

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26246046

研究課題名(和文)フェムト秒電子バンチの6D位相空間分布計測可能な単一ショット非破壊モニターの開発

研究課題名(英文)Development of single-shot noninvasive bunch monitor of charge distribution in 6D-phase space

研究代表者

富澤 宏光 (Tomizawa, Hiromitsu)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・XFEL利用研究推進室・主幹研究員

研究者番号：40344395

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,300,000円

研究成果の概要(和文)：3D-E0サンプリング(EOS)計測要素を試験加速器の直線部と分散部にも設置し、電子バンチの6D位相空間分布計測の原理検証を行った。3D-EOSの空間多重化に成功し、6次元位相空間の電子バンチの挙動のリアルタイム計測システムを完成させた。広帯域のE0プローブ光源の矩形スペクトル化と線形チャープ化を同時に実現し、広帯域のラジアル偏光素子の開発にも成功して、フェムト秒バンチの多重化3D-EOS計測に必要な要素技術開発をすべて実用に供するレベルで完成させた。さらに、超高速応答のDAST結晶にアニーリング処理と光学研磨を施し、超高速バンチ計測に適した高品質 E0 素子を製作することにも成功した。

研究成果の概要(英文)：3D-electron bunch charge distribution (BCD) monitor enables non-destructive measurements of the longitudinal and transverse BCD with multiple electro optical (EO) crystals at the same time in a novel manner of multiplexed EO sampling. Combining a set of 3D-BCD monitors in the strait and dispersion sections at the end of the accelerator beam line, the BCDs in 6D phase space is able to be measured bunch-by-bunch and reconstructed 6D-BCD's images in real time. We demonstrated this 6D-BCD monitor at SPring-8 photoinjector test accelerator and verified real-time reconstruction of 6D-BCD by our monitoring system. For achieving the upper limit of temporal resolution, we developed high-temporal-response EO-detector DAST crystals homogeneously qualified with annealing and optical polish. We completed to develop all optical components to generate a broadband (FWHM: 250 nm) radial-polarized EO-probing laser square pulse with a fine linear chirp under controlling by a chirp scanning measurement.

研究分野：加速器科学

キーワード：E0サンプリング 有機E0結晶 全光学式タイミングシステム 3次元バンチ形状モニター シングルショット・フェムト秒バンチ計測 E0サンプリングの空間多重化 E0サンプリングの波長多重化 電荷モーメント

1. 研究開始当初の背景

シード化による第2世代に突入したX線自由電子レーザー (XFEL) は、X線波長領域におけるサイエンス・フロンティアの開拓に必須となる基盤技術であるため、日米欧に続いて世界各国で競うように建設されている。XFELは蓄積リング放射光源とは異なり、物質構造解析に結晶化過程が不要になるので、飛躍的な実験解析速度の向上が期待される。また、極短電子バンチをX線光源とするため、フェムト秒レーザーの援用によるポンプ・プローブ実験による新たなフェムト秒サイエンスへの展開が期待されている。

しかし、この極短パルスX線源を有効利用するには、まだ以下の2点の課題があった。

- (1) その光源である電子バンチ (6次元位相空間での電荷分布) 挙動を非破壊・フェムト秒時間分解能で計測する方法の確立
- (2) 電子バンチにフェムト秒同期したタイミングシステム及び、ジッタートレンドのモニタリング (全光学式タイミング系)

単一のモニタリングシステムで非破壊・実時間計測を実現できれば、上述の(1)と(2)に関して同時に解決する。それが本研究を始める動機となった。

市販のストリークカメラの最高時間分解能 (200 fs (FWHM)) を凌駕する極短バンチビーム計測法に、ビーム・ディフレクターがある。SPring-8サイトに2011年度に完成したSACLAのように比較的低エネルギーのXFEL加速器でも、8 GeVの電子ビームエネルギー領域に設置すると非現実的な長さになるため、1.3 GeVで実施されている。それでも全長10 mと長大になってしまう。一方、これらとは異なり非破壊で計測可能な方法に、EOサンプリング (EOS) がある。この方法では、現状の時間分解能は110 fs (FWHM)に制限されているが、長さが10 cm程度とコンパクトになる。さらにEOSは電子ビームのエネルギー領域が高くなればなるほど、時間分解能が上がるため、上記のコンパクト性と合わせて複数台をビームトランスポート上に設置することが可能となる。我々はここに着目し、加速器の直線部のみならず、水平・垂直の分散部に設置することで世界初の6次元位相空間のバンチ内電管分布の挙動をリアルタイムに観察可能な究極のモニターを実現できることを着想した。

