

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18758

研究課題名(和文)テラヘルツ波電子加速器の実現に向けた挑戦的研究

研究課題名(英文)Challenging research toward realization of THz-wave electron accelerator

研究代表者

柏木 茂(Kashiwagi, Shigeru)

東北大学・電子光理学研究センター・准教授

研究者番号：60329133

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ波駆動電子加速器の実現に向けて、粒子加速器としてシステムを成立させるために「加速に用いる電磁波の波長」と「加速される電子ビームのサイズ」のスケールマッチングを重要課題と考え、基盤要素開発を行った。本研究では、極短電子ビーム源およびテラヘルツ波加速構造体とテラヘルツ波入力機構の開発を行った。最終的にフォトカソード用ファイバーレーザーシステムの設計および試験システムを構築し、約100fsのレーザーパルス生成に成功した。また、シミュレーションによりフォトカソード電子銃で生成されるビーム特性を明らかにした。そして、加速構造体の基本設計と偏光素子を用いたテラヘルツ波のモード変換法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、テラヘルツ波駆動の電子加速器の可能性について、電子源および加速構造体についてその課題を明らかにすることができたことは、テーブルトップサイズの粒子加速器の小型化に向けた大きな一歩であり、基礎科学から産業応用まで幅広い分野に大きな影響を与えるものである。特に、ビームと加速電磁波のスケールマッチングを軸として研究に取り組み、実現性と信頼性の両方を考慮した学術的にも意義のある研究である。

研究成果の概要(英文)：To realize a THz wave-driven electron accelerator, the scale matching of "Wavelength of the electromagnetic fields used for beam acceleration" and "3D beam size" is the key issue. In this research, we developed the electron source for generating the extremely short beam and an accelerating structure for THz wave with feed coupler. In the development of a DC photocathode electron gun, we clarified the parameters required to generate femtosecond electron pulses. A prototype of the Yb fiber laser for the photocathode has been build and succeeded to generate less than 100 fs laser pulse. In the design study of THz structure, we considered a type in which a dielectric is attached to the inside of a conductor. THz waves are converted from linearly polarized to radially polarized wave and faded through a tapered coupler. We demonstrated the polarization manipulation using the THz wave generated by the accelerator and established the technology for the polarization control.

研究分野：加速器・ビーム物理

キーワード：テラヘルツ波 極短電子ビーム 加速器 レーザー フォトカソード

### 1. 研究開始当初の背景

電子加速器は、放射光光源や電子陽電子衝突型直線加速器、電子線回折装置など、基礎研究はもちろん幅広い分野で利用されている。加速器はこれまで装置が大型であるため、その小型化が大きな課題だとされてきた。加速器のサイズとコストは、どれだけ高い加速勾配を得られるかによって決まってくる。極めて高い加速勾配が実現できればシステムをコンパクトにでき、その汎用性も高まり普及拡大に繋がる。こうした背景から、現在、コンパクトなテーブルトップサイズの加速器実現に向け、チタンサファイアレーザーなどを使ったレーザープラズマ加速器が世界中で開発が進められており注目を集めている。しかし、我々はレーザープラズマ加速器では「加速に用いる電磁波の波長」と「加速される電子ビームのサイズ」のスケールマッチングが成立していないと考えた。また、我々は時間幅 100 fs (30 $\mu$ m) 以下の電子ビーム生成にも成功していることもあり、波長が数百 $\mu$ mから数mm程度のテラヘルツ波であればビームと電磁波のスケールマッチングが成立すると考え、テラヘルツ波駆動の電子加速器開発に着手した。本研究が開始された当初は、世界でのテラヘルツ波駆動の加速器開発は米国と独国の幾つかの研究所で行われているだけであった。また、日本国内でも最近では分子研の平等氏がチップレーザーを用いたテラヘルツ波加速器の開発を開始している。

