

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560053

研究課題名(和文) 負誘電率領域のフォノン - プラズモン共鳴を用いたテラヘルツ波発生・検出の研究

研究課題名(英文) Terahertz-wave generation and detection via surface phonons and plasmons in Reststrahlen bands

研究代表者

四方 潤一 (SHIKATA, Jun-ichi)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：50302237

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：従来テラヘルツ発生が困難であったフォノン周波数付近を開拓するため、負誘電率領域に現れる表面波モードを介したテラヘルツ波発生・検出を研究した。テラヘルツ波発生用の非線形光学結晶を数値解析し、表面フォノンモードの分散特性と表面回折格子による電磁波放射特性を明らかにした。この設計に基づき、反応性イオンエッチングを用いて非線形光学結晶の高精度な表面微細加工に成功した。さらに、非線形光学効果(テラヘルツ波と光波の周波数混合)を用いて、超広帯域かつ超高感度のテラヘルツ波検出を常温下で実現した。

研究成果の概要(英文)：Novel terahertz-wave generation and detection via surface phonon modes were studied, in order to explore Reststrahlen bands at terahertz-phonon frequencies. Using numerical analysis, we found novel dispersion relations of surface phonons in a nonlinear optical crystal as well as radiative terahertz field patterns. Based on the analyzed structures, high-quality surface gratings were successfully fabricated on lithium niobate crystals, using reactive ion etching. Ultra-broad, sensitive terahertz-wave detection was also realized under ambient temperature, using nonlinear frequency mixing of terahertz and optical waves.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：テラヘルツ波 表面フォノン 表面プラズモン 表面波発生・検出 コヒーレンス

1. 研究開始当初の背景

光波とミリ波・マイクロ波の間の周波数領域を開拓するテラヘルツ技術の研究において、レーザ・フォトンクス技術を用いたテラヘルツ波光源が注目されており、非線形光学効果を用いるものや量子カスケードレーザ等が開発されている。しかし、テラヘルツ波発生を行う非線形媒質においてはフォノンによる吸収がボトルネックとなっている。

2. 研究の目的

本研究では、バルク固体中で負誘電率となる電磁波減衰領域に現れる表面波モードに着目し、従来発生が困難であったフォノン周波数付近のテラヘルツ波発生を図るとともに、表面プラズモン共鳴による電磁場の増強や光読み出しに関する学理を究明し、将来のテラヘルツ波と光波の相互周波数変換応用に資する普遍的な指導原理を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、本研究グループが広帯域・高出力のテラヘルツ波発生の研究を行ってきたニオブ酸リチウム結晶、有機 DAST 結晶等の非線形光学結晶について、表面フォノンを介したテラヘルツ波発生・検出の研究を行う。まず、表面フォノン共鳴によるテラヘルツ波放射の基礎特性(動作周波数、放射電磁波等)および表面プラズモン共鳴効果を数値解析により明らかにする。これに基づいて外部結合用微細構造(表面回折格子)の高精度な微細加工に取り組むとともに、光波読み出しによる超高感度のテラヘルツ波検出系を実現し、テラヘルツ波と光波の相互周波数変換の光学実験を行う。さらに金属膜を施した際に現れる表面プラズモン共鳴効果についても研究を行う。以上より、負誘電率領域の表面波を介したテラヘルツ波と光波の相互周波数変換の本質を理解する。

4. 研究成果

表面フォノンを用いたテラヘルツ波発生・検出を行うため、その中心部となる非線形光学結晶の動作特性を数値解析により調査した。そこでは、高効率・高出力のテラヘルツ波発生を研究してきたニオブ酸リチウム結晶を選択し、光と相互作用する A_1 対称フォノンモード (A_1 モード) について、本研究で初めて取り組む表面テラヘルツ放射の特性を調査した。4 個の A_1 モード (250, 274, 332, 630 cm^{-1}) の中で、振動子強度 ($S=16.00, 2.55$) の大きい 250 cm^{-1} (7.5THz) および 630 cm^{-1} (18.9THz) モードについて、誘電分散に関する連立非線形方程式 (実波数・複素周波数形式) を解くことにより、表面波モードの現れる負誘電率領域を調べた。

