

令和元年6月3日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03595

研究課題名(和文)放射線生物学研究への応用を目指したオンチップ電子加速器の実証

研究課題名(英文) Demonstration of an on-chip electron accelerator aiming at application to the radiobiology research

研究代表者

小山 和義 (Koyama, Kazuyoshi)

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・協力研究員

研究者番号：40357041

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,300,000円

研究成果の概要(和文)：放射線生物学研究や放射線化学研究への応用に資するため、オンチップ誘電体加速システムの設計を可能にすることを目指した。理論的考察とシミュレーションによって、誘電体回折格子を用いた加速構造の最適条件を求めた。バイナリーブレード誘電体回折格子を使った加速構造の研究に加えて、小型の市販品レーザーでも電子加速を可能にするための方法を研究し、波長以下の周期構造の回折格子が高効率反射鏡として使えることを使った微小共振器構造及び導波管構造の開発を行い、微小共振器構造ではレーザーエネルギーを0.76%に減らし、導波管構造ではレーザーから電子へのエネルギー変換効率を10%に出来る事を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザーを使った誘電体加速器は、加速勾配が従来の高周波加速器の10倍の大きさであり、加速器を1/10の大きさにできるだけなく、誘電体の微細構造からなる加速管の大きさは1/2ミクロン以下でありマイクロビーム発生が可能である。このような加速器は、1MeVの低エネルギーでは放射線生物学研究や放射線化学研究への応用が考えられ、高効率化・高繰り返し化を図る事によって素粒子物理への応用も可能になる。バイナリー回折格子の性質を利用して、本研究で得た微小光学共振器及び導波路型加速構造に関する成果は、小型の市販品レーザーでの電子加速に道を拓くものである。

研究成果の概要(英文)：In order to develop an on-chip dielectric accelerator and utilize it for the radiobiology research as well as the radiochemistry, we performed the theoretical study to determine the optimum configuration of the dielectric accelerator based on the binary-blazed dielectric grating (BBDG) theory. Besides the simple BBDG configuration, an optical micro resonator (OMR) and the waveguide (WG) type structure were studied for improving the energy conversion efficiency from the light to the electrons. The simulation showed that the OMR structure enable to reduce the required laser energy to 0.76% of the BBDG configuration. The energy conversion efficiency of the WG configuration is improved to 10%.

研究分野：ビーム物理

キーワード：ビーム物理 フォトニック結晶 加速器

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 生体に対する低線量時の放射線効果や放射線治療の二次的な発ガンのリスク評価のためには、放射線を直接受けていない細胞にも影響が現れる現象(バイスタンダー効果)についての理解が不可欠であり細胞生物学の研究者の関心を集めている。現象の解明には、放射線による細胞内分子の電離や電離後のイオン内の電子、低エネルギーの二次電子の移動といった、フェムト秒からアト秒の領域で起こる素過程の新しい理解が不可欠であると、専門家の間で言われている。

(2) レーザー駆動誘電体粒子加速器(DLA)は光結晶粒子加速器ともいわれる。加速管の直径が光の波長の1/2から1/4と小さく、加速勾配は従来の高周波加速器より一桁高いので、小型の高エネルギーマイクロビーム源として魅力的であるが、レーザー駆動誘電体粒子加速器は加速管が微細であり周波数は100THz~1PHと高いので、電子バンチ(集団)当たりの電荷量はフェムトクーロン以下でしかない。しかし100kHz以上の高繰り返し運転によって平均電流を現在の加速器と同程度にすることは可能であるが、市販のレーザーでも可能にするためにはレーザーから電子へのエネルギー変換効率を飛躍的に高める必要がある。我々とほぼ同時期に、米独ではDLAの研究を始めている。彼らの目的は究極的には高エネルギー物理への応用を目指すものであるが、初段部分は本課題とも共通点が多い。