### 2. 研究の目的

本研究では、マイクロ波を使った通常の高周波加速器よりも高い加速勾配が実現でき、レーザープラズマ加速器で要求される厳しいアライメントやタイミング精度を必要としない、ビーム加速にテラヘルツ波を用いるテーブルトップサイズのテラヘルツ駆動電子加速器の実現に向けた基盤技術開発を行った。加速器の主要コンポーネントである加速構造体と電子源について、シミュレーション等により具体的に検討を進めることにより、テラヘルツ波駆動電子加速器を実現するために必要な性能を明らかにすることである。最終的な目的は、レーザー光で電子ビームを生成し、レーザー光で加速電場(テラヘルツ波)を発生する、全「光」ベースのテラヘルツ波駆動電子加速器を提案することであり、本研究を通してテラヘルツ駆動加速器の実現性を確認する。

### 3. 研究の方法

粒子加速器として成立させるためには、「加速に用いる電磁波の波長」と「加速される電子ビームのサイズ」のスケールマッチングが重要と考え、加速器の主要コンポーネントである電子源および加速構造体について基礎研究をおこなった。図1にテラヘルツ波駆動電子加速器の概念図を示す。テラヘルツ波により加速するための電子ビームを生成し、その電子ビームを加速するためのテラヘルツ波加速管および加速管へのテラヘルツ波供給のためのシステム開発について、既存の加速器システムなどを有効利用することにより基盤技術の開発を行った。(1)極短電子ビーム源、(2)テラヘルツ波加速構造体の2つのテーマを設定して研究を遂行した。

#### (1) 極短電子ビーム源

電子源については、テラヘルツ波で加速するために電子ビームパルス幅は加速電場の波長よりも十分に短い必要がある。粒子加速器において電子ビームを発生するために、熱カソードやフォトカソードが広く使用されている。前者は金属から熱電子を取り出す手法、後者は陰極に紫外光パルス照射し光電効果により電子を生成する手法である。後者のフォトカソードの最大の利点は、カソードの時間応答特性を考慮する必要はあるが、基本的にレーザーパルスの時間幅で電子ビームを生成することができる。本研究では、100 $\mu$ m (300 fs) 以下の電子ビームを直接生成することが可能なフォトカソードを電子源に採用することとした。また、陰極(カソード)で発生した電子パルスを空間電荷効果により広がってしまう前に電場により加速する必要がある。近年、フォトカソードと高周波(RF)空洞を組み合わせたフォトカソード RF電子銃は、低エミッタンスビームが生成可能であるため世界中で開発が進められている。しかし、クライストロンなどの高周波源が必要であるため、システムが大規模になってしまう。そこで本研究では、比較的システムが構築し易い 100kV 程度の直流電場により電子を引き出す直流電圧印可(DC)型フォトカソ

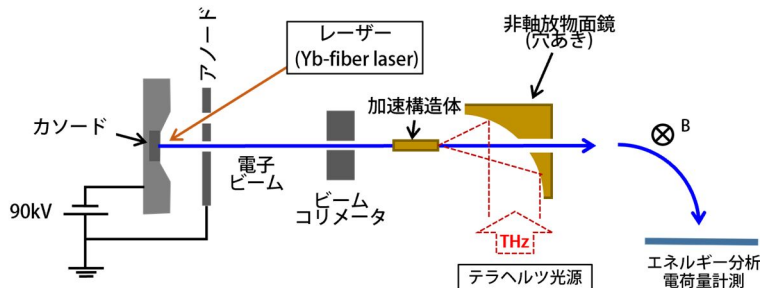


図1: テラヘルツ波駆動電子加速器の概念図

ード電子銃の開発を行うこととした。具体的には、フォトカソードに用いる超短レーザーパルスを生産するシステム設計、カソードで生成した電子バンチが直流印可電圧によりどのように引き出されるか、ビーム動学的考察をシミュレーションにより行った。