その結果、630 cm^{-1} モードについては、通常の禁制帯内 (横光学・縦光学フォノン周波数間の 630 ~ 758 cm^{-1} = 18.9 ~ 22.7THz 領域) に

表面波モードを見出した。一方、250 cm^{-1} モードについては、表面波モードの下限周波数は横光学フォノン周波数 (250 cm^{-1}) であったが、上限周波数は禁制帯の上限 (273 cm^{-1}) から異常に大きく外れ、超広帯域 (250 ~ 491 cm^{-1} = 7.5 ~ 14.7THz 領域) に表面波モードが現れる新知見を得た (図 1)。

この異常な特性の原因は特異な振動子強度に起因した LST 関係式の破綻にあり、本解析によりこのフォノンモードに内在する特異に強い光との結合特性が表面波モードに与える影響が初めて明らかになった。この知見に基づいて、外部放射結合に用いる表面凹凸構造の最適周期 (最も広帯域な動作周波数を与える周期) は、630 cm^{-1} モードでは約 7.8 μm 、250 cm^{-1} モードでは約 19.3 μm となることを見出した (図 1)。さらに、この表面微細構造を付したデバイス構造からのテラヘルツ波放射特性を詳細に調べるため、近接場から遠方場における FDTD (時間領域差分)

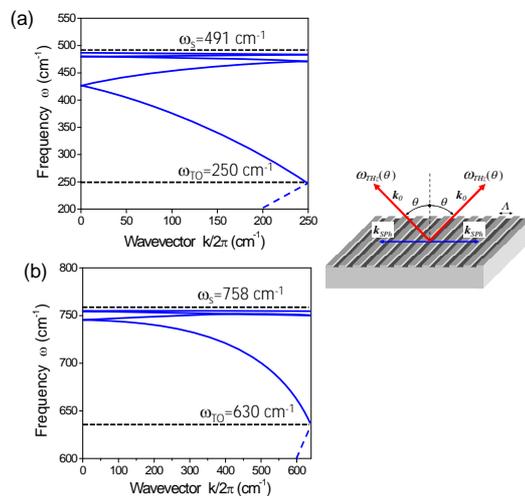


図 1 ニオブ酸リチウム結晶中の光学フォノンモード (250, 630 cm^{-1}) からの表面テラヘルツ波発生動作領域

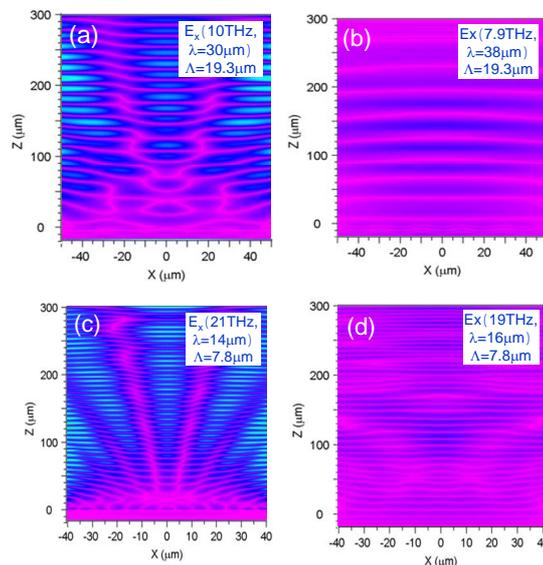


図 2 上記の光学フォノンモードからの表面テラヘルツ波発生電磁場放射特性

電磁場解析を行った。その結果、表面波モードが現れる 7.5~14.7THz、18.9~22.7THz の双方の周波数領域（負誘電率領域）内においてテラヘルツ波放射が起こることを見出した。その際、期待されたようにデバイス近傍では複雑な電磁場パターンをもち、遠方場では指向性をもつテラヘルツ波の放射特性を見出すとともに、下限周波数付近（7.9, 19THz）では放射の抑制が起こることも確認できた（図2）。またテラヘルツ波発生に寄与する表面プラズモン伝搬現象についても FDTD 解析を進め、放射結合に最適な凹凸深さが周期の約 1/10 となることを見出した。