2. 研究の目的

DLAの放射線生物学研究への応用に資するために、高繰り返し超短バンチを可能にするオンチップ電子加速器の設計基盤の確立とそれを使った放射線生物学応用への道筋を示すことが目的である。そのためのビームの仕様は、エネルギー利得が1MeV、電荷量が0.01fC/pulse以上で長さが1ps以下である。このビームをエネルギーが1mJ以下でパルス幅が1ps~数十psのレーザーで発生可能にすることを目指して、最適な加速構造とレーザー照射条件を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 矩形断面の積を持つバイナリーブレード回折格子(BBG)を基本とする加速構造の電子加速に適した構造設計のための指針を得るに当たり、電界分布と電界モード解析および電子軌道の数値シミュレーションを行った。エネルギー領域は50keVから2MeVである。加速構造は、大きく分けて(a)単純なバイナリーブレード回折格子、(b)ファブリーペロー共振器と回折格子の組み合わせ、(c)導波路構造の場合について解析した。(a)はDLAの日相対論的領域における加速実証実験のため、(b)と(c)は加速に必要なレーザーパルスのエネルギーを大幅に軽減する構造を知る事を目的にしている。

(2) 加速実証実験のために、50kV電子銃、回折格子微調整機構、電子エネルギーおよび角度分布測定器の設計・製作・組み立てとBBGの試作を行った。

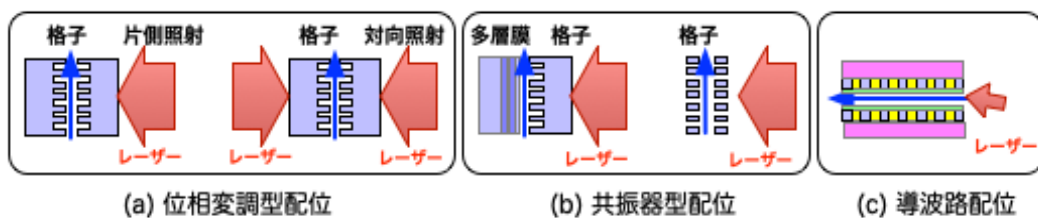


図1 BBGを使った加速構造

4. 研究成果

(1) 加速構造の解析

(a) 位相変調型配位:

DLAの中で最も単純な構成であり、回折格子の積と谷との光路差によって生じる波面の位相差を利用して格子近傍に定在波に似た電界を発生する。定在波の周期(格子周期) Λ とレーザー波長 λ が一致する時に、相対論的電子は格子の近傍で連続的に加速される。非相対論的電子の加速は電子の速度 v に比例して定在波の周期を小さくすることによって、加速の位相整合条件($\Lambda/\lambda=v/c$, c は光速)を満たすことができる。加速勾配を制限する要素の一つが格子を形成する誘電体材料の非線形光学

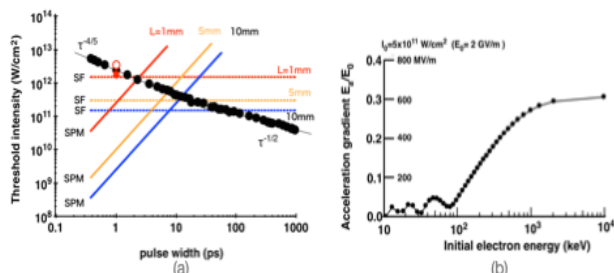


図2 位相変調型配位における (a)レーザー照射強度の制限、(b)格子周期を一定にした場合の各エネルギーの電子に対する加速勾配。材料は石英。

効果とレーザー誘起光学損傷効果である。

図2(a)から基盤の厚さが1mmでレーザーのパルス幅が10psの場合は、 $5 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$ の照射強度が可能であると言える。この照射強度で $\lambda/\lambda=1$ のBBGの非相対論的電子に対する加速勾配は、図2(b)のように急激に減少する。これらの結果を発展させて、電子を50keVから1MeVに加速するための構造を計算によって求め、少なくとも8mmの長さにわたって30psのガウスビーム・レーザー照射する必要がある事を示した。