## (2) テラヘルツ波入力と加速構造体

加速構造体へのテラヘルツ波入力については東北大学電子光物理学研究センターの試験加速器(t-ACTS)を用いて実際にテラヘルツ波を発生させ、その偏光方向制御および輸送光学系に関する研究を行った。ラジアル偏光したテラヘルツ波を非軸放物面鏡で集束させ、加速構造体に入力する方法について検討を行った。また、加速構造体については筒状の導体の内部に誘電体を挿入するタイプの加速構造体を検討した。構造が極めてシンプルであることと、導体管の内側に挿入する誘電体の厚さや誘電率によって、テラヘルツ波の波長(周波数)を変えることができる。通常の高周波加速管における入力カプラー部分については、テーパ形状の導波路によるテラヘルツ波入力を検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 極短電子ビーム源

電子ビーム源については、最初に光電効果により生成された電子ビームが、カソードとアノード間の引き出し電場により、どのように加速されるかシミュレーションコードを用いて明らかにした。計算に用いた電子銃は極めてシンプルなフラットなカソードとアノード(距離: 15 mm)に直流の高電圧が印可するものを仮定した(図2)。初期の電子パルスの時間幅が極めて短いため、1バンチあたりの電荷量が 1pC の場合においても空間電荷効果の影響によりバンチ伸長が生じる(図3(上))。バンチ電荷量、ビーム引き出し電圧、初期バンチ長(レーザーパルス長)などがビーム軸に沿ってどのように変化するかを調べた代表的な結果を図3に示す。カソード表面での電子パルスの空間サイズ(時間幅と横方向ビームサイズ)が小さくなると空間電荷効果の影響により、ビームが縦方向にも横方向にも広がってしまう。図3(上)からも分かるように、初期の時間幅が 200fs と極めて短いため、1バンチあたりの電荷量が 1pC よりも大きい場合にはすぐに数 ps オーダーまでバンチは伸長してしまう。空間電荷効果によるバンチ伸長を抑制するためには、高い引き出し電場で電子ビームを一気に加速させることが有効であるが、今回、我々は汎用性や信頼性、システムをコンパクトにするといったコンセプトから、電子銃の印可電圧を 90kV とした。この印可電圧で、バンチが殆ど伸びないバンチ電荷量やパルス長をシミュレーションに探求し、電荷量は 500fC、初期電子パルス長は 200fs という一つの解に到達した。

また、本研究におけるシミュレーションによるパラメータサーチの中で、電子パルスがアノードを通過する際にわずかではあるがバンチングされることが分かった(図3(中)など)。この効果は、空間電荷効果によるビームが横方向に電子が運動量をもつこととアノードアイリス部で引き出し電場に横方向成分が生じることから起こる。このことから、アノードのアイリス径の選択も極短電子ビーム生成には極めて重要であることが明らかになった。

フォトカソードに用いるレーザーシステムに関する開発は、分担者である坂上を中心に行った。シミュレーションコードの結果を踏まえ、100 fs 以下のレーザーパルスのカソードに照射しても空間電荷効果の影響が強く、バンチが直ちに伸びてしまうことが分かったため、本研究

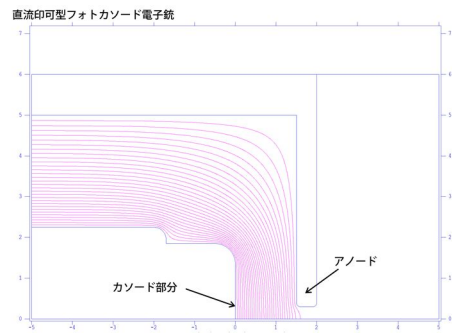


図2: フォトカソード電子銃(カソード部)

