

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05565

研究課題名(和文)ラジアル偏光場によるアト秒電子ビーム発生基礎研究

研究課題名(英文) Study on attosecond electron beam generation using radially polarized electric field

研究代表者

菅 晃一 (Kan, Koichi)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：60553302

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,800,000円

研究成果の概要(和文)：従来の電子ビーム診断の高度化により、パルス圧縮に有利な電子ビーム発生条件のパラメータ最適化を行った。また、レーザー変調器を用いたパルス圧縮手法により、サブフェムト秒のパルス構造を有する電子ビーム発生の研究を行った。電子ビーム発生条件のパラメータ最適化においては、コヒーレント遷移放射の強度測定により、シングルショットのバンチ長モニタへの可能性が明らかとなった。光伝導アンテナを用いた研究では、電子ビームから発生したテラヘルツ電場の向き・強度を測定可能であることが分かった。レーザー変調器の研究では、一次の相互作用を通じたサブフェムト秒電子ビーム変調の理論的研究を行った。

研究成果の概要(英文)：Optimization of magnetic bunch compressor was performed based on monitoring intensity of coherent transition radiation from femtosecond electron bunches. Monitoring the intensity indicated possibility of single-shot electron bunch length monitor. Feasibility of photoconductive antenna was investigated for the measurement of THz electric field direction and distribution. Laser modulator was also investigated for modulation of sub-femtosecond electron bunch via first-order interaction.

研究分野：電子ビーム加速器

キーワード：超短パルス電子ビーム テラヘルツ波 時間領域分光 レーザー変調器

## 1. 研究開始当初の背景

量子ビーム誘起超高速反応は、量子ビームが1分子を通過するアト秒の時間領域のイオン化から開始する。このような超高速反応の解明は、重粒子線治療や原子炉水化学の分野だけでなく、将来的には電離放射線が利用されるナノファブリケーションの分野からも、強い要請がある。これまでに、我々の施設では、フェムト秒電子ビームを励起源として試料に照射するパルスラジオリシスで、凝縮層におけるピコ秒・フェムト秒領域の量子ビーム誘起超高速反応を明らかにしてきた。現在、このような短パルス電子ビームの多くは、従来からのマイクロ波を用いて加速され、磁場によるパルス圧縮がなされてきた。また、パルス電子ビームは、ビームの大きさ(ビーム径・パルス幅)に依存した電磁場を絡うため、電磁波の研究にも利用されている。

これまでに、電子ビームが放射するテラヘルツ波(遠赤外線、波長  $\sim 300 \mu\text{m}$ )に関する研究として、光伝導アンテナを用いた研究を行った。半導体上に微細構造電極を有する大口径光伝導アンテナを開発し、テラヘルツ電場の検出に応用した。その結果、光誘起電流の測定により、フェムト秒電子ビームの放射するラジアル偏光テラヘルツ電場波形の検出が可能であることを実証した。

さらに、中赤外線(波長  $10\sim 15 \mu\text{m}$ )の研究では、磁気パルス圧縮されたフェムト秒電子ビームの発生する電磁波に対して、マイクロメートル干渉計を用いた自己相関計測によるパルス幅測定を行った。その結果、パルス幅

## 2. 研究の目的

本研究では、従来の電子ビーム診断の高度化により、パルス圧縮に有利な電子ビーム発生条件のパラメータ最適化を行う。また、レーザー(波長  $800 \text{ nm}$ )のラジアル偏光場もしくはレーザー変調器を用いた新しいパルス圧縮手法により、サブフェムト秒のパルス構造を有する電子ビーム変調を目的とする。さらに、変調された電子ビームを用いて、フェムト秒・アト秒領域の量子ビーム誘起現象の初期過程(イオン化)の解明を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、

- 電子ビーム診断の高度化
- レーザー変調器を用いた電子ビーム圧縮手法の研究

を行った。実験では、大阪大学産業科学研究所に既設のフォトカソード高周波(RF)電子銃加速器を用いて研究を行った。それぞれの研究における研究方法・成果の詳細を「4. 研究成果」に示す。

## 4. 研究成果

### 4. 1. 電子ビーム診断の高度化

これまでに、マイクロメートル干渉計を用いて、フェムト秒電子ビームが発生したコヒーレント遷移放射(CTR, coherent transition radiation)の計測を行ってきた。マイクロメートル干渉計を用いた測定では、放射されたテラヘルツ波の周波数領域の測定を行う場合、可動鏡を掃引する必要がある。その結果、例えば、 $10 \text{ Hz}$ の電子ビームに対して、 $260$ のサンプル数でインターフェログラムを取得する場合は $26$ 秒以上を要する。パンチ形状因子に基づけば、電子ビームの電荷量(電子数)が一定で、パルス幅が変化した場合、コヒーレント放射によるテラヘルツ収量が変化する。