(b) 共振器型配位：

位相変調型配位ではレーザーパルスは電子とは一瞬しか相互作用しないので、効率が悪い。光を蓄積して、小さなレーザー出力でも大きな加速勾配を得るために、図1(b)に示すように多層膜によるファブリーペロー共振器と格子の回折共鳴条件を応用したファブリーペロー共振器構造を検討した。両者とも本質的には似ているので、より発展性が期待できる格子の回折共鳴条件応用型をシミュレーションによって加速器への応用を検討した。

非相対論的電子加速に適した波長より小さな格子周期を持つ回折格子

では、図3に丸印で示すように、特定の寸法条件を満たす場合に反射率と加速勾配が共鳴的に増大する。鋭い共鳴(黒丸)は共鳴が容易に外れるので応用には適さない。電子加速には緩い共鳴点(白丸)を使うものとする。この配位では、加速には近接場しか使うことができないので、2列の格子の間隔 d は波長の1/4以下にする。例えば、シリコン製の格子の間隔を $d=102\text{nm}$ とすると共振器のエネルギー蓄積時間は40fsであり、パルス幅が180fsのレーザーを 0.2J/cm^2 の強度で照射すると加速勾配は300MV/mになる。この加速勾配を得るために必要なレーザーパワーは、位相変調型配位で発生する場合の0.76%で済むと見積もられる。

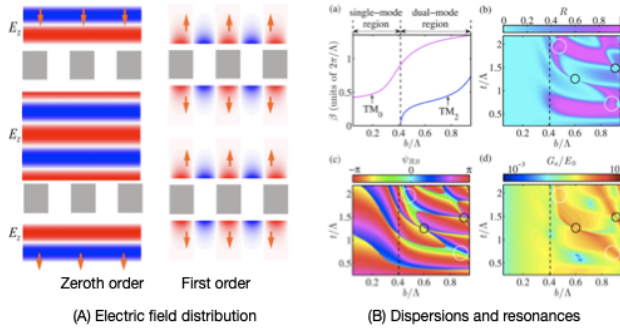


図3 (A)電界強度分布(TM₀モードとTM₂モード)。(Ba)図で $b/\lambda=0.6$ の場合。 b は棧の幅。(B)(a)共振器内モード。(b)回折格子による反射率。(c)回折格子境界での位相ズレ。(d)加速勾配。縦軸は棧の厚さ。(b)(c)(d)の黒丸は鋭い共振点で、白丸は緩い共振点。

(c) 導波路型配位：

共振器型配位よりも一層少ないレーザーパワーで大きな加速勾配を得るために、レーザー光を閉じ込める配位すなわち導波路を採用する。レーザー光はマイクロ波に比べて波長が5桁から6桁小さい上に金属の反射率は数十%以下でしかないので、誘電体で中空導波路の反射面を構成する。レーザー波長以下の格子周期の回折格子は特定条件で高効率の反射鏡となるので、回折格子を中空導波路の壁に応用できる。図4の様に閉じ込められたレーザー光の位相速度の調整のために格子(Si)と加速チャンネルの間に厚さが100nmから500nmの誘電体(SiO₂)製の整合層を置く。幅が 0.7λ の広さの加速チャンネル内でほぼ一様な加速勾配を得ることができて、TM入射の方がTE入射の場合よりも約2倍大きな加速勾配を得ることができる。レーザーから電子へのエネルギー変換効率は最大で約10%が可能である。加速勾配200MeV/mが、2.6kWのレーザーパルスで得ることができる等、数百kHzでの動作が可能小型レーザーでも使用できることが明らかになった。

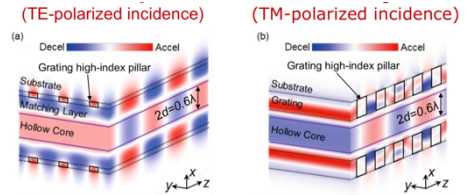


図4 導波路型配位。

4-2. 加速構造の試作および実験装置

- (1) 一番実験が簡単な位相変調型配位で使用するための回折格子を試作した。材質は石英であり、光の波長より細かな構造であるため、電子ビームリソグラフィ法によった。製作には、(独)物材機構・ナノファブ리케이션プラットホームの協力を得た。回折格子の全