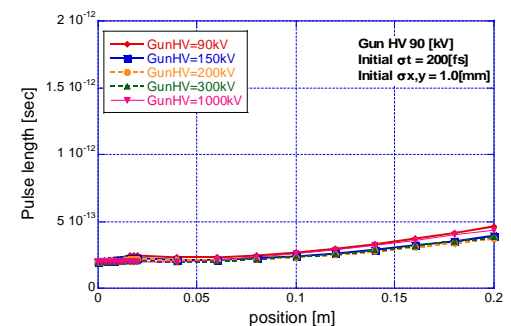
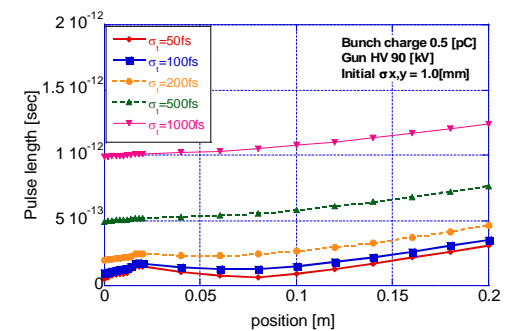
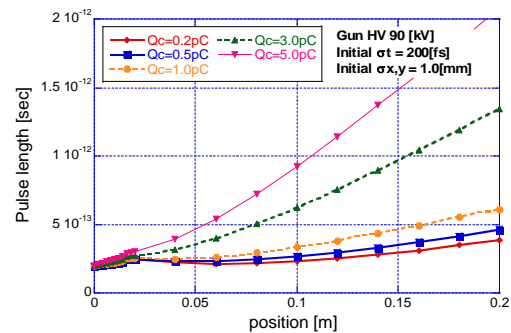


図3: カソード付近の電子ビームパルス長変化、(上)電荷量依存性(中)初期パルス長依存性、(下)引き出し電圧依存性

では 200fs (rms) 程度のレーザーパルスを生成できるシステムの設計を行った。パルス幅の条件を満足し、また安定性やコストなどから、基本波長が 1030nm の Yb ファイバーレーザーを選択した。加速器側との同期はシード共振器(119 MHz)内のピエゾアクチュエータにより実現する。図 4 にファイバーレーザーシステムのオシレータ部と増幅部の構成を示す。そして、増幅後のレーザーパルス幅は、自己相関法を用いて計測した。その結果、

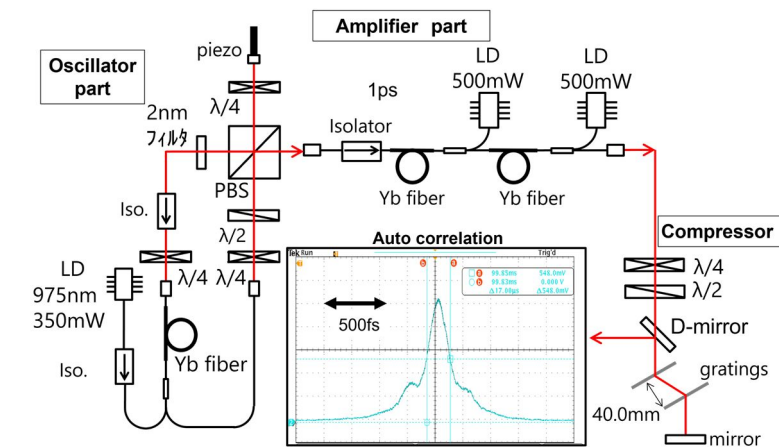


図 4: Yb ファイバーレーザーシステム

半値全幅(FWHM)で 192fs のレーザーパルスを発生させることに成功した。実際に、電子ビーム発生を行う際は、レーザーの分散を調整することにより 200fs (rms) 程度までパルスを伸ばして使用する。また、カソード材料は種々の基礎研究の結果から、量子効率は低いが応答速度が半導体よりも早い金属カソード(銅)が最適だという結論に至った。

