



## 平成 29 年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」 調査研究報告書(公開版)

### 【研究題目】

アト秒光電子顕微鏡のための基礎技術と応用に関する調査研究

### 【整理番号】

TK17-036

### 【代表機関】

東京大学

### 【調査研究代表者（氏名、連絡先 TEL & Mail）】

板谷 治郎 (04-7136-3535, jitatani@issp.u-tokyo.ac.jp)

### 【TIA 内連携機関：連携機関代表者】

福本 恵紀（高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所）

久保 敦（筑波大学 数理物質系物理学域）

### 【TIA 外連携機関】

なし

### 【報告書作成者】

板谷 治郎

### 【報告書作成年月日】

2018 年 4 月 1 日

### 【連携推進（具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等）】

研究代表者の板谷（東大物性研）および、連携機関代表者の福本（KEK）、久保（筑波大）は研究討議とメールによる研究進捗報告を随時行い、アト秒光電子顕微鏡に向けた議論を行った。また、アト秒光電子顕微鏡を実現しているドイツ・マックスプランク量子光学研究所の Matthias Kling 教授と意見交換を行い、既存の光電子顕微鏡にエネルギー分解能を付加することによって、アト秒ストリーク法を適用する手法が有望という結論を得た。

研究推進に関しては、本研究実施初期の議論および Kling 教授との意見交換で方向性が定まったことから、各グループの持つ装置を利用してアト秒光電子顕微鏡のための要素技術の開発を進めた。

### 【調査研究内容（実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果）】

研究代表者の板谷は、これまでに開発した位相制御された高強度極短パルス赤外光源を用いて、フォトンエネルギー100 eV 付近のアト秒パルスを発生し、アト秒ストリーク法による光電子分光によって、アト秒パルスの時間波形計測を実施した。赤外光電場（波長 1700 nm）で変調された光電子スペクトルを解析することにより、449 アト秒の極紫外パルスの計測に成功した。この成果は、赤外光電場による初めてのアト秒ストリーク計測であり、今後、赤外から中赤外の長波長電場を用いることにより、多光子励起による光電子放出を回避しつつ、光電子顕微鏡で測定される光電子の運動制御を行うことが期待出来る。板谷グループは、論文発表 1 報[I-1]、国際会議での発表 4 件（うち 2 件が口頭発表、2 件がポスター発表）[I-2,3,4,5]、および、国内学会等での発表 3 件（すべて招待講演）を行った。

連携機関代表者の福本（KEK）は、これまでに開発したフェムト秒光電子顕微鏡（ポンパルス：2.4 eV, 520 nm、プローブパルス 4.8 eV, 260 nm）を用いて、グラフェンおよび半導体表面・欠陥近傍でのキャリア移動・緩和過程の実時間イメージング計測を実現した。これまでに、時間分解能 240 fs、空間分解能 100 nm を達成した。福本グループは、論文発表 1 報[F-1]および、国際会議での発表 2 件（2 件とも口頭講演、1 件は招待講演）[F-2,3]を行った。



連携機関代表者の久保（筑波大）は、光電子顕微鏡の視野内で数フェムト秒の極短パルスで固体表面を局所的に励起するための極小集光反射光学系の開発を行った。パルス幅 12.2fs の広帯域極短パルスをスポットサイズ 5 $\mu$ m まで集光することに成功した、久保グループは、論文発表 2 報 [K-1,2]、国際会議での発表 2 件（2 件とも口頭発表、うち 1 件は招待講演） [K-3,4]、国内学会等での講演 5 件（すべて口頭講演、うち一件は招待講演） [K-5,6,7,8,9]を行った。

## 発表資料

- [I-1] (論文発表) Nariyuki Saito, Nobuhisa Ishii, Teruto Kanai, Shuntaro Watanabe, and Jiro Itatani, "Attosecond streaking measurement of extreme ultraviolet pulses using a long-wavelength electric field", Sci. Rep. 6:35594, CLEO:2016, San Jose, CA, USA, 5-10 June 2016.
- [I-2] (国際会議での口頭講演、Best Student Oral Paper 受賞) N. Saito, N. Ishii, T. Kanai, S. Watanabe, and J. Itatani, "Attosecond streaking of chirp-free high harmonics in the extreme ultraviolet driven by a long-wavelength infrared light source", The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'17), パシフィコ横浜 (横浜市西区), 18-21 April 2017.
- [I-3] (国際会議での口頭講演) Nobuhisa Ishii, Nariyuki Saito, Teruto Kanai, Shuntaro Watanabe, and Jiro Itatani, "Attosecond streaking measurement of extreme ultraviolet pulses using an infrared light source", CLEO:2016, San Jose, CA, USA, 5-10 June 2016.
- [I-4] (国際会議でのポスター発表) Nariyuki Saito, Nobuhisa Ishii, Teruto Kanai, Shuntaro Watanabe, and Jiro Itatani, "1.7- $\mu$ m-field driven attosecond streaking of XUV pulses", 理研シンポジウム: 第 2 回アト秒科学に関する国際シンポジウム, 理化学研究所鈴木梅太郎記念ホール (埼玉県和光市), 26 Aug 2017.
- [I-5] (国際会議でのポスター発表) Nariyuki Saito, Nobuhisa Ishii, Teruto Kanai, Shuntaro Watanabe, and Jiro Itatani, "1.7- $\mu$ m-field driven attosecond streaking of XUV pulses", 6th International Conference on Attosecond Physics (ATTO2017), Xi'an, China, 2-7 July 2017.
- [I-6] (国内会議での招待講演) 石井順久, 齋藤成之, 金島圭祐, 篠原康, 芦原聡, 石川 颯一, 板谷治郎, "赤外光源を用いた気体、固体からの高調波発生とその計測", 超高速光エレクトロニクス(UFO)研究会 第 1 回研究会, 名古屋大学ベンチャービジネスラボラトリー (名古屋大学東山キャンパス), 14 June 2017.
- [I-7] (国内学会での招待講演) 石井順久, 齋藤成之, 金井輝人, 板谷治郎, "極紫外パルスの赤外電場によるストリーク測定", レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, 徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市), 7-9 Jan 2017.
- [I-8] (国内学会での講演奨励賞受賞記念講演) 齋藤成之, 石井順久, 金井輝人, 渡部俊太郎, 板谷治郎, "極紫外アト秒パルスの赤外電場によるストリーク計測とその応用", 応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市), 13-16 Sep 2016.
- [F-1] (論文発表) Keiki Fukumoto, Mohamed Boutchich, Hakim Arezki, Ken Sakuran, Daniela Di Felice, Yannick J. Dappe, Ken Onda, and Shin-ya Koshihara, "Ultrafast electron dynamics in twisted graphene by femtosecond photoemission electron microscopy", Carbon 124, 49-56, (2017).

