

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360026

研究課題名(和文)非線形光導波路を用いた超広帯域テラヘルツ波発生に関する研究

研究課題名(英文)A study on ultra broad band terahertz wave generation using nonlinear optical waveguide

研究代表者

川瀬 晃道 (Kawase, Kodo)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号：00296013

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,200,000円、(間接経費) 3,360,000円

研究成果の概要(和文)：励起光源として、平均パワー230mW、パルス幅60fs、繰り返し周波数48MHz、中心波長1.56μmのファイバーレーザーを用いた。この励起光を厚さ3.8μm、幅5μmのリッジ導波路へ集光し、導波路内を伝搬させ、THz波を発生させた。発生したTHz波強度をSi-Bolometerを用いて測定した結果、従来の光伝導アンテナを推奨励起光強度で使用した場合の出力5.59mVと比べて約1000倍であった。また、この励起光源を用いて、THz-時間領域分光法を構築し周波数スペクトルを取得した従来の光伝導アンテナと比較して、7THzまでの広帯域なTHz波出力を得られた。

研究成果の概要(英文)：We have studied the combination of state of the art techniques with the aim to overcome limitation. For THz emission, generation from a LiNbO3 crystal in a ridge-type waveguide structure (width 5 μm; thickness 3.8 μm; length 10 mm) using 1.56 μm wavelength, 17 fs pump pulses was demonstrated. The THz radiation was coupled out by a spherical Si prism enhancing the THz radiation from the pump beam. To overcome this limitation, a reverse geometry, so that the optical and the THz beam are both incident onto the contact side of the antenna, can be used. Yet, the challenge is to focus the THz wave to the PCA. To solve this problem, we use a metal V groove structure (gap size about 200 μm) to super focus the beam beyond the diffraction limit. This focusing technique has been shown to enhance the intensity of the THz detection in a THz-TDS system based on chaotic oscillation in a laser.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用光学・量子光工学

キーワード：非線形光学 テラヘルツ

1. 研究開始当初の背景

近年のレーザー技術の発展に伴って、実用的なテラヘルツ波光源、検出器が開発され、さらに様々な観測手段が開拓されている。テラヘルツ波を用いた観測技術の中でも、テラヘルツ時間領域分光法はフェムト秒レーザーと共に進歩してきた測定法であり、広帯域テラヘルツパルスを用いた計測法である。テラヘルツパルスを対象物に透過もしくは反射させ、時間波形の波形変化から電場の振幅強度変化と位相変化を計測することが出来る。強度と位相の情報を同時に得ることが出来る為、試料の複素誘電率や屈折率などの光学特性を複雑な処理をすることなく求めることが出来る。テラヘルツ時間領域分光で得られる情報はテラヘルツパルス自体の強度、帯域に依存しているため、より多くの情報を得るためにはさらなる光源の開発が必要となる。

このテラヘルツパルスを用いた応用例としてテラヘルツ断層撮像法(トモグラフィ)がある。これはテラヘルツパルスを照射し、反射されるエコーパルスの実時間波形を測定することで内部に多層構造を持つサンプルの断層画像を得ることが出来る。このテラヘルツトモグラフィは超短パルスの特性とテラヘルツ波の適度な透過性能を利用することで、X線断層撮像法や光干渉断層撮像法などでは測定が難しい各種工業製品の塗装膜や服用薬の錠剤コーティングの膜厚などを測定することが可能である。

2. 研究の目的

テラヘルツトモグラフィを行うにあたって、工業製品塗装膜や皮膚角質層などの多くは多層膜構造を有しており、一層の膜厚は薄いもので10 μm 以下となる。従って、工業、医療、化粧品業界などへの応用展開を目指すうえでは、さらなる奥行分解能の高精度化が求められており、同時に、より測定範囲を深くするためのテラヘルツパルスの高強度化も要求されている。測定可能深度を深くするためにはテラヘルツパルスの高強度化が有効な手段である。一方奥行分解能の高精度化にはテラヘルツパルス時間幅の圧縮が有効な手段である。この圧縮化はテラヘルツパルスの広帯域化のことであり、この広帯域化はテラヘルツ時間領域分光法における広帯域測定の要求とも一致する。次節以降ではテラヘルツパルスの高強度化、短パルス化について報告する。

