

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247096

研究課題名(和文) 準オクターブレザーとプラズマの相互作用(プラズマブラッググレーティングの応用)

研究課題名(英文) Interaction of quasi octave-spanning laser with plasma (Application of plasma Bragg grating)

研究代表者

宮永 憲明 (Miyanaga, Noriaki)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究中心・教授

研究者番号：80135756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,400,000円

研究成果の概要(和文)：オクターブ近い周波数広がりレーザーとプラズマの相互作用を研究するために、レーザーの技術開発と将来の応用に向けて陽子加速を研究した。

広帯域光パラメトリック増幅(OPA、OPCPA)に関しては、誘導ブリルアン散乱パルス圧縮を利用したサブナノ秒OPCPA、回折格子対とレンズ対の4f構成光学系による周波数領域2段階ピコ秒OPA、パラメトリック蛍光の低減手法を開発した。陽子加速に関しては、ナノチューブでのクーロン反発効果による加速手法を考案し、最大10MeVの加速を観測した。また、球状クーロン爆発による陽子加速では、比較的思い元素を混合させることで単色化が可能であることを水クラスターで実証した。

研究成果の概要(英文)： For the research of interaction of quasi octave-spanning laser with plasma, the laser technologies and the proton acceleration were studied.

Regarding the broadband optical parametric amplification (OPA, OPCPA), the sub-nanosecond OPCPA using pulse compression by stimulated Brillouin scattering, the frequency-domain two-stage OPA using 4f optics consisting of grating pair and lens pair and the reduction techniques of parametric fluorescence were developed.

As for the proton acceleration, we devised the acceleration concept based on Coulomb repulsion in nanotube, and the maximum proton energy of 10 MeV was experimentally observed. For the spherical case of Coulomb explosion, the quasi-monoenergetic acceleration of proton from cluster including heavy ions was theoretically proposed, and demonstrated using water clusters.

研究分野：レーザー科学

キーワード：広帯域レーザー 光パラメトリック増幅 4f光学系 パルスコントラスト イオン加速 クラスター ナノチューブ

1. 研究開始当初の背景

レーザー・プラズマ相互作用において、超短パルスレーザーの位相や分散の精密制御が極めて重要である。そのために、短パルス性と超広帯域、及び高強度を活かした新しい粒子加速手法の開拓などを模索し、液中の誘導ブリルアン散乱で生成するグレーティングを用いて 10ns から 200ps へのパルス圧縮 (効率 80%) を実現した。これに対して、後方誘導ラマン散乱によるプラズマ中での短パルス増幅は、10% 以下の変換効率に止まっており、その原因として前方伝搬励起光のチャージング、ランダウ減衰などが考えられている。この問題を解決するためには、前方伝搬励起光のオクターブ近くのチャージング量とプラズマ密度勾配との整合、及び後方伝搬超短パルスシード光の波長最適化が不可欠であると考えられる。

2. 研究の目的

レーザー航跡場電子加速、薄膜やクラスターターゲットからの高エネルギーイオン加速では、パルス幅が 30~100fs の高強度レーザーが重要な役割を果たしており、さらなる短パルス化に伴って新たな研究の展開が期待される。本研究では、超広帯域性に着目したプラズマ相互作用の研究を目指し、準オクターブレザーを開発する。対向伝搬パルスの電場干渉によって生成される希薄プラズマの密度変調を時間・空間制御し、プラズマ・ブラッグ・グレーティングとして作用させ、フォトリックバンドギャップを最適化すればパルス圧縮器として働き、またプラズマ波位相速度を制御できれば単色イオン加速の可能性がひらける。

3. 研究の方法

(1) 広帯域レーザー技術の開発

増幅手法の開発

広帯域増幅の手法としては、光パラメトリック増幅 (OPA) および光パラメトリックチャープパルス増幅 (OPCPA) を採用した。OPA 及び OPCPA の構成要素である、高強度励起源 (半導体レーザー励起 Nd ガラスチャープパルス増幅器)、広帯域非線形結晶 (部分重水素置換 KDP 結晶)、及び増幅システム (サブナノ秒 2 段 OPCPA、周波数領域 OPA) に関する開発を行った。

パルスコントラストの向上手法の開発

超短パルスレーザーの主パルスピーク時刻前方にはノイズとなる成分が存在し、これによって生成される先行プラズマが主パルスとプラズマの相互作用に影響を与える。ノイズに対する主パルスのコントラストを改善するために、回折格子対とアフォーカルレンズ対で構成される 4f 光学系を利用した手法を開発する。