そこで、電子ビーム診断の高度化を目的として、電子ビームからのコヒーレント遷移放射(CTR)の強度測定を通して、シングルショットパンチ長モニタの可能性についての研究を行った。

フェムト秒電子ビームからのCTRを測定するために、フォトカソードRF電子銃加速器を用いてフェムト秒電子ビームの発生を行った。加速器は、フォトカソードRF電子銃、加速管、磁気パルス圧縮器により構成される。電子ビーム発生では、カソード駆動用のフェムト秒レーザーの第三次高調波( $266 \text{ nm}$ )を用いた。電子ビームは加速管において $35 \text{ MeV}$ まで加速された。最終的に、磁気パルス圧縮器において、電子ビームはパルス圧縮された。電荷量は $13 \text{ pC}$ であった。図1に、ポロメータ出力の四極電磁石(Q5-8)の磁場勾配依存性を示す。ポロメータ検出器出力はCTRの強度に相当する。四極電磁石は磁気パルス圧縮器中に設置された電磁石である。圧縮器の中間地点は四極電磁石Q6とQ7の間に位置する。ビーム軌道の鏡像を考慮し、Q5とQ8の磁場強度、Q6とQ7の磁場強度を、それぞれ、同一にした。その結果、四極電磁石の調整によりCTRの強度は変化し、アクロマティック条件の時に強度が大きくなることを確認した。

インターフェログラムの圧縮器条件の依存性も比較することにより、CTRの強度測定のみによるシングルショットのパンチ長モニタへの可能性が明らかとなった。

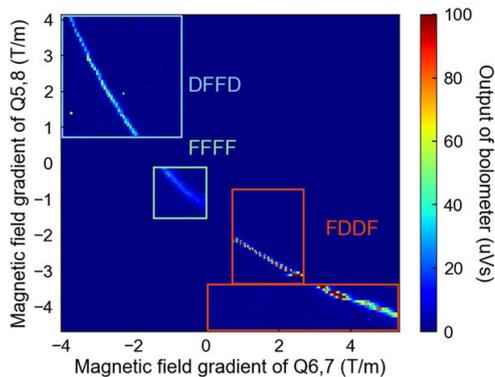


図1. ボロメータ検出器出力の四極電磁石 (Q5・8) 磁場強度依存性。赤と緑と青の領域は、磁石の電子ビーム収束条件配列として、それぞれ、FDDF、FFFF、DFFDを示す。FおよびDは、それぞれ、電子ビームを水平方向に収束および発散させる磁場条件である。

また、光伝導アンテナを用いた電子ビーム電場の時間領域計測の面からモテラヘルツ計測の発展を行った。CTR 発生用のミラーにおける電子ビームの水平位置を偏向電磁石により調整することにより、CTR 発生点を変化させた。同時に、電子ビームと同期した電場測定光伝導アンテナへのレーザー照射時間遅延を掃引した。その結果、図2に示すように、観測点 (光伝導アンテナ) を固定した場合、CTR の発生位置によって時間波形 (極性) が反転することが分かった。今後、CTR 電場中心の解析、多点での電場方向・分布計測の応用が期待される。

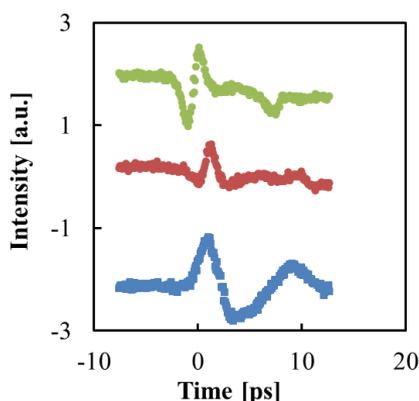


図2. CTR 発生点を変化させたときの電場波形・極性の変化。上から、正の水平位置、中心、負の水平位置で発生した CTR の電場波形を示す。

#### 4.2. レーザー変調器を用いた電子ビーム圧縮手法の研究

レーザー変調器における一次の相互作用を通した電子ビーム圧縮手法の研究を行った。レーザー変調器では、アンジュレータ (周期磁場) 内で電子ビームとレーザーを同軸で入射し、電子ビームのエネルギー変調を行う

手法である。エネルギー変調とモメンタムコンパクションファクター ( $R_{56}$ ) の組み合わせにより、電子ビームの進行方向の密度変調が可能となる。また、効率的にエネルギー・密度変調を行うためには、光源としてのアンジュレータにおける発振波長と同じ波長のレーザーを入射する必要がある。