3. 研究の方法

本節ではリッジ導波路型非線形光学結晶を用いたチェレンコフ方式によるテラヘルツ波発生方法について述べる。テラヘルツ時間領域分光法には高強度、広帯域光源が望ま

しいのは当然であるが、トモグラフィ計測には上記の条件に加えモノパルスのテラヘルツパルス形状が望ましい。多層膜構造の断層撮像を行う際には複数のエコーパルスを処理する必要があるが、マルチスペクトルから発生するエコーパルスは複雑なものになる。従ってモノパルスかつパルス幅の細いテラヘルツパルスがトモグラフィ計測には望ましい。

結晶を用いたテラヘルツ波発生は非線形光学結晶の非線形性を利用して行われるが、その一方で、結晶自身によるテラヘルツ波の吸収や発生したテラヘルツ波の位相不整合が問題となる。非線形光学結晶の中でもLiNbO₃はテラヘルツ波光源として優れており、これまでにテラヘルツ波発生に関して多数の報告がある。

ここではリッジ導波路形状のLiNbO₃からチェレンコフ位相整合方式を用いた広帯域、高出力のテラヘルツ波発生法について述べる。チェレンコフ位相整合方式は、結晶表面から発生するTHz波のうち同位相成分で強めあつて放射される光を特定の方向で検出する方法である。表面発生を用いることで、結晶自体の吸収を抑え、さらにプリズム結合チェレンコフ発生方式は結晶のテラヘルツ帯における分散を無視して、効率的にTHz波を発生できる優れた方法である。図1(a)に理想的な概念図を示す。原理的には結晶自体の吸収を抑えることが可能であるがそれでもなお、結晶自身によるテラヘルツ波の吸収と、有限の厚みを持つ結晶による位相不整合が効率的なテラヘルツ波発生を低減する(図1(b))。そこで厚さ数ミクロンの導波路形状の結晶を光源として用いることで上記問題の改善を図った。結晶が薄くなることでLiNbO₃自体の吸収と位相不整合を大幅に解消する。さらに結晶長さにより結晶全体を有効に使うことができ、効率的な発生が可能になる。