(2) イオン加速の研究

超短パルス超高強度レーザーとプラズマの相互作用に関する理論研究を進めるとともに、水素等のクラスターやカーボンナノチューブ等のナノ構造ターゲットによる陽子加速性能の向上に関する研究を行う。

4. 研究成果

(1) 広帯域レーザー技術の開発

増幅手法の開発

1) 半導体レーザー励起 CPA レーザー

OPCPA システムをコンパクト化するために、代表者等がこれまでに開発した半導体レーザー励起ジグザグスラブ Nd ガラスを増幅媒体とする CPA システムを改良し、パルス幅 1ps、パルスエネルギー J 級が可能な CPA システムを構築した (図 1)。モード同期発振器出力パルス (50MHz、95fs) をパルス伸長し、Yb:CaF₂ 再生増幅器 (1Hz) で増幅した後に、半導体レーザー励起 Nd:HAP4 ガラススラブをジグザグ伝搬させる構成である。出力チャープパルスを回折格子対で圧縮してパルス幅 1.1ps を得た (図 2)。

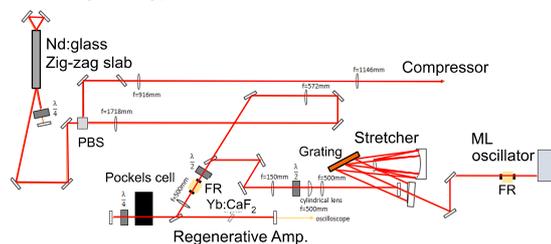


図 1 半導体レーザー励起 Nd:ガラスピコ秒 CPA レーザー。

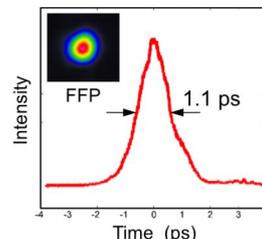


図 2 CPA レーザーの圧縮パルス幅測定。挿入写真は遠視野像。

2) OPA 用 KDP 結晶の重水素化率の最適化

近赤外で 500nm のレーザー増幅帯幅を実現する方法は未だ確立していないので、本研究では OPA に着目した。KDP (KH₂PO₄) 結晶と DKDP (KD₂PO₄) 結晶を比較すると、Nd:ガラスレーザーの 2 倍高調波励起の OPA に関して、位相整合が得られる信号光の波長域は 1050nm を中心にして、前者では長波長側、後者では短波長側に位置する。KDP における赤外吸収は OH 結合に起因し、その結合方向に平行な偏光成分 (常光線) の屈折率は異常光線に比べて重水素化に依存する (図 3 参照)。したがって、重水素化率を適切に制御することによって、極めて広い OPA 増幅帯域が可能となることが予想される。

図 4 はガラスレーザーの 2 倍高調波 (波長

526.5nm)で励起したときのOPAの利得スペクトルであり、用いた屈折率分散のSellmeier式は、重水素化率を0~98%の間で変化させて測定した実測値に基づくLorentz-Lorenz近似を用いている。図4から68%の重水素化率において480nmのOPA増幅帯域幅が得られることが明らかとなった。

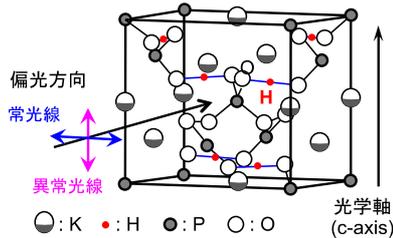


図3 KDPの結晶構造と常光線、異常光線の偏光方向の関係。

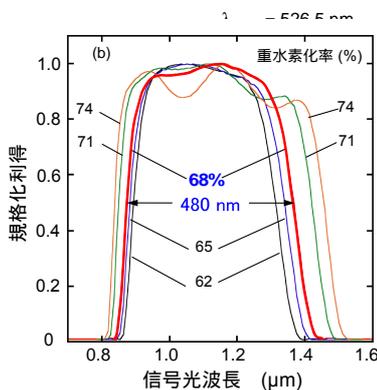


図4 OPA増幅利得スペクトルと重水素化率の関係。

3) サブナノ秒OPCPA

OPCPAにおいてパルス伸長・圧縮器をコンパクト化するために、励起レーザーの短パルス化が望まれる。前述のピコ秒CPAは1つの解決方法であるが、市販のQスイッチNd:YAGレーザーパルスを短縮できれば低コスト化が可能となる。そのため、本研究では、誘導ブリルアン散乱(SBS)を利用して短パルス化を図った。Nd:YAGの2倍高調波(パルス幅4ns)のパルス圧縮の結果を図5に示す。SBS媒質はFC-40である。