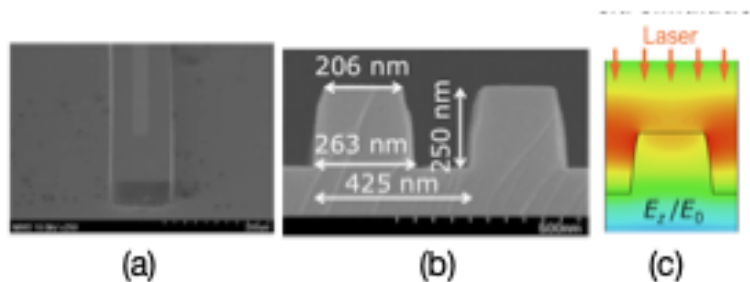


図5 (a)回折格子、(b)格子の断面拡大と(c)格子近傍の電界強度分布(加速方向)。

体と格子の拡大写真を図5に示す。

- (2) 加速実証実験のための装置を設計・製作し組み立てた。装置の模式図を図6に示す。電子は光陰極（金）を持つ50 kV 電子銃で供給する。電子は四重極電磁石で収束後にピンホールを通して回折格子の近傍(100nm)を通す。現有のレーザーではエネルギー利得が1keVと見積もられるので、電子エネルギーおよび角度分布測定器の角度分解能はそれぞれ0.1 keVと2 μ radである。