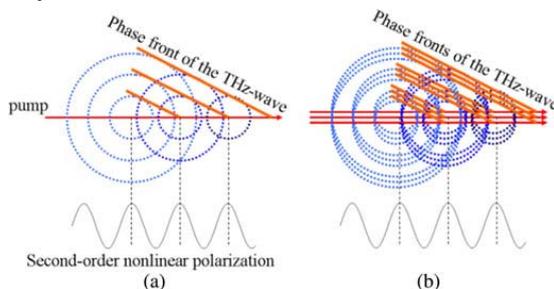


図1 (a)理想的なチェレンコフ位相整合条件、(b)有限のビーム径を考慮した場合の位相不整合。

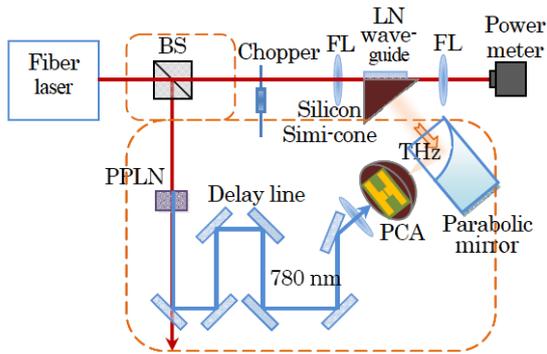


図2 導波路からのテラヘルツ波発生実験の概要

実験系の模式図を図2に示す。励起光には中心波長 1.56 μm のフェムト秒レーザーを用いている。非球面レンズを用いてリッジ導波路(5% MgO 添加 LiNbO_3 結晶、厚み 3.8 μm \times 幅 5 μm \times 長さ 10 mm)にレーザー光を結合している。なお、焦点におけるレーザー光のビーム幅は 8 μm 、導波路を透過した励起光の光強度をパワーメータで測定することにより結合効率も求めている。導波路から発生するテラヘルツ波を効率的に集光するために、特注の半円錐シリコンレンズを導波路に結合している(図3)。導波路とシリコンプリズムの間には励起光のシリコンへの漏れを防ぐために厚さ 3.5 μm の PET フィルムを挿入してある。

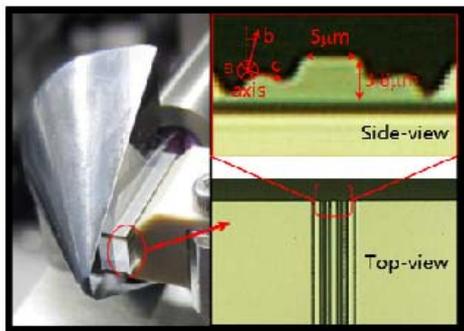


図3 LN 導波路と半円錐シリコンレンズ

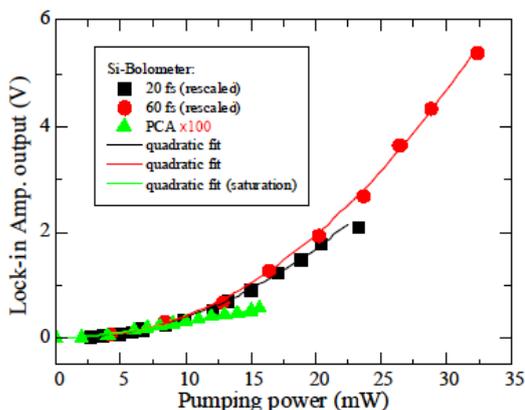


図4 ボロメータ、焦電検出器によるテラヘルツ波出力

4. 研究成果

シリコンボロメータ (Infrared Lab.) と Deuterated triglycine sulfate (DTGS) 検出器を用いてテラヘルツ波の発生強度を測定した。測定結果を図4に示す。なお比較のために光伝導アンテナからのテラヘルツ波強度も測定した。なおPCA発生条件は、低温成長GaAs基板のダイポール型、780nm励起、入射光強度 15mW、バイアス 10Vである。図中の赤線より、発生テラヘルツ光は入射光強度の二乗に比例しており、光整流の理論とも一致する結果が得られている。最も変換効率の高い所で、 6.8×10^{-4} という結果が得られた。本実験の最大入力においても、テラヘルツ光出力に飽和がみられることは無く、このことはより強い励起光を用いることで、さらに強いテラヘルツ光を発生できることを示唆している。