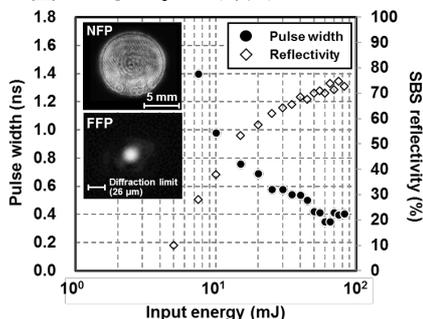


図5 SBS反射率と圧縮パルス幅の入射エネルギー依存性。

このようにして得られた400psのパルスを励起光として、中心波長1065nm、パルス

幅110psのチャープパルスを2段BBO結晶(type I, 非同軸)を用いて増幅した。約1mJまでの増幅ができたが、YAGレーザーのジッター(120ps)の低減が課題である。

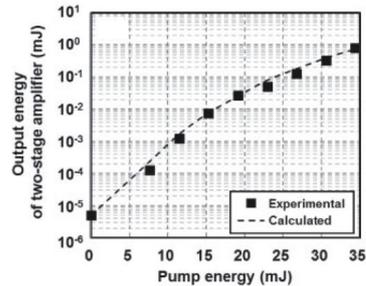


図6 サブナノ秒OPCHAの増幅特性。

4) 周波数領域OPA

図7の上段に示すように、回折格子とレンズによる分光光学系にフェムト秒レーザーパルスが入射する場合を考える。レンズの焦平面(フーリエ面)では一次元周波数配列し、周波数分解能の逆数程度の時間広がりが生じる。そこで、焦平面近傍に非線形光学結晶を配置してOPAを行い、対称配置のレンズと回折格子を用いてフーリエ逆変換すれば、増幅されたフェムト秒パルスが射出される。

この原理に基づいて、図7の下段に示す周波数領域OPA光学系を構築した。入射側回折格子面の像は、2つのアフォーカルレンズ対で射出側回折格子に転送され、各々のフーリエ面にBBO結晶を配置し、2段増幅器とした。励起光は波長532nm、パルス幅180psである。増幅利得70倍が得られ、図8に示すように、入射パルスのスペクトル形状とパルス波形が保存されることを確認した。2段目のアフォーカルレンズ対はビーム拡大機能をもたせてあり、分散フリーとなるようにGrating2の溝周期と入射角度を最適化してある。

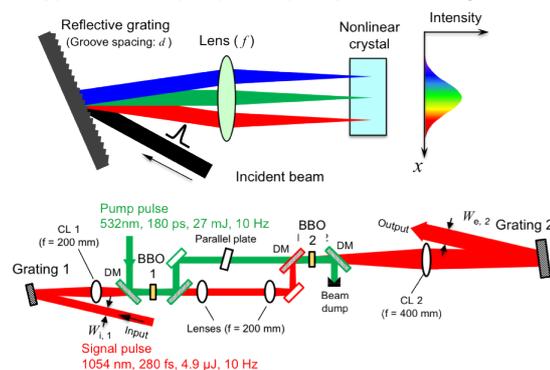


図7 周波数領域2段OPAの光学配置。

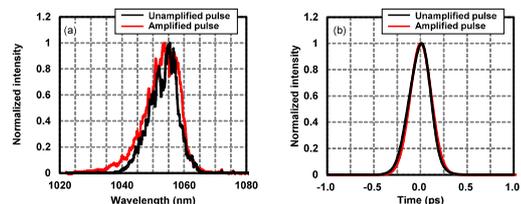


図8 入射パルス(黒線)と増幅パルス(赤線)のスペクトル(左)及びパルス波形(右)。

パルスコントラストの向上手法の開発
 光パラメトリック蛍光増幅 (AOPF) を低減するために、信号光と同一方向の AOPF のエネルギーを異なる波長に移し替える手法を試験した。Type I の BBO 結晶に信号チャープ光 ($1053 \pm 4 \text{ nm}$, $6 \mu\text{J}$) と励起光 (532 nm , 130 mJ) を非同軸で入射し、信号光と同軸にクエンチャー光 (1064 nm) を重畳させた。図 9 のグラフにパルス圧縮後の時間波形 (3 次相関計測) を示す。クエンチャー光エネルギーが $2 \mu\text{J}$ の場合、パルスピークから数 100 ps 前における AOPF を 1/7 に低減することができた。さらなる AOPF 低減のための最適化は今後の課題である。