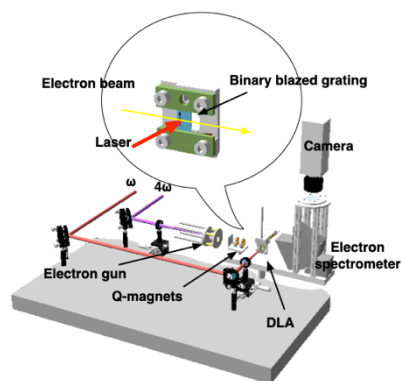


図6 実験装置の模式図

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① Z. CHEN, K. KOYAMA, M. UESAKA, M. YOSHIDA and R. ZHANG; "Grating-based waveguides for dielectric laser acceleration", Appl. Phys. Lett. 113, 124101(2018). [査読有り]
- ② 小山和義, 陳招福, 上坂充, 吉田光宏; "放射線生物学研究応用に向けたオンチップレーザー加速器の研究", 第15回加速器学会年会プロシーディングス pp. 1265-1267, IPP002(2018). [査読無し]
- ③ K. Koyama, Z. Chen, T. Takahashi, M. Uesaka; "MICRO-BEAM IRRADIATION SYSTEM WITH A DIELECTRIC LASER ACCELERATOR FOR RADIOBIOLOGY RESEARCH", Proc. of 9th International Particle accelerator Conference (IPAC18), pp.1664-1666, (2018). [査読無し]
- ④ Zhaofu CHEN, Kazuyoshi KOYAMA, Mitsuru UESAKA, Mitsuhiro YOSHIDA and Rui ZHANG; "Resonant Enhancement of Accelerating Gradient with Silicon Dual-Grating Structure for Dielectric Laser Acceleration of Sub relativistic Electrons", Appl. Phys. Lett., 112, 034102(2018). [査読有り]
- ⑤ 陳昭福, 小山和義, 上坂充, 吉田光宏; "非相対論的エネルギー領域で電子の共振器型レーザー駆動誘電体加速", 第14回加速器学会年会プロシーディングス pp. 677-679, TUP115(2017). [査読無し]
- ⑥ 小山和義, Zhaofu Chen, 上坂充, 吉田光宏共振器型レーザー駆動誘電体加速器の研究; "共振器型レーザー駆動誘電体加速器の研究", 第14回加速器学会年会プロシーディングス pp. 1310-1312, IPP006(2017). [査読無し]
- ⑦ Kazuyoshi Koyama, Zhaofu Chen, Mitsuru Uesaka, Mitsuhiro Yoshida; "Development of a Laser Driven Dielectric Accelerator for Radiobiology Research", Proc. of 8th International Particle accelerator Conference (IPAC17), pp. 3272-3275, (2017). [査読無し]
- ⑧ Z. CHEN, K. KOYAMA, M. YOSHIDA and M. UESAKA; "Optimized Silicon Asymmetric Dual-Pillar Grating for Dielectric Laser Acceleration of Subrelativistic Electrons with Enhanced Accelerating Gradient", Rev. Laser Eng. Vol.45, 97-101(2017). [査読有り]
- ⑨ Mitsuru Uesaka and Kazuyoshi Koyama; "Advanced Accelerators for Medical Applications", Rev. Accel. Sci. and Tech., Vol.9, 235-260 (2016). [査読有り]
- ⑩ Kazuyoshi Koyama, Zhaofu Chen, Hayato Okamoto, Mitsuru Uesaka, Mitsuhiro Yoshida; "Laser-driven Dielectric Nano-beam Accelerator for Radiation Biology Researches", Proc. of 28th International Linear Accelerator Conference (LINAC16), 873-875 (2016). [査読無し]
- ⑪ Zhaofu Chen, Kazuyoshi Koyama, Mitsuru Uesaka, Mitsuhiro Yoshida and Hayato Okamoto; "Numerical study of dielectric laser acceleration of nonrelativistic electrons with colonnade structure", ADVANCED ACCELERATOR CONCEPTS, AIP Conf. Proc. Vol.1812, 060005 (2016). [査読無し]
- ⑫ 上坂充, 山下真一, 上田徹, 土橋克広, 三津谷有貴, 橋本英子, 小山和義, 矢野亮太, 大槻祥平, 四宮権一, 岡元勇人, 草野譲一, 田辺英二, 吉田光宏, 夏井拓也; "東大ライナック・レーザー施設報2016", 第13回加速器学会年会プロシーディングス pp. 1364-1367(2016). [査読無し]
- ⑬ Zhaofu Chen, Kazuyoshi Koyama, Mitsuru Uesaka, Mitsuhiro Yoshida, Hayato Okamoto; "Numerical study of a laser-driven grating-based dielectric accelerator", 第13回加速器学会年会プロシーディングス pp. 197-199(2016). [査読無し]
- ⑭ 小山和義, Zhaofu Chen, 岡元勇人, 上坂充, 吉田光宏; "非相対論的エネルギー領域での"

レーザー駆動誘電体加速器”, 第 13 回加速器学会年会プロシーディングス pp. 992-994(2016). [査読無し]