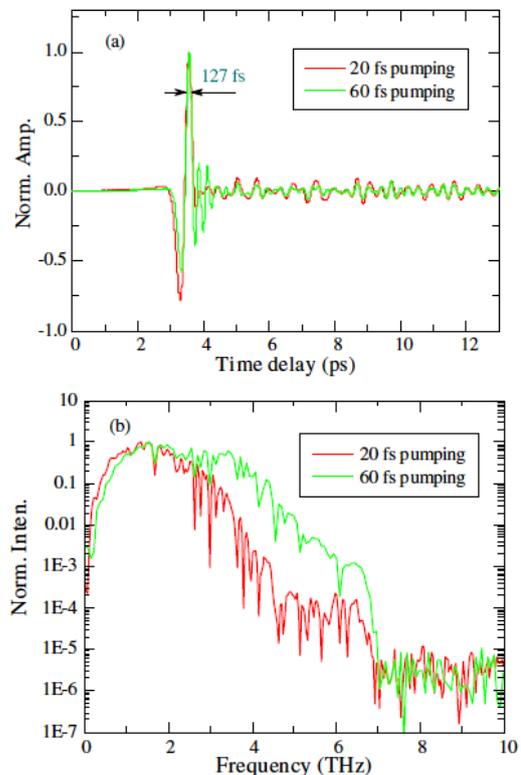


図5 (a)導波路からのテラヘルツパルス時間波形、(b)周波数スペクトル

次にポンプ光をビームスプリッターで分けることにより、時間領域分光の原理で発生したテラヘルツパルスの時間波形を計測した。なお、検出には GaAs 光伝導アンテナを利用、PCAを励起するためにPPLNを用い波長変換を行っている。

得られた時間波形と周波数スペクトルを図5に示す。DASTなどの光学結晶から得られる時間波形はマルチスペクトル形状であるためトモグラフィに用いる際には数学的な処理が必要になり手順が面倒であるが、こ

の導波路から得られた時間波形はモノサイクル形状 (パルス幅 127fs) をしており、トモグラフィに用いるのに適している。一方、周波数領域においては0.1THz から7THz まで、50dB のSNR でギャップのないスペクトルを観測できた。

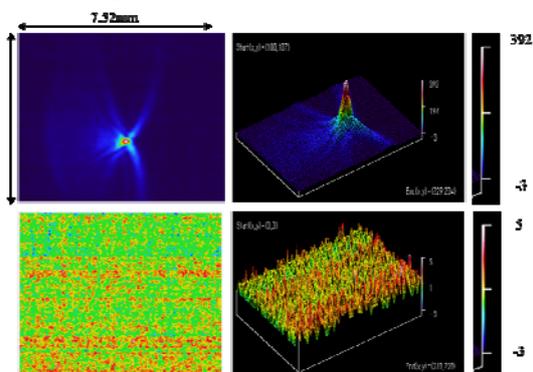


図 6 テラヘルツカメラを用いた発生テラヘルツ波形状の観測(上)導波路からのテラヘルツ波、(下)PCAを用いた場合

導波路から発生したテラヘルツ波の形状を観測するためにテラヘルツカメラ (NTT 社製) を用いて画像を取得した。結果を図 6 に示す。導波路からと PCA から発生したテラヘルツ波を、いずれも放物面鏡を伝搬させたのち集光点にカメラを置いて観測した。導波路から発生したテラヘルツ波ははっきりとした点光源に集光できているのに対し、PCA から発生したテラヘルツ波はテラヘルツカメラで検出することはできなかった。このことは、導波路から発生した THz 光は PCA と比べて十分な強度を持っておりテラヘルツカメラを用いた方法でも見る事が可能であることが確認された

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 12 件)

1. K. Suizu, T. Shibuya, H. Uchida, and K. Kawase, "Prism-coupled Cherenkov phase-matched terahertz wave generation using a DAST crystal," *Optics Express*, vol. 18, no. 4, pp. 3338-3344 (2010).
2. T. Shibuya, K. Suizu, and K. Kawase, "Widely tunable monochromatic Cherenkov phase-matched THz wave generation from bulk lithium niobate," *Appl. Phys. Express*, Vol. 3, No. 8, 082201 (2010)
3. K. Kawase, K. Suizu, S. Hayashi, and T. Shibuya, "Nonlinear optical terahertz wave sources (Invited Review)," *Optics and Spectroscopy*, Vol. 108, No. 6, pp. 890-893 (2010).
4. K. Kawase, K. Suizu and T. Shibuya,

"Time-of-flight terahertz tomography (Invited Review)," *American Laboratory*, Vol.42, No. 8, pp. 9-11 (2010).