## (2) テラヘルツ波加速構造体と電磁波入力方法

加速構造体は電磁場解析コードを用いてその基本設計を行った。加速構造体は、導体の内部に高い誘電率の誘電体を挿入することで共振周波数や位相速度、群速度を調整できるようにした。最初は、共振空洞として誘電体を挿入することで共振モードがどのように変化するかを確認し(図 5) 次に同軸導波路にインパルスを与えることによりテラヘルツ波の入力を模擬し、電磁波の伝搬に関する電磁場解析を行った。計算例を図 6 に示す。このときのテラヘルツ波の周波数は約 0.25THz、波長は約 1.2mm とした。加速構造体の全長は 3 mm、図 6 の右側部分の同軸構造体側から電磁波が入力されるようになっている。中間部分に円形導波管の形状をした結合部を設けた。ここでテーパ状の部分に加え十分な長さの円形導波管部を確保した理由は、導波管の中をどのように電磁波を伝搬していくかを確認するためである。実際には、この電磁波結合部にも電子ビームが通過するということと電磁場損失の観点から、できる限り導波路は短い設計とすることとした。

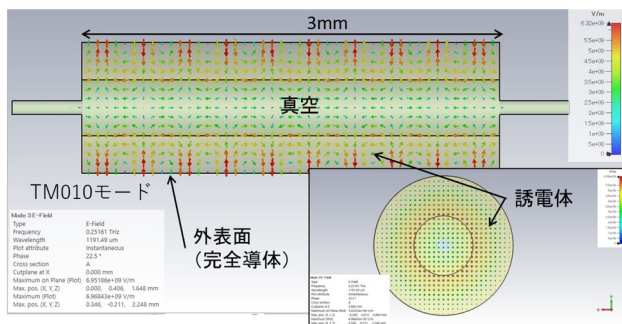


図 5: 加速構造体 (導体+誘電体 Er=5.5)

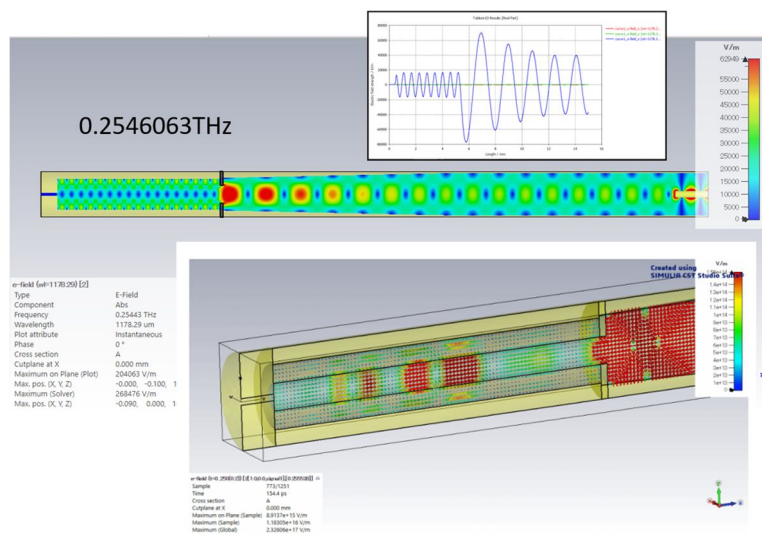


図 6: 加速構造体とテーパ型入力結合器部および同軸導波路

また、加速構造部と結合導波管の間のアイリス径および壁厚は、加速構造体の共振周波数において、結合係数が 1 になるように設計した。この時、結合度がアイリス径で変わると同時にわずかではあるが、加速構造体内の共振周波数も変化するので十分に配慮が必要であることが分かった。図 6 下側に示したように、加速構造体の中を電磁場が伝搬していく様子が分かる。最終的に、加速に用いるテラヘルツ波の波長によって、導体管の直径、誘電体の誘電率および厚さを調整することができることを電磁場解析コードで明らかにすることができた。