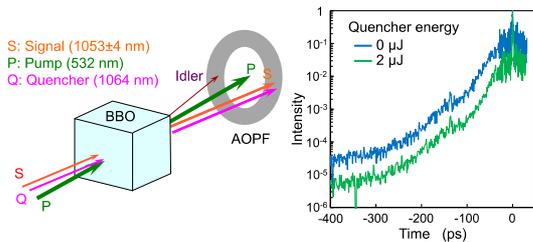


図 9 光パラメトリック蛍光増幅の抑制方法(左)と実験結果.

(2) イオン加速の研究

ナノ構造ターゲットを用いた陽子ビーム生成とその最適化に主眼をおいて研究を進めた。例えば、カーボンナノチューブ内に水素化合物を内挿した構造体に超高強度・超短パルスレーザーを照射することで、高品質のプロトンビームが生成される。このイオン加速方式「ナノチューブ加速器」(図 10) を使い、イオン加速機構の解明とともに将来の応用に資するべく理論・シミュレーション及び実験により研究を進めた。また、ナノチューブ加速器と並行して、構成物質の配合を最適化させた球状ナノクラスターのクーロン爆発による準単色プロトン生成の研究も行った。また、ナノ構造を介したレーザーイオン加速物理を究明すべく理論シミュレーション及び実験研究を行った。

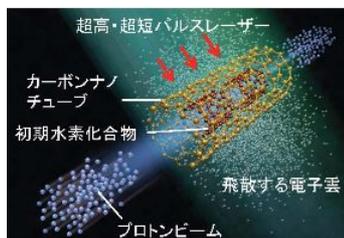


図 10 ナノチューブ加速器.

ナノクラスターを使ったクーロン爆発によるプロトン加速

クーロン爆発によるイオン加速は物理機構が明確であり、単色化も比較的容易であることから、実用化に最も近い手法であ

る。単一イオン種のクーロン爆発では、よく知られているようにプロトンのエネルギースペクトルはブロードとなる。そこで、クラスター中に、二種の異なるイオンを一様に混ぜ合わせることを考えた。これにより、加速の度合いが異なるイオンフラックスがナノスケールの空間に共存し、重いイオン(ここでは炭素)が軽いイオン(陽子)の加速を増大させ、結果として軽いイオンの準単色化が可能であることを理論的に導いた。さらに、その理想的な配合比として水分子に近い値を持っていることを見出した。図 11 は、比較的重い元素のドーパ量を変化させると、陽子のエネルギースペクトルが次第に単色化していく様子を表している。次いで、直径 100 ナノメートル程度の水クラスター噴霧装置を使ってレーザー実験を行なった。その結果、図 12 に示すように 1.5 MeV 付近にシャープなエネルギー分布をもつ陽子を得ることに成功した。これは通常の平板ターゲットでは決して得られないエネルギースペクトルである。

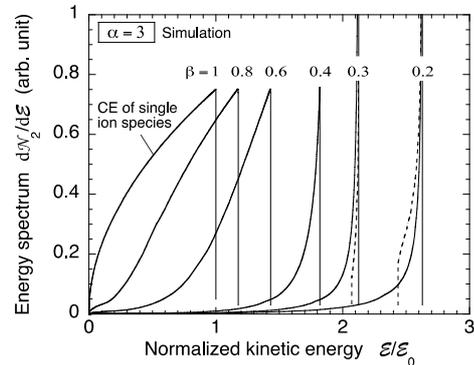


図 11 クーロン爆発の単色化.

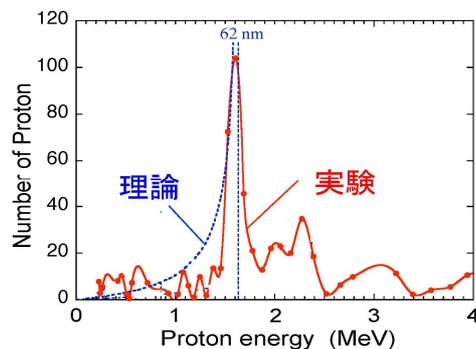


図 12 水を使ったクーロン爆発実験.