- ⑮ H. Okamoto, M. Uesaka, K. Koyama, S. Otsuki, M. Yoshida, T. Shibuya, and D. Satoh; “DIELECTRIC LASER-DRIVEN ACCELERATOR AND ELECTRON BEAM SOURCE”, Proc. of 7th International Particle accelerator Conference (IPAC16), pp.4070-4072, (2016). [査読無し]
- ⑯ Kazuyoshi Koyama, Mitsuru Uesaka, Mitsuhiko Yoshida, Sunao Kurimura, Hayato Okamoto, Shohei Otsuki ; “LASER DRIVEN DIELECTRIC ACCELERATOR IN THE NON-RELATIVISTIC ENERGY REGION ”, Proc. of 7th International Particle accelerator Conference (IPAC16), pp.1585-1587 (2016). [査読無し]
- ⑰ 上坂充, 山下真一, 上田徹, 土橋克広, 橋本英子, 關義親, 小山和義, 田儀和浩, 大槻祥平, 四宮権一, 岡元勇人, 草野譲一, 田辺英二, 吉田光宏, 夏井拓也; “東大ライナック・レーザー施設報告 2015”, 第 12 回加速器学会年会プロシーディングス pp. 318-321(2015). [査読無し]
- ⑱ 四宮権一, 上坂充, 神野智史, 吉田光宏, 小山和義, 夏井拓也; “放射線生物実験用卓上誘電体イオン加速システムの基礎研究”, 第 12 回加速器学会年会プロシーディングス pp. 537-539(2015). [査読無し]
- ⑲ 小山和義, 大槻祥平, 上坂充, 吉田光宏; “レーザー駆動誘電体加速試験に向けた工作精度評価”, 第 12 回加速器学会年会プロシーディングス pp. 265-267(2015). [査読無し]
- ⑳ M. Uesaka, K. Demachi, T. Fujiwara, K. Dobashi, H. Fujisawa, R. B. Chhatkuli, A. Tsuda, S. Tanaka, Y. Matsumura, S. Otsukim J. Kusano, M. Yamamoto, N. Nakamura, E. Tanabe, K. Koyama, M. Yoshida, R. Fujimori, A. Yasui; “Development and application of compact and on-chip electron linear accelerators for dynamic tracking cancer therapy and DNA damage/repair analysis”, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 79 012015 (2015). [査読無し]

[学会発表] (計 36 件)

- ① K. Koyama; “Application of Microbeams of Ionization Radiation”, ACHIP Group meeting (Stanford, CA, USA, 2019/03).
- ② K. Koyama; “Towards the application of dielectric laser accelerators for radiobiology Research”, ACHIP Group meeting (Hamburg, Germany, 2018/09). [招待講演]
- ③ 小山和義; “放射線生物学研究応用に向けたオンチップレーザー加速器の研究”, 第 15 回日本加速器学会年会 (長岡, 新潟県, 2018/08).
- ④ K. Koyama; “MICROBEAM IRRADIATION SYSTEM WITH A DIELECTRIC LASER ACCELERATOR FOR RADIOBIOLOGY RESEARCH ”, IPAC2018, TUPML054(Vancouver, Canada, 2018/05).
- ⑤ 小山和義; “DLA 実験に向けた電子源の開発”, 日本物理学会第 73 回年次大会 (野田, 千葉県, 2018/03).
- ⑥ 小山和義; “レーザー粒子加速への期待と課題”, 弥生研究会(本郷, 東京都, 2018/03).
- ⑦ K. Koyama; “Research on Laser-driven Electron Accelerators in Japan”, AFAD2018 (大田市, 韓国 2018/01).
- ⑧ Z. Chen; “Dielectric laser acceleration with double grating structure”, 第 14 回日本加速器学会年会(札幌, 北海道, 2017/08).
- ⑨ 小山和義; “共振器型レーザー駆動誘電体加速器の研究”, 第 14 回日本加速器学会年会(札幌, 北海道, 2017/08).
- ⑩ 小山和義; “レーザー誘電体加速”, 光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2017(吹田, 大阪府, 2017/05). [招待講演]
- ⑪ K. Koyama; “Development of a Laser Driven Dielectric Accelerator for Radiobiology Research”, IPAC17, WEPVA011(Copenhagen, Denmark, 2017/05).
- ⑫ Z. Chen; “Grating-based Dielectric Laser Accelerator for Sub relativistic Electrons”, HEADS2017 (横浜, 神奈川県, 2017/04/00).
- ⑬ 池田直樹; “卓上誘電体イオン加速システム開発に向けた光伝導スイッチの作成と特性評価”, 日本物理学会第 72 回年次大会 (豊中, 大阪府, 2017/03/).
- ⑭ 小山和義; “レーザー駆動オンチップ電子加速器開発”, 日本物理学会第 72 回年次大会 (豊中, 大阪府, 2017/03/).
- ⑮ 小山和義; “レーザー駆動誘電体加速”, 第 23 回 FEL と High-Power Radiation 研究会・第 14 回高輝度・高周波電子銃研究会(仙台, 宮城県, 2017/02).
- ⑯ K. Koyama; “Recent Activities of Laser-Driven Dielectric Accelerator Research at KEK and University of Tokyo”, AFAD2017 (蘭州市, 中国, 2017/01).
- ⑰ K. Koyama; “Laser-driven Dielectric Nano-beam Accelerator for Radiation Biology Researches”, LINAC2016, THPLR014(East Lansing, MI, USA, 2016/09).
- ⑱ 上坂充; “東大ライナック・レーザー施設報告 2016”, 第 13 回日本加速器学会年会(幕張, 千葉県, 2016/08).