また、EOSからの光信号を、フェムト秒タイミング信号や次世代のシード型FELのシード光源として利用する方法は、3次元バンチ形状計測法とともに本研究代表者が発明して特許を取得しており、実証試験にも成功している。本システムは(1)と(2)を同時に非破壊で実現する唯一の方法と考えられている。本研究代表者と分担者は超高速応答結晶を含む必要な要素技術を既に有しており、本研究の進展によって世界最高速のフェムト

秒バンチ長計測とタイミング同期を実現することが各方面から期待されている。以上のことから、この究極のビームモニターは、今後ますます先端加速器に求められる、極短バンチ性と高同期精度の期待に応えていくために必須の要素技術になると考えている。

2. 研究の目的

3D (バンチ内電荷分布) EOS計測要素の各要素技術を検証可能な形で実現し、SPring-8研究サイト内の先端加速器でその性能を確認する。具体的には、3D-EOS計測要素をフェムト秒バンチ試験加速器の直線部と分散部にも設置し、電子バンチ内の6D位相空間における電荷分布計測システムの原理検証を行なう。次に、電子バンチにフェムト秒同期した光タイミングシステムを実現し、シードFELのユーザ利用に供せるジッタートレンドをリアルタイムで実現する。

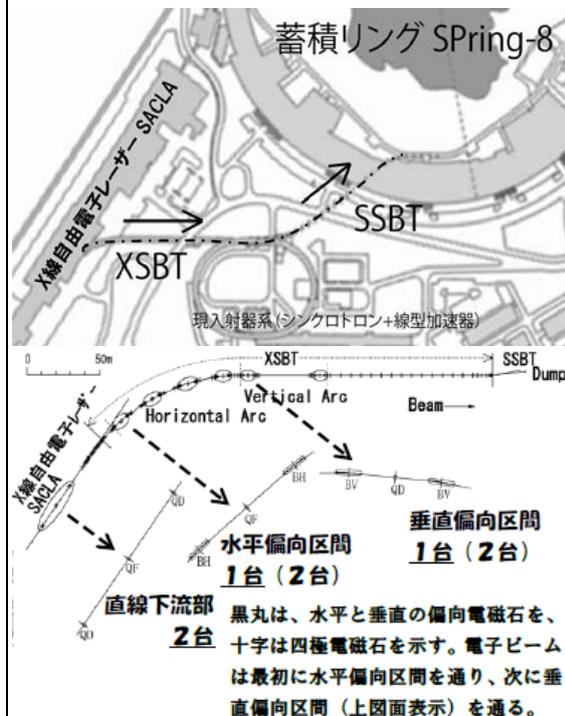


図1:フェムト秒時間分解能・SACLA + XSBT系での6次元バンチ内電荷密度分布の計測群 (トリプレット6台) の配置予定図

本研究は、SACLAからXSBTに亘る非破壊・6次元バンチ挙動モニター群で世界初の電子ビームの動的観測を実施することを究極の目的として開発される。図1に示すように、水平・垂直分散区間に各1台 (最大2台) を設置する。ビーム挙動の実測に基づいた総合的なビーム物理研究を行うことが目的である。次世代放射光源では更なる高輝度・極短パルス (バンチ) 化が求められ、極小の6次元位相空間に電子を可能な限り詰め込むことが必須となる。その要請を十分に満たす電子バンチ計測法の確立こそ、最初に解決しなければならないことである。

尚、ここで開発される3D-EOS計測要素の各技術は、フェムト秒時間分解能が必要とさ

れる国内外の先端加速器施設において広く利用されることを目的とする。そのため、線形チャープ・超広帯域（白色）レーザプローブ光源は、高繰り返し運転可能でコンパクトなプローブ光源として実用レベルで完成させることを最も重要視して実施される。大型のレーザ光源インフラがない加速器施設でも利用可能な 3D-EOS 計測システムとして完成することが重要で、複数個の本システムを組み合わせることで、究極的には 6 次元位相空間内でのバンチ内電化分布の挙動をリアルタイム計測することが、本研究の最終目的である。