ナノチューブを使ったクーロン爆発による陽子加速

図 10 に示したナノチューブ加速器の原理図には単体のナノチューブしか描かれていないが、実際の応用を考えた場合、遥かに多くのナノチューブによる陽子加速が必要となる。ナノチューブ加速器の原理実証実験は、韓国光州科学技術院 (APRI) との共同研究として国際共同実験を行なった。

図 13 は実験で使用されたナノチューブターゲットの走査型電子顕微鏡画像を示す。酸

化チタニウムを素材として、その基板に無数のナノチューブが見て取れる。各々のナノチューブは内径 70nm、外径 100nm 程度であり、軸方向の長さは 2 μ m であった。

図 14 はレーザー、ターゲット、観測(トムソンパラボラ)の異なる配置を示している。B 配置はレーザー照射面と同じ側で陽子を観測しようというもの、C 配置はレーザー照射の裏面から出てくる陽子を観測しようとするものである。

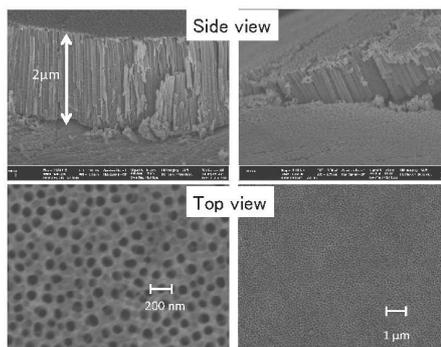


図 13 ナノターゲットの SEM 画像.

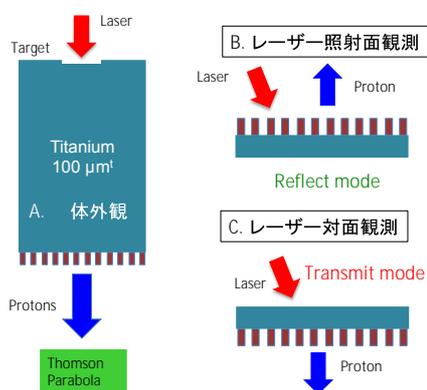


図 14 レーザー照射、陽子観測の配置.

実験の結果、B 配位において、ナノ構造が「ない場合」に比べ「ある場合」は吸収率の増加が観測されたが、陽子の最大エネルギーは高々 4 MeV 程度であった。この吸収率の増加に関しては、欧州の研究グループからの報告もある。物理的な理由として、超高強度レーザーの照射面が実質的に増大するとともに、レーザーの反射損失を抑えるという二重の効果によって吸収率が増大するものと推測される。これに対し C 配位では、ナノ構造がない場合は陽子信号はほとんど得られなかったが、ナノ構造がある場合には最大 10MeV まで広範囲に渡って陽子加速されることが明らかとなった(図 15 参照)。これはナノチューブという特殊構造によって静電場が増強されたためである。現実にはナノチューブ開口端の正電荷によるクーロン反発効果に加えて、真空に飛び出た電子雲による電場加速(TNSA 効果)も協働しているものと推察される。この韓国との共同実験によりナノチューブ加速器の原理実証が達成された。

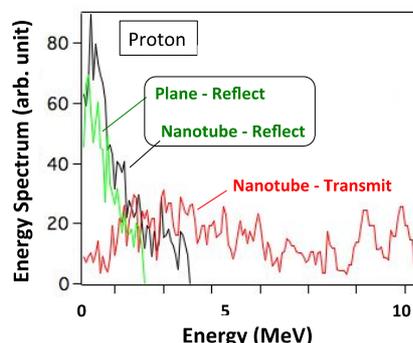


図 15 ナノチューブターゲットで観測された陽子のエネルギースペクトル.

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 24 件)

J. J. Honrubia, A. Morace, M. Murakami, “On Intense Proton Beam Generation and Transport in Hollow Cones”, *Matter and Radiation at Extremes*, Vol.2 (2017) pp. 28-36, 査読有, DOI:10.1016/j.mre.2016.11.001.

A. Andreev, K. Platonov, A. Sharma, and M. Murakami, “Ion acceleration in shell cylinders irradiated by a short intense laser pulse”, *Phys. Plasmas*, Vol.22 (2015) pp.093106(1-10), 査読有, DOI:10.1063/1.4929850.