図2に、アンジュレータの磁場分布の計算結果を示す。Poisson Superfish コードを用いて磁場を計算した。図2(a)に、着磁方向が180度異なる2種類の磁石を交互に並べた断面図を示す。磁石は永久磁石を想定した。上下の中央の6組の磁石については、磁場の周期長 6.6 mm の半分の長さを考慮し、幅: 3.3 mm、高さ: 10 mm の磁石を配置した。上下の端には、磁場分布を整形するために、幅: 1.65 mm、高さ: 10 mm の磁石を配置した。図2(b)に、ギャップ長  $g$  を最適化した時の電子ビーム軸上 (ギャップ中心) の磁場分布を示す。磁場強度は 2.5 kG 程度となり、32.5 MeV の電子ビームにおいて、800 nm 近辺の発振波長となることが分かった。

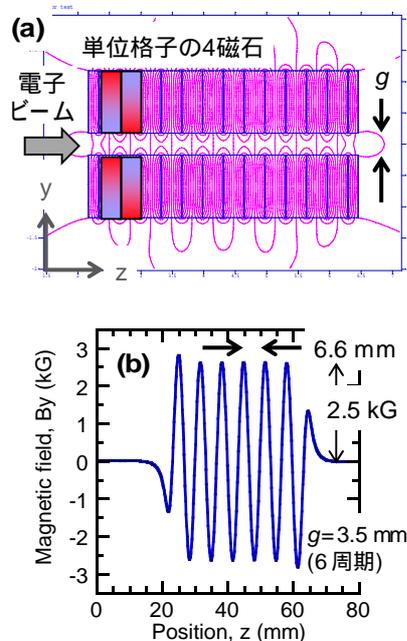


図3.(a)アンジュレータ磁場計算における断面図。ギャップ長  $g$  を可変とした。(b)電子ビーム軸上の磁場分布。

上記のアンジュレータ計算結果を基に、一次の相互作用に基づくレーザー変調器における電子ビームトラッキングの計算を行った。レーザー変調器 (周期長 6.6 mm、周期数 20、アンジュレータパラメータ 0.15、基本波発振波長 800 nm) における、電子ビーム (エネルギー 32.5 MeV、電荷量 2 pC、パルス幅 9 fs、エネルギー分散 0.1%) に対するレーザー変調 (レーザー波長 800 nm、レーザーパルス幅 100 fs、パルスエネルギー 200 uJ、パワー 2 GW に相当) の理論的な研究を行った。下流に 100 mm の自由空間を想定し、

電子ビームトラッキングコード ELEGANT を用いた計算を行った。図 4 に変調前後の電子ビーム時間プロファイルの結果を示す。その結果、レーザー波長に相当する時間間隔 2.7 fs 毎にサブフェムト秒の時間構造へ密度変調できることが明らかとなった。また変調後のピーク電流は、変調前の約 2 倍となることも分かった。

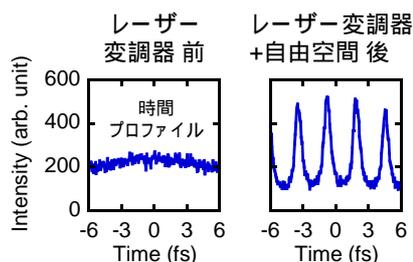


図 4. 変調前後の電子ビーム時間プロファイル。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. K. Kan, J. Yang, A. Ogata, T. Kondoh, M. Gohdo, H. Shibata, Y. Yoshida, Generation of terahertz waves using ultrashort electron beams from a photocathode radio-frequency gun linac, *Electron. Comm. Jpn.* 99, 22-31 (2016). (peer-reviewed)  
DOI: 10.1002/ecj.11767
2. K. Kan, Z. Huang, G. Marcus, Z. Zhang, Intense THz source based on laser modulator and bunch compressor with electron beam ranging from 35 to 50 MeV, *Proceedings of NOCE 2017*, in print. (no peer-reviewed)

〔学会発表〕(計 20 件)