3. 研究の方法

フェムト秒時間分解の 3D-BCD(Bunch Charge Distribution)計測要素には、波長多重化方式（図 2）と空間多重化方式（図 3）の 2 つの方式がある（両方式とも本研究代表者の発明：特許第 5165278 号）。波長多重化方式は既に基盤研究(B) 23360045 で原理実証を終えているが、複雑な要素技術のために量産型に向かない。そのため、本研究では分光撮像のマルチチャンネル化による量産型 3D-BCD 計測要素を、図 2 に示す空間多重化

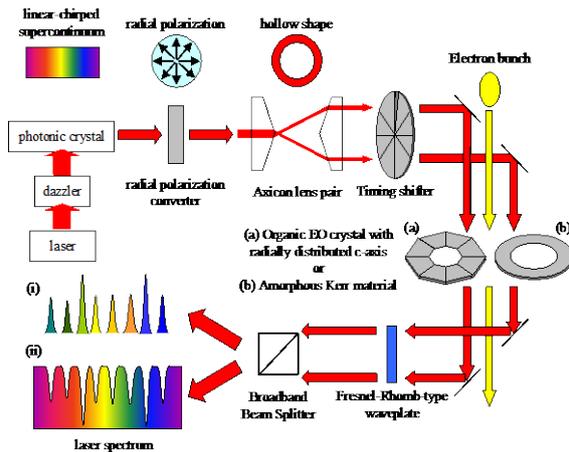


図 2：フェムト秒時間分解能・3D-BCD 計測要素の Single-shot 計測システム（波長多重化）

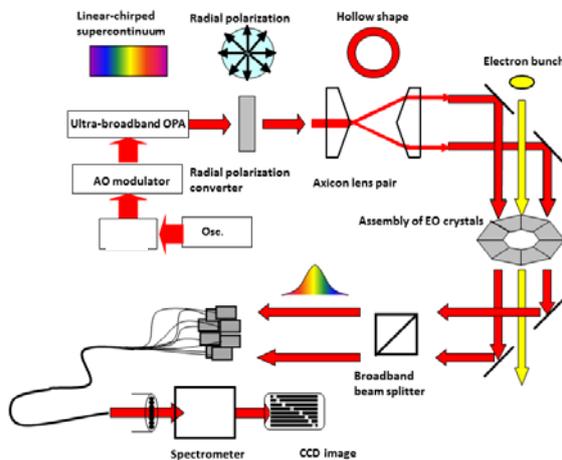


図 3：フェムト秒時間分解能・3D-BCD 計測要素の Single-shot 計測システム（空間多重化）

方式で新規開発する。それに必要な以下に示す 3 つの要素技術を重点的に開発する。

加速器要素技術である以上、その再現性（制御性）や放射線下でのロバスト性に優れたものとする実用レベルで完成させる。

(1) 線形チャープ・広帯域レーザ光源：

世界最高時間分解能の 30 fs (FWHM)でスペクトル復調するには、この時間分解能を損なわずに情報を搬送可能な EO プローブ光源が必須である（伝送系の帯域とのマッチングも同様）。空間多重化方式では、波長多重化方式の約半分の帯域で十分である。そのため、200 nm を超える矩形スペクトル帯域のコンパクト光源として開発する。この超広帯域プローブ光源は線形チャープである必要があるため、音響光学変調器 (DAZZLER)で光源自身に変調を掛けながらチャープ・スキャンで同時計測して高次の分散補償を確定的に実現する。

(2) 超高速応答 EO 結晶開発：

世界最高速の 30 fs の時間応答性を実現する EO 素子を開発する（特許第 1716929 号）。研究分担者の南出が成長させた DAST (4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate) 有機結晶を加速器ビーム伝送ラインの超高真空中に複数個、電子ビームを取り囲むように設置する。本研究では、結晶成長後にアニール処理して光学研磨を施す工程の確立をする。これにより、ロバストな EO 素子を実現する。同時に、複数個の EO 素子を組み合わせるため、結晶素子の均質性（個体差のない）は重要である。そのため、量産性も視野に入れた結晶処理工程の研究開発も行う。