K. Fujioka, Y. Fujimoto, K. Tsubakimoto, J. Kawanaka, I. Shoji, and N. Miyanaga, “Partially deuterated potassium dihydrogen phosphate optimized for ultra-broadband optical parametric amplification”, *J. Appl. Phys.* Vol.117 (2015) pp.093103(1-7), 査読有, DOI:10.1063/1.4913298.

J. Ogino, S. Miyamoto, T. Matsuyama, K. Sueda, H. Yoshida, K. Tsubakimoto, and N. Miyanaga, “Two-stage optical parametric chirped-pulse amplifier using sub-nanosecond pump pulse generated by stimulated Brillouin scattering compression”, *Appl. Phys. Exp.*, Vol.7, (2014) pp.122702(1-4), 査読有, DOI:10.7567/APEX.7.122702.

J. W. Wang, M. Murakami, S. M. Weng, H. Xu, J. J. Ju, S. X. Luan, and W. Yu, “Generation of quasi-monoenergetic carbon ions accelerated parallel to the plane of a sandwich target”, *Phys. Plasmas*, Vol.21 (2014) pp.123103(1-5), 査読有, DOI:10.1063/1.4903327.

M. Murakami, and M. Tanaka, “Generation of high-quality Mega-electron volt proton beams with intense-laser-driven nanotube accelerator”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.102 (2013) pp.163101(1-5),

査読有, DOI: 10.1063/1.4798594.

〔学会発表〕(計 24 件)

M. Murakami and M.A.Zosa, "Efficient Neutron Generation by Coulomb Explosions of Multi-component Targets", 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2016 年 10 月 31 日~11 月 4 日, サンノゼ, 米国.

M. Murakami, "Proton Beam Generation with Nanotube Accelerator Driven by Ultra-Intense Ultra-Short Laser", International Conference on Laser Ablation - COLA2015, 2015 年 8 月 31 日- 9 月 4 日, ケアンズ, オーストラリア (招待講演).

M. Murakami, "Proton beam generation by nanotube accelerator", International Congress on Plasma Physics (ICPP 2014), 2014 年 9 月 15-19 日, リスボン, ポルトガル (招待講演).

N. Miyanaga, "Power Lasers for Scientific and Industrial Innovations", Global Research and Development Center Symposium 2013, 2013 年 10 月 28-29 日, ソウル, 韓国 (招待講演).

M. Murakami, "High-Quality Mega-Electron Volt Proton Beam Generated by Nanotube", 3rd International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties, 2013 年 9 月 16-21 日, アルシユタ, ウクライナ (招待講演).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/lcc/index.html>

<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/csn/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮永 憲明 (MIYANAGA, Noriaki)
大阪大学・レーザー科学研究所・教授
研究者番号: 80135756

(2) 研究分担者

村上 匡且 (MURAKAMI, Masakatsu)
大阪大学・レーザー科学研究所・教授
研究者番号: 80192772

(3) 連携研究者

細貝 知直 (HOSOKAI, Tomonao)
大阪大学・光科学センター・特任准教授
研究者番号: 80361533

末田 敬一 (SUEDA, Keiichi)
大阪大学・光科学センター・特任准教授
研究者番号: 90448077

川嶋 利幸 (KAWASHIMA, Toshiyuki)

浜松ホトニクス株式会社・中央研究所・産業開発研究センター・副センター長
研究者番号: 30394042

(4) 研究協力者

藤岡 加奈 (FUJIOKA, Kana)
大阪大学・レーザー科学研究所・准教授
研究者番号: 00762395

時田 茂樹 (TOKITA, Shigeki)
大阪大学・レーザー科学研究所・講師
研究者番号: 20456825

李 朝阳 (Li, Zhaoyang)
大阪大学・レーザー科学研究所・特任助教
研究者番号: 70796268

荻野 純平 (OGINO, Jumpei)
大阪大学・大学院工学研究科・博士後期課程学生

宮本 翔 (MIYAMOTO, Sho)
大阪大学・大学院工学研究科・博士前期課程学生

松山 卓弘 (MATSUYAMA, Takahiro)
大阪大学・大学院工学研究科・博士前期課程学生

上須 駿一 (UESU, Toshikazu)
大阪大学・大学院工学研究科・博士前期課程学生

富田 省吾 (TOMITA, Shogo)
大阪大学・大学院工学研究科・博士前期課程学生