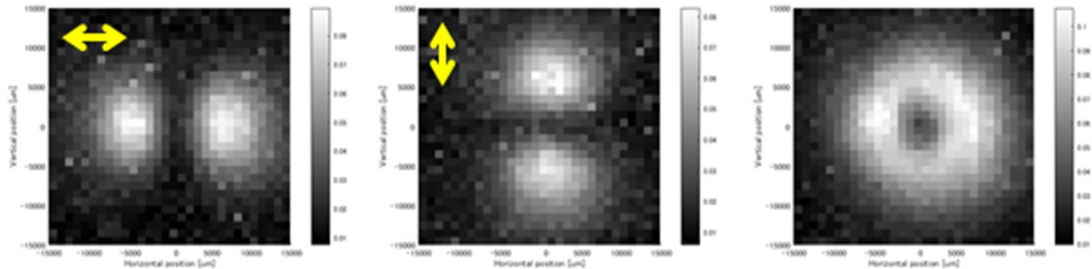


図7：ワイヤーグリッド偏光子を用いて測定した、コヒーレントTHz 遷移放射の空間プロファイル  
(左)水平偏光成分(中央)垂直偏光成分(右)全偏光成分・ラジアル偏光

テラヘルツ波を加速構造体へ入力するためのテラヘルツ波の偏光操作に関する基礎研究を東北大学電子光物理学研究センターの試験加速器(t-ACTS)において実施した。図1の概略図で示したようにテラヘルツ波を加速構造体へ入力する際は、ラジアル偏光に変換する必要がある。レーザーベースのテラヘルツ波光源においても、その偏光は直線偏光であるので直線偏光がラジアル偏光へと変換する機構は必要である。テラヘルツ波源に加速器ベースの光源を使用する場合には、遷移放射光はその偏光がもともとラジアル偏光であるため(図7)非軸放物面鏡を使い集束させることにより容易に加速構造体へ入力することが可能である。フェムト秒オーダーの非常に時間幅の短い電子パンチを使うことで、コヒーレントな遷移放射を発生させることが可能であるので、コヒーレント遷移放射は加速器ベースのテラヘルツ波源の有力な候補である。しかし、コヒーレント遷移放射のスペクトルは発生に用いる電子パンチのパンチ形状因子で決まる比較的広いスペクトル幅を有するため、加速構造体の共振周波数以外のテラヘルツ波は入力結合部において反射してしまい加速に用いることができないため、非効率である。その他にも、遷移放射は円環状に放射されるため、加速構造体の中で軸上電場が弱くなることが懸念される。(電磁場解析では軸上電場の減少は確認できていない)

加速器ベースのテラヘルツ波源では、遷移放射の他にコヒーレントアンジュレータ放射も候補として考えられる。コヒーレントアンジュレータ放射は、図8に示したようにその共鳴波長で極めて強い放射を得ることができるという特長がある。平面型アンジュレータからの放射は直線偏光であるが、本研究で開発したセグメント偏光素子を用いることにより容易に直線偏光からラジアル偏光へと偏光操作が可能である。その原理と開発した4セグメント偏光素子の写真を図9(左)に示す。またラジアル偏光に変換される前の水平偏光のコヒーレントアンジュレータ放射を図9(右)に示す。遷移放射と違い軸上にも放射があるため、偏光操作後のテラヘルツ波を非軸放物面鏡などの集光光学系を使い加速構造体へ直接入力することが可能である。

本研究では、テラヘルツ波駆動電子加速器の実現に向けた基礎研究としてフォトカソード用パルスレーザーを含む極短電子ビーム源開発および加速構造体とテラヘルツ波偏光操作法の開発を行った。加速器用いる電子ビームのパルス長の選択が極めて重要であることが明らかになった。加速構造体へのテラヘルツ波の入力については、セグメント偏光素子と集光光学系を用いることで実現できることを分かった。