(3) 広帯域光学素子開発：

超広帯域 EO プローブレザ光を用いるには、それに帯域を合わせた伝送光学素子から検出機器に至るまでの新規開発が必須である。伝送光学系は全体として補償し、700-900 nm の広波長帯域での吸収と分散の波長依存性を平坦化する。ラジアル偏光・円環ビーム生成に必要な光学素子も超広帯域に対応できる吸収・分散特性に優れたものを開発しなければならない。

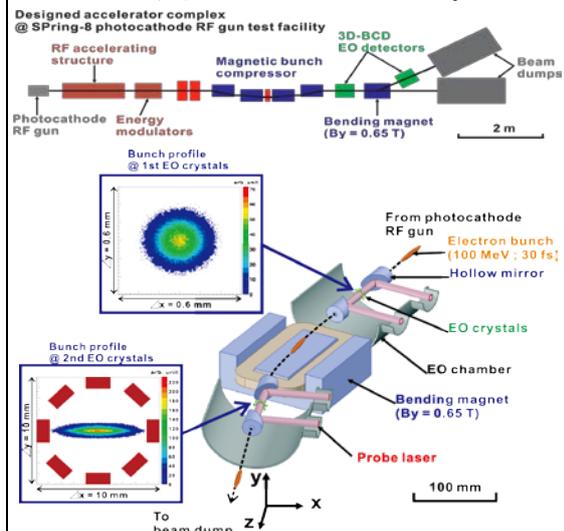


図 4：6 次元位相空間バンチ内電荷分布計測の検証器の構成と、分散部での 3D-EOS 配置

ここで開発した各要素技術を組み合わせて、図4に示すフェムト秒バンチ試験施設(10 Hz 運転・サブピコ秒電子ビーム源)で検証する。3D-EOS 計測要素は、試験加速器の直線部だけでなくエネルギー分散部にも設置(図4参照)し、6次元位相空間におけるバンチ電荷分布計測の原理実証を行う。また、有機EO結晶等を用いて世界最速の時間分解能を達成することを目指したEO結晶素子の試験も行う。EO結晶素子性能試験用のEOSチャンバーを試験加速器に常設し、超高速応答性の比較試験を実施する。

4. 研究成果

各研究成果を実験項目ごとに整理し以下に記す。それぞれの実験項目にそれぞれ目的があるため、その意味が分かるように必要に応じて概説する。各実験セットアップの説明と実験結果に対する考察も行うことにする。

(1) 6次元位相空間バンチ計測の原理実証:

世界初の多重化EOSの原理実証に成功した。これを用いた6次元位相空間バンチ計測の原理実証試験システムについて説明する。

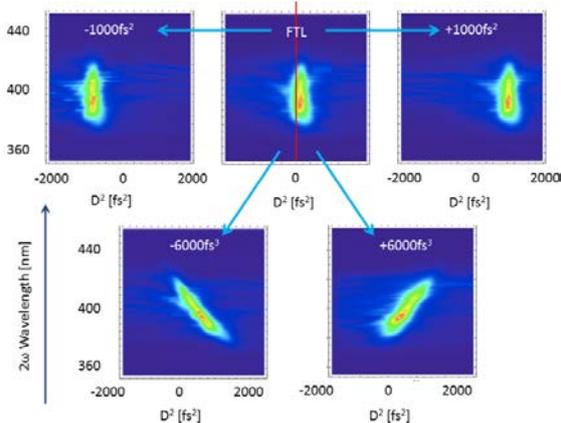


図5: DAZZLERを用いたチャープ・スキャン法による高次分散補償の制御(線形チャープ化)

DAZZLERを用いたチャープ・スキャン法により線形チャープに精密に分散補償した超広帯域レーザーパルスを直線偏光にし、EOプローブ光源として用いる(図5参照)。超広帯域レーザーパルスは、Ti:SaレーザーをYAG結晶で広帯域化して生成する。DAZZLERで変調させて矩形スペクトルにする(図6参照)。

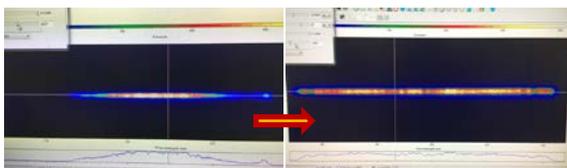


図6: 超広帯域レーザーの広帯域化とスペクトル郷土分(矩形)の平坦化

波長板($\lambda/2$, $\lambda/4$)は、各EO素子通過後に控える検光子(ポラライザー)とセットで調整し、電子ビームがない時に分光器で検出される光量が最小になるように設定する(クロスニコル配置)。空間多重化EOS(3次元バンチ計測)の場合、複数のEO素子が電子