5. H. Uchida, T. Sugiyama, K. Suizu, T. Osum and K. Kawase, "Generation of widely tunable terahertz waves by difference-frequency generation using a configurationally locked polyene 2-[3-(4-hydroxystyryl)-5,5-dimethylcyclohex-2-enylidene] malononitrile crystal," *Terahertz Science and Technology*, Vol.4, No.3, 132, (2011).
6. K. Kawase, K. Suizu and T. Shibuya, "Half cycle terahertz pulse generation by prism-coupled Cherenkov phase-matching method," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 32, No. 10, pp. 1168-1177 (2011)
7. H. Uchida, H. Ochiai, K. Suizu, T. Shibuya, K. Kawase "Improving the Laser Induced Damage Tolerance Characteristics of 4 Dimethylamino N-methyl-4-stilbazoliumtosylate Crystals for THz Wave Generation by Annealing," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 51, No.2, pp. 022601-1-4, (2012).
8. K. Takeya, K. Suizu, and K. Kawase, "THz Generation Using Cherenkov Phase Matching" *Terahertz Science and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 78-86 (2012)
9. K. Takeya, K. Suizu, H. Sai, T. Ouchi and K. Kawase, "Wide spectrum terahertz wave generation from nonlinear waveguides," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 1, pp. 8500212, (2013).
10. S. Fan, H. Takeuchi, T. Ouchi, K. Takeya, K. Kawase, "Broadband terahertz wave generation from a MgO:LiNbO₃ ridge waveguide pumped by a 1.5 μm femtosecond fiber laser," *Optics Letters*, vol.38, issue 10, pp. 1654-1656 (2013).
11. H. Uchida, S. R. Tripathi, K. Suizu, T. Shibuya, T. Osumi, K. Kawase, "Widely tunable broadband terahertz radiation generation using a configurationally locked polyene 2-[3-(4-hydroxystyryl)-5,5-dimethylcyclohex-2-enylidene] malononitrile crystal via difference frequency generation," *Applied Physics B*, vol. 111, issue. 3, pp.489-493 (2013).
12. S. R. Tripathi, K. Murate, H. Uchida, K. Takeya, and K. Kawase "A Fiber-Laser Pumped, High-Power Terahertz Wave Source Based on Optical Rectification of Femtosecond Pulses in 4-Dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium Tosylate Crystal", *Applied Physics Express (APEX)*, vol. 6, pp. 072703(3pages) (2013).

[学会発表] (計 31 件)