1. K. Kan, M. Gohdo, T. Kondoh, I. Nozawa, A. Ogata, T. Toigawa, J. Yang, Y. Yoshida, Measurement of temporal electric field of electron bunch using photoconductive antenna, The 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC'15), May 3-8, Richmond, USA (2015).
2. K. Kan, J. Yang, A. Ogata, T. Kondoh, M. Gohdo, I. Nozawa, T. Toigawa, K. Norizawa, Y. Yoshida, Observation of quasi-free electrons using terahertz pulse radiolysis, The 15th International Congress of Radiation Research (ICRR 2015), May 25-29, Kyoto, Japan (2015).
3. K. Kan, J. Yang, A. Ogata, M. Gohdo, T. Kondoh, S. Sakakihara, I. Nozawa, K. Norizawa, T. Toigawa, H. Shibata, S. Gonda, and Y. Yoshida, Measurement of coherent transition radiation from electron beam using large-aperture photoconductive antenna, The 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2015), Aug. 23-28, Hong Kong, China (2015).
4. K. Kan, J. Yang, T. Kondoh, M. Gohdo, I. Nozawa, Y. Yoshida, Generation and detection of terahertz pulse from photocathode RF gun linac, The 7th Asian Forum for Accelerators and Detectors (AFAD2016), Feb. 1-3, Kyoto, Japan (2016).
5. K. Kan, J. Yang, T. Kondoh, M. Gohdo, I. Nozawa, Y. Yoshida, Time-domain measurement of electric field emitted from electron beam using photoconductive antenna, EMN Meeting on Terahertz 2016, May 14-18, San Sebastian, Spain (2016). Invited
6. K. Kan, M. Gohdo, T. Kondoh, I. Nozawa, J. Yang, Y. Yoshida, Frequency and time domain measurement of coherent transition radiation, 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC2016), May 8-13, Busan, Korea (2016).
7. K. Kan, M. Gohdo, T. Kondoh, I. Nozawa, J. Yang, Y. Yoshida, Measurement of femtosecond electron beam based on frequency and time domain schemes, International Beam Instrumentation Conference (IBIC2016), Sep. 11-15, Barcelona, Spain (2016).
8. K. Kan, J. Yang, M. Gohdo, T. Kondoh, I. Nozawa, Y. Yoshida, Characterization of THz pulse emitted from femtosecond electron bunch using photoconductive antenna and interferometer, IRMMW-THz 2016, Sep. 25-30, Copenhagen, Denmark (2016).
9. K. Kan, J. Yang, M. Gohdo, T. Kondoh, I. Nozawa, Y. Yoshida, Measurement of coherent transition radiation using interferometer and photoconductive antenna, NAPAC2016, Oct. 9-14, Chicago, USA (2016).
10. 菅晃一、楊金峰、小方厚、近藤孝文、神戸正雄、野澤一太、吉田陽一、フェムト秒電子ビームの二段階パルス圧縮に関する検討、第 12 回日本加速器学会年会、8 月 5 日-7 日、福井 (2015).
11. 菅晃一、楊金峰、小方厚、近藤孝文、神戸正雄、野澤一太、樋川智洋、吉田陽一、アンジュレータを用いた電子ビームパルス圧縮手法の検討、日本原子力学会「2015 年秋の大会」、9 月 9 日-11 日、静岡 (2015).

12. 菅晃一、楊金峰、近藤孝文、神戸正雄、野澤一太、吉田陽一、パルス電子ビームのコヒーレント遷移放射の周波数・強度解析に関する研究、平成 27 年度核融合科学研究所一般共同研究、1 月 20 日、岐阜 (2016).
13. 菅晃一、楊金峰、小方厚、近藤孝文、神戸正雄、野澤一太、吉田陽一、コヒーレント遷移放射の時間・周波数領域測定、日本物理学会 第 71 回年次大会、3 月 19 日-22 日、宮城 (2016).
14. 菅晃一、楊金峰、近藤孝文、神戸正雄、野澤一太、吉田陽一、電子ビームの発生した電場の時間・周波数領域測定、日本原子力学会「2016 年春の年会」、3 月 26 日-28 日、宮城 (2016).
15. 菅晃一、楊金峰、近藤孝文、神戸正雄、野澤一太、吉田陽一、超短パルス電子ビームが発生するテラヘルツパルスの時間領域分光、第 53 回アイソトープ・放射線研究発表会、東大、7 月 6 日-8 日、東京 (2016)
16. 菅晃一、楊金峰、近藤孝文、神戸正雄、野澤一太、吉田陽一、干渉計と光伝導アンテナを用いたフェムト秒電子ビーム計測、第 13 回日本加速器学会年会、8 月 8 日-10 日、千葉 (2016).
17. 菅晃一、楊金峰、近藤孝文、神戸正雄、野澤一太、吉田陽一、干渉計と光伝導アンテナによる電子ビーム計測、日本原子力学会 2016 年秋の年会、9 月 7 日~9 日、福岡 (2016).
18. 菅晃一、楊金峰、近藤孝文、神戸正雄、野澤一太、吉田陽一、フォトカソード RF 電子銃ライナックを用いたテラヘルツパルス発生と利用、第 59 回放射線化学討論会、9 月 20 日~22 日、群馬 (2017)
19. 菅晃一、楊金峰、近藤孝文、神戸正雄、野澤一太、吉田陽一、中空誘電体管における多モードテラヘルツ波発生と電子ビーム加速の理論的研究、第 14 回日本加速器学会年会、8 月 1 日-3 日、北海道 (2017).
20. K. Kan, Z. Huang, G. Marcus, and Z. Zhang, THz FEL using laser modulator and bunch compressor, 日本物理学会 第 73 回年次大会、3 月 22 日-25 日、東京 (2018).

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

菅 晃一 (KAN, Koichi)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号 : 60553302