バンチの横方向にラジアル状に配置されるため、実際のプローブ光は、ラジアル偏光板とアキシコン金コーティングミラー対で円環状のラジアル偏光ビームに変換して入射される。本研究において、世界初の超広帯域ラジアル偏光素子(図7参照)の開発に成功し、250 nm帯域(675~925 nm)に亘ってラジアル偏光化を MgF_2 と水晶板の張り合わせで実現した。

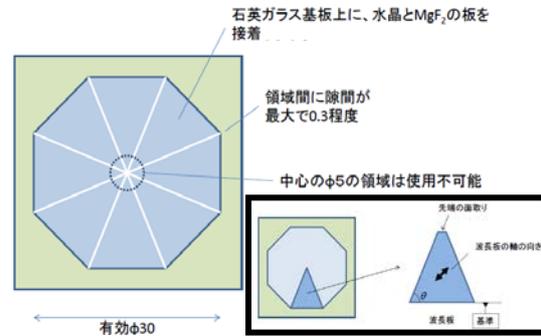


図7: 超広帯域ラジアル偏光素子(250 nm帯域)に亘ってラジアル偏光化: 675~925 nm)

原理実証試験では、図8に示すようにEOSチャンバーをフェムト秒バンチ試験加速器に3つの目的別に設置して空間多重化EOSとフェムト秒時間分解能の実証試験を行った。

- (1) 3次元電荷分布計測: シケイン前のピコ秒電子バンチで試験
- (2) 超高速EO結晶応答性試験: 極短バンチでEO結晶の応答性試験
- (3) エネルギーチャープモニター: 分散部で広がり計測試験

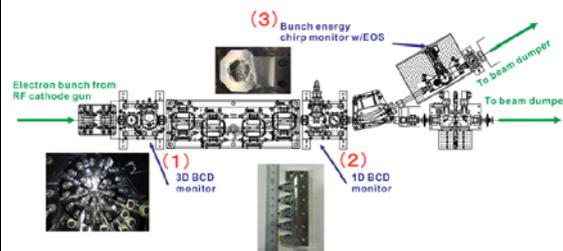


図8: 6次元位相空間バンチ内電荷分布計測の原理検証試験装置と、EO結晶性能試験装置の

同時に、8分岐3台(トリプレット)=24分岐ファイババンドルを1台の分枝撮像カメラで画像収集と60Hzのリアルタイム再構築が可能なシステムと超高速バンチ計測結果をリアルタイムに表示しながら評価する自動制御システムも完成した。これによる3D/6D電子バンチ再構築の原理実証結果を図9に示す。

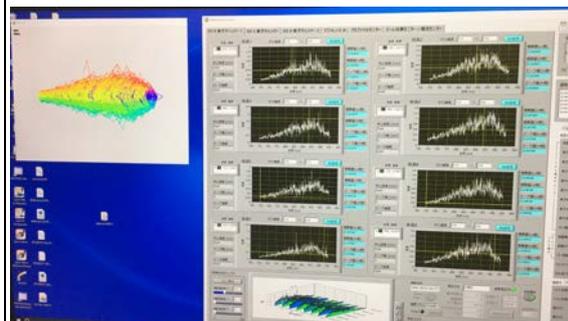


図9: 3D/6D電子バンチ再構築の検証結果 超高速バンチ計測結果をリアルタイムに表示しながら、加速器およびレーザー関係のタイミ

ング同期システムを平成 28 年度に更新したが、タイミングジッターが 1 p s (p-p) を下回ることが困難なことが判明した。

そこでシステム検証のために、本研究で開発したサニャックロープを用いた加速器 RF とレーザー発振器との同期システムは、SACLA の大強度同期レーザー施設に導入し、XFEL とレーザーパルスの同期精度を GaAs 過飽和吸収体による Arrival Timing モニターで計測した (図 10 参照)。環境温度でドリフトしているが、ジッターは < 30 fs (rms) を実現している。