1. K. Kawase, T. Shibuya, K. Suizu, S.

- Hayashi, "Novel THz-wave generation technique and applications (invited)," 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom 2010), S17P06, Dubrovnik, Croatia (Sept. 20-23, 2010).
2. K. Kawase, "THz wave generation and real-life applications (Invited)," International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS 2011), L-15, Epochal Tsukuba (Mar. 9-10, 2011).
 3. K. Kawase, T. Shibuya, K. Suizu, and S. Hayashi, "Nonlinear optical THz generations and real life applications (Invited)" International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2011 (OTST 2011), WC5, Santa Barbara, California, (Mar. 13-17, 2011).
 4. K. Kawase, S. Hayashi, "Nonlinear optical THz generations and sensing applications (Invited)" The 33rd Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society (BEMS), AFI-2, Dalhousie University, Halifax, Canada (June 12-17, 2011).
 5. K. Kawase, T. Shibuya and K. Suizu, "Wideband terahertz generation using nonlinear optical waveguide (Invited)," OSA Topical Meeting on Nonlinear Optics in 2011, NMC3, Lihue-Kauai, USA (July 17-22, 2011).
 6. K. Kawase "Nonlinear optical waveguide for THz tomography (Invited)," The XXX General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (Ursigass 2011), DAF1.6, Istanbul, Turkey (Aug. 13-20, 2011).
 7. 川瀬晃道, "非線形デバイスを用いた広帯域テラヘルツ発生の進展 (招待講演)," 2011年秋季 第72回 応用物理学会学術講演会, 山形大学(Aug. 29-Sept. 2, 2011).
 8. K. Kawase, "Nonlinear optical THz generation and sensing applications (Plenary)," 4th International Photonics and OptoElectronics Meetings (POEM 2011), Wuhan Science & Technology Convention & Exhibition Center, Wuhan, China (Nov. 2-5, 2011).
 9. K. Kawase, "Tunable THz wave sources and real life application (Plenary)," 3rd Shenzhen International Conference on Advanced Science and Technology (SICAST2011)", Shenzhen University, China, (Nov.21- 25, 2011).
 10. K. Kawase, S. Hayashi, "Nonlinear optical terahertz generation and sensing applications (Invited)," 2nd Workshop of International Terahertz Research Network (GDR-I THz 2011), 29I-08, Osaka University (Nov. 24-29, 2011).
 11. 川瀬晃道, 林伸一郎 "波長変換テラヘルツ光源の開発と応用(招待講演)," 応用物理学会量子エレクトロニクス研究会「非線形光学50年 その基礎と材料・デバイスおよび応用」, pp. 40-41, 上智大学セミナーハウス, 軽井沢 (Dec.9-11, 2011).
 12. K. Kawase, S. Hayashi, "Widely tunable THz sources using nonlinear optical effects (Invited)," 4th Japan-Korea joint Workshop on Terahertz Technology, S4-4, Nagoya University (Dec. 19-20, 2011).
 13. K. Kawase, K. Takeya, S. Hayashi, "Nonlinear optical THz generations and applications (Invited)," The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (IW-FIRT 2012), 8a-2, Fukui University (Mar. 7-9, 2012).
 14. K. Kawase, S. Hayashi, K. Takeya, "Nonlinear optical THz sources and real-life applications (Invited)," The 7th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP), ThA-2, Kyoto, Japan (Apr. 25-27, 2012).
 15. K. Kawase, S. Hayashi, S. Tripathi, "Nonlinear optical THz sources and applications (Invited)," 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2012), #5341, Kaiserstejnsky Palace, Prague, Czech Republic (June 17-20, 2012).
 16. K. Kawase, S. Hayashi, H. Minamide, "Nonlinear optical THz generation and applications (Invited)," 2nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications" (TERA-2012), p. 9, Lomonosov Moscow State University, Russia (June 20-22, 2012).
 17. 川瀬晃道, "テラヘルツ波の発生と応用～最近の進展 (招待講演)," 日本学術振興会・光電相互変換第125委員会/光エレクトロニクス第130委員会/テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会 合同研究会, 明治大学駿河台キャンパス (July 20, 2012).
 18. K. Kawase, S. Hayashi, K. Takeya, "Nonlinear optical THz-wave sources and applications (Invited)," SPIE Optics + Photonics, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications III (Conference OP218), Paper No. 8496-13, San Diego Convention Center, San Diego, USA (Aug. 12-16, 2012).
 19. K. Kawase, S. Hayashi, H. Minamide, "Nonlinear optical terahertz wave generation and applications (Invited), International conference on microwave and THz technologies and wireless communications (IRPhE'2012)), Yerevan, Armenia (Oct. 16-17, 2012).
 20. K. Kawase, S. R. Tripathi, S. Hayashi, "Nonlinear optical THz generation and applications (Invited)," The international conference on fiber optics and photonics (Photonics 2012), T3A-1, Indian Institute of Technology (IIT) Madras, Chennai, India (Dec 9-12, 2012).
 21. K. Kawase, S. Hayashi, K. Takeya,