- [F-2] (国際会議での招待講演) Keiki Fukumoto, “Imaging of photogenerated electron dynamics on a semiconductor surface”, The 5th Advanced Electromagnetics Symposium, 2017/7/26-28, Seoul, Korea.
- [F-3] (国際会議での口頭発表) Keiki Fukumoto, “Imaging of carrier dynamics by time-resolved PEEM”, 7th FOCUS PEEM Workshop, 2017/6/21-23, Hunstetten, Germany.
- [K-1] (論文発表) Atsushi. Kubo, T. Sugiyama, T. Nakano, "Active-controlled plasmonic waveguides using GeSbTe superlattice", Proceedings of the 29th Symposium on Phase Oriented Science PCOS 2017, p. 37-40 (2017).
- [K-2] (論文発表) T. Sugiyama, A. Kubo, T. Nakano, "Optical modulator driven by electrical pulse-induced phase transition of [(GeTe)<sub>2</sub>/(Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)<sub>1</sub>]<sub>20</sub> superlattice", Proceedings of the 29th Symposium on Phase Oriented Science PCOS 2017, p. 51-52 (2017).
- [K-3] (国際会議での招待講演) A. Kubo, T. Sugiyama, T. Nakano, "Active-controlled plasmonic waveguides using GeSbTe superlattice", The 29th Symposium on Phase Change Oriented Science PCOS2017, Atami, Japan, 2017/11/17.
- [K-4] (国際会議での口頭講演) T. Sugiyama, A. Kubo, T. Nakan, "Optical modulator driven by electrical pulse-induced phase transition of [(GeTe)<sub>2</sub>/(Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)<sub>1</sub>]<sub>20</sub> superlattice", The 29th Symposium on Phase Change Oriented Science PCOS2017, Atami, Japan, 2017/11/16.
- [K-5] (国内会議での招待講演) 久保敦, "フェムト秒時間領域における表面電磁波の振る舞い", 第14回原子・分子・光科学(AMO)討論会, 電気通信大学, 2017/7/1.
- [K-6] (国内学会での口頭講演) 杉山岳, 久保敦, 中野隆志, “[[(GeTe)<sub>2</sub>/(Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)<sub>1</sub>]<sub>20</sub> 超格子の可逆的相転移を用いたプラズモン変調素子”, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017/9/6.
- [K-7] (国内学会での口頭講演) 大竹祐香, 久保敦, “MIM 型ナノキャビティを有する金属表面におけるフェムト秒表面プラズモン波束の挙動”, Optics & Photonics Japan 2017, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 2017/10/30.
- [K-8] (国内学会での口頭講演) 大竹祐香, 伊知地直樹, 久保敦, “金属-絶縁体-金属積層型ナノキャビティを配置した金属表面における フェムト秒表面プラズモン波束の伝搬”, 第 15 回プラズモニクスシンポジウム, 大分コンパルホール, 2018/2/2.
- [K-9] (国内学会での口頭講演) 大竹祐香, 伊知地直樹, 久保敦, “単一ナノキャビティのコヒーレント応答によるフェムト秒表面プラズモン波束の位相変調”, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 2018/3/17.

#### 【今後の予定】

今後は、各グループの開発した手法を結合して、まずは 10 フェムト秒程度の時間分解能を目指した光電子顕微鏡開発を行いたいと考えており、新たな資金獲得を模索している。また、アト秒精度の時間分解能達成のためには、高繰り返し（10kHz 以上）で波長域が真空紫外から極紫外（5 eV～100 eV）でのアト秒光源の開発が必要である。平成 30 年度より板谷グループでは申請していた科研費（基盤 A）が採択されたため、次世代光源の開発に着手する予定である。

以上。