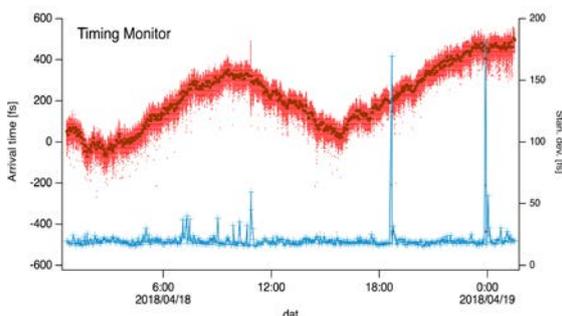


図 10 : レーザパルスと SACLA XFEL パルスの Arrival timing のジッターおよびドリフトトレンドグラフ (ジッター < 30 fs (rms))

この計測システムではフル幅でのジッターが線形チャープ・レーザー矩形パルスよりも小さく抑えなければならない。EOS プローブ光源の試験機を用いて計測実験を開始したが、自動制御システムの開発によりタイミング合わせには成功したものの、ジッターが想定したよりも大きく、計測精度が上がらなかった。この原因調査を行った結果、ハイパワーレーザー発振器では目標同期精度の達成が困難であることが判明した。本発振器は、そのパルスエネルギーを 2 桁上げるために、共振器長を 30m にしたもので、その安定化のためにブレッドボードの精密温調を開発した。そのジッターを従来の 1/3 に抑制することには成功したが、数十 fs の時間分解能を目指すには技術的な制約が大きかった。そのため、新たなレーザー設計と全光学式タイミングシステムの開発を行い、目標とする時間分解能を実現するための改善点を反映した。

(2) 超高速 EOS 開発 :

世界最高速の 30 fs の時間応答性を実現する EO 素子を開発するため、有機 DAST 結晶の試験と超広帯域 EO プローブレーザー光の開発を行なった。EUV-FEL 試験加速器にて有機 DAST 結晶を用いて世界初の EO 信号捕捉に成功している。アニーリングと結晶研磨・整形の技術は確立し、均質な結晶を量産することが可能なレベルに達した。

超広帯域の EO プローブ光源の開発は、空間多重化方式を開発したことにより、当初の目標帯域幅に達しなくても 30 fs (FWHM) の時間分解能が実現できるようになった。現状では、先述のレーザー発振器の同期精度の問題で実現していないが、必要な要素技術は全て本研究により完成しているため、世界初の全光学式タイミングシステムが完成すれば確

実に実証可能になると思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① 富澤宏光 (20 人中 1 番目), 小川奏 (3 番目), 富樫格 (10 番目), 松原伸一 (11 番目), 岡安雄一 (12 番目), 大和田成起 (18 番目), et al., Stabilization of a high-order harmonic generation seeded extreme ultraviolet free electron laser by time-synchronization control with electro-optic sampling, High Power Laser Science and Engineering, 査読有, Vol.3, 2015, pp. 1-10.
DOI : 10.1017/hpl.2015.9
- ② 平義隆, (6 人中 1 番目), 黒田隆之助 (2 番目), 富澤宏光 (6 番目), et al., Observation of radially polarized terahertz radiation generated by a sub-picosecond electron beam, Vibrational Spectroscopy, 査読有, Vol.75, 2014, pp. 162-168.
DOI : 10.1016/j.vibspec.2014.07.015

[学会発表] (計 17 件)

- ① 富澤宏光, High-precision synchronization of optical lasers to RF, 5-way XFEL workshop: photon session (招待講演), 神鍋高原, 13-15 Dec. 2017.
- ② 谷内努, SPring-8 極短バンチモニタ開発テストベンチのコミッションング及び 2.7 セル RF, 第 12 回加速器学会年会, 敦賀市福祉総合センターあいあいプラザ, 5-7 Aug. 2015.