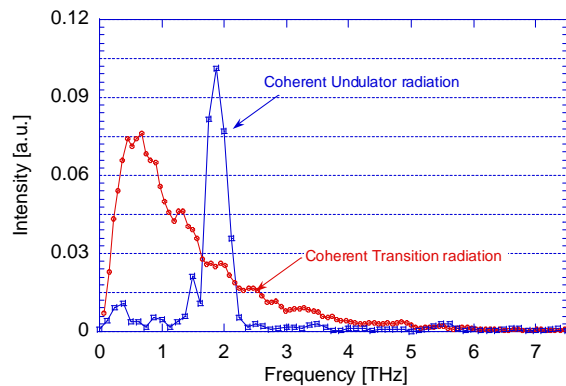


図8：コヒーレント遷移放射とアンジュレータ放射

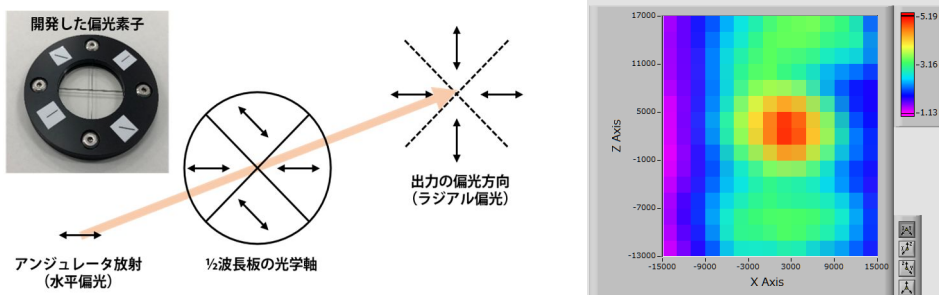


図9：(左)セグメント偏光素子を用いた偏光操作の原理、(右)アンジュレータ放射の空間プロファイル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shigeru Kashiwagi, Hirotooshi Saito, Fujio Hinode, Yuto Ishizuki, Ken Kanomata, Sadao Miura, Nozomu Morita, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa, Ken-ichi Nanbu, Koutaro Shibata, Ken Takahashi, Kento Terada, Hiroki Yamada, Hiroyuki Hama, Heishun Zen, Akinori Irizawa	4. 巻 106
2. 論文標題 Demonstration of variable polarized coherent terahertz source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Infrared Physics & Technology	6. 最初と最後の頁 103274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.infrared.2020.103274	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Yamamoto, S. Kashiwagi, S. Masuda, N. Nakanii, T. Hosokai, M. Kando, T. Muto, K. - Nanbu, F. Hinode and H. Hama	4. 巻 26
2. 論文標題 Light source based on a 100 mm-long monolithic undulator magnet with a very short 4 mm-period length	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Synchrotron Rad.	6. 最初と最後の頁 1902-1910
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577519013031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shigeru Kashiwagi et al.
2. 発表標題 Demonstration of variable polarized coherent terahertz source
3. 学会等名 10th International Workshop on Infrared Microscopy and Spectroscopy with Accelerator Based Sources (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柏木茂 他
2. 発表標題 テラヘルツコヒーレントアンジュレータ放射の偏光制御
3. 学会等名 第16回 日本加速器学会年会 (京都大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柏木茂, 齊藤寛峻, 全炳俊, 入澤明典, 鹿又健, 森田希望, 高橋健, 長澤育郎, 南部健一, 二宮慎吾, 日出富士雄, 三浦禎雄, 武藤俊哉, 山田悠樹, 濱広幸
2. 発表標題 テラヘルツコヒーレントアンジュレータ放射の偏光制御に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柏木茂 他
2. 発表標題 コヒーレントTHzアンジュレータ放射の偏光スイッチング
3. 学会等名 第17回 日本加速器学会年会 (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 アンジュレータ超放射のコヒーレンスを用いた電子ビーム特性測定 of 検討
2. 発表標題 寺田健人, 柏木茂 他
3. 学会等名 第17回 日本加速器学会年会 (オンライン)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂上 和之  (Sakaue Kazuyuki)  (80546333)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・主幹研究員    (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	渡邊 謙  (Watanabe Ken)  (70534816)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器 研究施設・助教     (82118)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関