- ⑲ Z. Chen; "Numerical study of a laser-driven grating-based dielectric accelerator", 第13回日本加速器学会年会(2016/08).
- ⑳ 小山和義; "非相対論的エネルギー領域でのレーザー駆動誘電体加速器", 第13回日本加速器学会年会(幕張, 千葉県, 2016/08).
- ㉑ Z. Chen; "Numerical study of dielectric laser acceleration of nonrelativistic electrons with colonnade structure", AAC2016(17th Advanced Accelerator Concepts Workshop) (National Harbor, MD, USA, 2016/08).
- ㉒ H. Okamoto; "ELECTRIC LASER-DRIVEN ACCELERATOR AND ELECTRON BEAM SOURCE", IPAC16, THPOW056 (釜山, 韓国, 2016/05).
- ㉓ K. Koyama; "LASER DRIVEN DIELECTRIC ACCELERATOR IN THE NON-RELATIVISTIC ENERGY REGION", IPAC16, TUPMY017(釜山, 韓国, 2016/05).
- ㉔ H. Okamoto; "Development of Fiber Laser for Dielectric Laser Accelerator", HEADS2016 (横浜, 神奈川県, 2016/05).
- ㉕ 小山和義; "レーザー駆動誘電体加速器開発", 日本物理学会第71回年次大会 22aAP6 (仙台, 宮城県, 2016/03).
- ㉖ 岡元勇人; "誘電体加速のための高出力ファイバーレーザー開発", 日本物理学会第71回年次大会 22aAP5 (仙台, 宮城県, 2016/03).
- ㉗ K. Koyama; "Development of the laser driven dielectric accelerator and its applications", AFAD2016 (宇治, 京都府, 2016/02).
- ㉘ 上坂充; "レーザー誘電体ナノサイズビーム加速システム", 第11回励起ナノプロセス研究会 (淡路島, 兵庫県, 2015/12).
- ㉙ 小山和義; "レーザー駆動誘電体加速器開発とその応用", 第13回高輝度高周波電子銃研究会(2015/12).
- ㉚ 四宮権一; "放射線生物実験用卓上誘電体イオン加速システムの基礎研究", ビーム物理研究会・ビーム物理若手の会 2015 (2015/11).
- ㉛ 小山和義; "誘電体粒子加速器とその応用", ビーム物理研究会・ビーム物理若手の会 2015(2015/11).
- ㉜ 上坂充; "東大ライナック・レーザー施設報告 2015", 第12回日本加速器学会年会 FSP015 (敦賀, 福井県, 2015/08).
- ㉝ 四宮権一; "放射線生物実験用卓上誘電体イオン加速システムの基礎研究", 第12回日本加速器学会年会 WEP043 (敦賀, 福井県, 2015/08).
- ㉞ 小山和義; "レーザー駆動誘電体加速試験に向けた工作精度評価", 第12回日本加速器学会年会 FROM-14(敦賀, 福井県, 2015/08).
- ㉟ H. Okamoto; "Study on Fiber Laser and Electron Beam Source for Table-top Micro Beam Source", HEDS15 (横浜, 神奈川県, 2015/04).
- ㊱ S. Otsuki; "Design and Fabrication of Dielectric Accelerator Driven by Laser with Oblique Incidence", HEDS15 (横浜, 神奈川県, 2015/04).

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：上坂充

ローマ字氏名：UESAKA Mitsuru

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号 (8桁)：30232739

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。