[図書] (計 1 件)

- ① 著者名: 富澤宏光 (9 章執筆担当)、神谷幸秀 (編集代表)、他
出版社名: 丸善出版
書名: 加速器ハンドブック
発行年: 2018 年
総ページ数: 596

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

- ① 名称: テラヘルツ波生成装置、光パラメトリック増幅器、テラヘルツ波検出器、および非線形光学素子
発明者: 縄田耕二、時実悠、南出泰重
権利者: 国立研究開発法人理化学研究所
種類: 特許
番号: 特願 2016-192374 号
取得年月日: 平成 28 年 9 月 30 日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 2 件)

- ① 名称: 偏光ビーム変換素子、偏光ビーム変換方法、電子銃、ビーム測定装置、及び電子発生方法
発明者: 小林実、富澤宏光
権利者: ナノフォトン株式会社、国立研

究開発法人理化学研究所
種類：特許
番号：特許第 5750602 号
取得年月日：平成 27 年 5 月 29 日
国内外の別：国内

- ② 名称：各段がモジュール化された多段増幅式レーザーシステムの自動最適化システム
発明者：富澤宏光、児島孝則
権利者：協和ファインテック株式会社
種類：特許
番号：特許第 5545830 号
取得年月日：平成 26 年 5 月 23 日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富澤 宏光 (TOMIZAWA, Hiromitsu)
(公財) 高輝度光科学研究センター・XFEL 利用研究推進室・先端光源利用研究グループ・主幹研究員
研究者番号：40344395

(2) 研究分担者

出羽 英紀 (DEWA, Hideki)
(公財) 高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・軌道解析モニターグループ・主幹研究員
研究者番号：20360836

(平成 27 年より連携研究者)

富樫 格 (TOGASHI, Tadashi)
(公財) 高輝度光科学研究センター・XFEL 利用研究推進室・先端光源利用研究グループ・主幹研究員
研究者番号：60415239

(平成 27 年より連携研究者)

松原 伸一 (MATSUBARA, Shinichi)
(公財) 高輝度光科学研究センター・XFEL 利用研究推進室・先端光源利用研究グループ・研究員
研究者番号：90532135

(平成 27 年より連携研究者)

岡安 雄一 (OKAYASU, Yuichi)
(公財) 高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・基盤技術グループ・研究員
研究者番号：90509910

南出 泰亜 (MINAMIDE, Hiroaki)
国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・テラヘルツ光源研究チーム・チームリーダー
研究者番号：10322687

谷内 努 (TANIUCHI, Tsutomu)
(公財) 高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・加速器機器グループ・主幹研究員
研究者番号：60360822

黒田 隆之助 (KURODA, RYUNOSUKE)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・端オペランド計測技術オープンイノベーションラボラトリ・ラボチーム長
研究者番号：70350428

大和田 成起 (OWADA, SHIGEKI)

(公財) 高輝度光科学研究センター・XFEL 利用研究推進室・先端光源利用研究グループ・研究員

研究者番号：90725962

(平成 27 年より連携研究者)

小川 奏 (OGAWA, KANADE)
国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・特別研究員

研究者番号：80634352

(平成 27 年に転出)

増田 剛正 (MASUDA, TAKEMASA)
(公財) 高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・制御グループ・主幹研究員

研究者番号：70463312

(平成 27 年より連携研究者)

伊達 伸 (DATE, SHIN)
(公財) 高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・特別嘱託研究員

研究者番号：10372145

(平成 27 年より連携研究者)

(3) 連携研究者

鈴木 伸介 (SUZUKI, Shinsuke)
(公財) 高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・加速器機器グループ・主幹研究員

研究者番号：00416380

柳田 謙一 (YANAGIDA, Kenichi)
(公財) 高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・加速器機器グループ・主幹研究員

研究者番号：10529564

野竹 孝志 (NOTAKE, TAKASHI)
国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・テラヘルツ光源研究チーム・特別研究員

研究者番号：70413995

平 義隆 (TAIRA, YOSHITAKA)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・研究員

研究者番号：60635803

松川 健 (MATSUKAWA, TAKESHI)
国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・テラヘルツ光源研究チーム・特別研究員

研究者番号：60580876

(平成 27 年に転出)

下崎 義人 (Shimosaki, Yoshito)
(公財) 高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・軌道解析モニターグループ・研究員

研究者番号：70463312

深見 健司 (FUKAMI, KENJI)
(公財) 高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・加速器機器グループ・主幹研究員

研究者番号：60463311

清道 明男 (KIYOMICHI, AKIO)
(公財) 高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・制御グループ・研究員

研究者番号：60373297

(4) 研究協力者

小林 実 (KOBAYASHI, MINORU)