ARPES と THz-HHG を行うことを目指している. これは 2021 年 3 月の中間審査で 2025 年までの延長が決定された "SFB1083 Internal Interfaces" における "Ultrafast Dynamics of Interface Currents" の中心的なプロジェクトである.

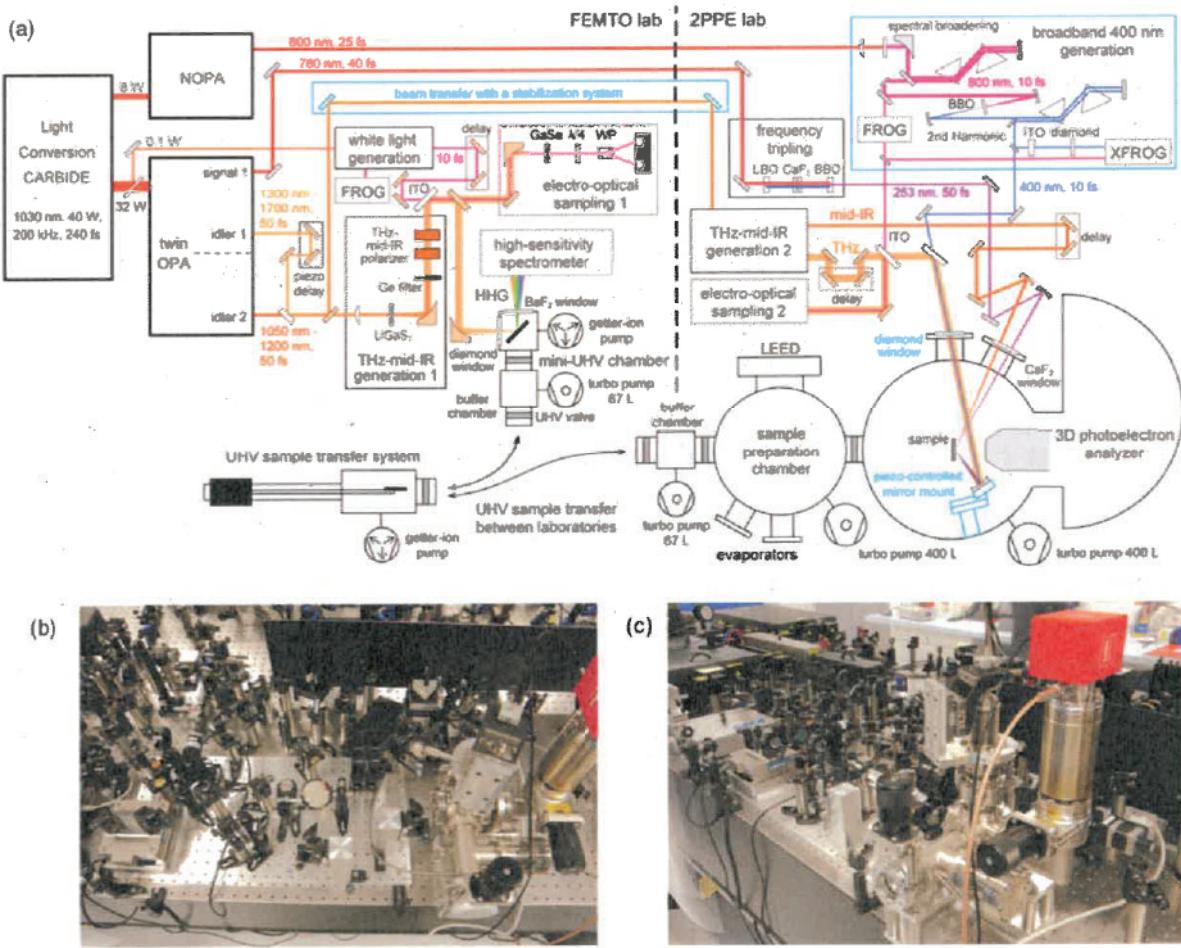


Fig. 3 (a) Schematics of a new experimental setup which enables THz-HHG and THz-ARPES measurements on the same system under ultrahigh vacuum (UHV) conditions. (b), (c) Photographs of the THz-HHG optical setup together with the compact UHV chamber.

References

- [1] J. Reimann *et al.*, Nature **562**, 396 (2018).
- [2] P. Zhang *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **82**, 043712 (2011).
- [3] C. P. Schmid *et al.*, Nature, 2020-08-15900C, to be published on 20 May 2021.
- [4] S. Ito *et al.*, in preparation.
- [5] M. Knorr *et al.*, Opt. Lett. **42**, 4367 (2017).
- [6] O. Schubert *et al.*, Nat. Photo. **8**, 119 (2014), M. Hohenleutner *et al.*, Nature **523**, 572 (2015), F. Langer *et al.*, Nature **533**, 225 (2015), F. Langer *et al.*, Nature **557**, 76 (2018).
- [7] M. Schüller and M. A. Sentef, arXiv 2103.15900.
- [8] S. Ito *et al.*, in preparation.