- “Nonlinear optical THz-wave sources and applications (Invited),” International Conference on Frontiers in Materials Science, Chemistry & Physics, Molecular Materials Meeting (M3), S-MAST-0125, pp. 36, Biopolis, Singapore (Jan. 14-16, 2013).
22. K. Kawase, S. Hayashi, H. Minamide, “Nonlinear optical THz generations and applications (Invited),” Photonics West 2013, Conference on Terahertz and Ultrashort Electromagnetic Pulses for Biomedical Applications, 8585-2, The Moscone Center, San Francisco, USA (Feb. 2-7, 2013).
23. K. Kawase, S. Hayashi, K. Takeya, “Novel high power THz sources and applications (Invited),” The 4th THz-Bio Workshop, O-16, Seoul National University, Seoul, Korea (Feb. 14-15, 2013).
24. 川瀬晃道, 竹家啓, 林伸一郎, “テラヘルツ波の高効率発生と応用可能性 (招待講演),” 第4回京都SMI産学公連携セミナー「テラヘルツ波が開くメゾ空間の計測分析技術」, 京大東京オフィス, 品川 (Feb. 22, 2013).
25. 川瀬晃道, “テラヘルツ波の高効率発生と応用可能性 (招待講演),” 第126回誘電体研究委員会, 東工大大岡山キャンパス (Mar. 21, 2013).
26. K. Kawase, S. Fan, S. Hayashi, “Nonlinear optical THz sources and applications (Invited),” IEEE International Wireless Symposium (IWS 2013), TU4A-1, China National Convention Center, Beijing, China (Apr. 13-18, 2013).
27. 川瀬晃道, “非線形光学効果によるテラヘルツ波の高効率発生と応用可能性 (招待講演),” レーザーEXPO 2013併設 レーザー特別セミナーLE-6(2), パシフィコ横浜アネックスホール (Apr. 24-26, 2013).
28. K. Kawase, S. Fan, S. R. Tripathi, “Efficient nonlinear optical THz sources using LiNbO₃ (Invited),” International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Application (MTSA 2013), T1-3, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai, China (July 22-23, 2013).
29. K. Kawase, S. Fan, S. Hayashi, “Efficient nonlinear optical THz sources using LiNbO₃ (Invited),” 21st International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom), Dubrovnik, Croatia (Oct. 14-16, 2013).
30. K. Kawase, S. Hayashi, H. Minamide, “Nonlinear optical terahertz sources and applications (Invited),” The 6th Nano & Giga Challenges Symposium and Summer School (NGC2014), Arizona State University, USA (March 10-14, 2014).
31. S. R. Tripathi and K. Kawase, “High power terahertz wave sources and their practical

applications (Invited)” International conference on optics and optoelectronics (ICOL 2014), IT-THT-02, IRDE, Dehradun, India (March 5-8, 2014).

〔図書〕 (計 4 件)

1. K. Suizu, T. Shibuya, K. Kawase, “Cherenkov phase matched monochromatic tunable terahertz wave generation,” Book chapter of *Recent Optical and Photonic Technologies*, edited by Ki Young Kim, ISBN 978-953-7619-71-8, pp. 125 - 142, (INTECH, 2010).
2. T. Shibuya and K. Kawase, “THz Tomography,” Book chapter of *Terahertz Spectroscopy and Imaging*, edited by Kai-Erik Peiponen, Axel Zeitler, Makoto Kuwata-Gonokami, Chapter 17, pp 433-449 (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013).
3. T. Shibuya, and K. Kawase, “Terahertz applications in tomographic imaging and material spectroscopy: a review,” Book chapter of *Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications*, edited by Daryoosh Saeedkia, Chapter 17, pp.493-509 (Woodhead Publishing, Cambridge, 2013).
4. 川瀬晃道, “光学技術の事典,” pp. 293-296 (朝倉書店, 2014).

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称 : テラヘルツ波発生装置
 発明者 : 水津光司, 澁谷孝幸, 瀬瀬薫, 筒井俊博, 川瀬晃道
 権利者 : 名古屋大学
 種類 : 日本国特許
 番号 : 特許第 5354582 号
 取得年月日 : 平成 25 年 9 月 6 日登録
 国内外の別 : 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/optlab/kawase/jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川瀬 晃道 (KAWASE KODO)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号 : 00296013

(2) 研究分担者 なし