この解析結果に基づいて、東北大学ナノテク融合技術支援センターを利用して、ニオブ酸リチウム結晶の反応性イオンエッチング（RIE）によるデバイス試作を実施した。ニオブ酸リチウム結晶の RIE 加工の報告例は極めて少なく、本研究ではテラヘルツ波発生に必要な酸化マグネシウム添加ニオブ酸リチウム結晶（ZX 面）の RIE 微細加工に初めて取り組んだ。まず周期 7.8, 19.3 μm の回折格子を CAD 設計し、パターンジェネレータを用いて高品質の Cr マスクの作製に成功した。これを用いたフォトリソグラフィにより、結晶基板への高品質のレジストパターン形成に成功した。さらに、CF₄ ガスを用いて RIE 加工と接触段差計による周期凹凸構造の観察を併用してエッチングレートを調査し、約 1.3nm/min を見出した。強誘電体である本結晶には RIE 過程において基板帯電による動作不安定の問題が生じたが、深さ約 80nm まで高精度な（本研究で必要な数%程度以内の加工精度で）周期凹凸構造を作製することに成功した。さらに深い高精度なエッチングは今後の研究課題であり、テラヘルツ技術の周波数領域開拓において重要な技術となり得ることを明らかにした。

一方、表面フォノンを介したテラヘルツ波発生・検出において、常温環境下で使用できる広帯域かつ超高感度のテラヘルツ波検出技術の開拓が不可欠であり、本研究では非線形光学効果によるテラヘルツ波発生・検出系を実験的に調査した。光パラメトリック発振器により発生した励起光 2 波長を有機非線形結晶 DAST 結晶に照射して差周波混合を行い、約 2~26THz にわたる広帯域の周波数可変テラヘルツ波発生に成功した。さらに、別途構築した光パラメトリック発振器から 1 波長を励起光として発生させ、テラヘルツ波と同時にテラヘルツ波検出用 DAST 結晶に照射した。これにより新たに発生する近赤外信号光を高感度近赤外光検出器で検出することにより、常温でのテラヘルツ波検出を行った。その結果、周波数 27THz のテラヘルツ波について、パルスエネルギー 3fJ の微弱テラヘルツ波検出に成功し、雑音等価パワーとして約 20pW/Hz^{1/2} の高感度検出を達成した。この結果は、従来の高感度なテラヘルツ波検出器（極低温で動作するボロメータ）を遙かに凌

駕し、高効率なテラヘルツ波と光波の相互周波数変換にも寄与する成果である。

以上から、表面フォノンを介したテラヘルツ波と光波の相互周波数変換について、基盤となる表面フォノンの光学特性に関する知見と技術基盤を得ることができ、その実現と応用展開への見通しを得た。

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 8 件）

1. T. Matsukawa, T. Notake, K. Nawata, S. Inada, S. Okada, and H. Minamide, Terahertz-wave generation from 4-dimethylamino-N'-methyl-4'-stilbazolium p-bromobenzenesulfonate crystal: Effect of halogen substitution in a counter benzenesulfonate of stilbazolium derivatives, *Optical Materials*, 査読有 (in press)
2. H. Minamide, S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, and K. Kawase, Kilowatt-peak terahertz-wave generation and sub-femtojoule terahertz-wave pulse detection based on nonlinear optical wavelength-conversion at room temperature, *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 査読有, Vol. 35, 2014, pp. 25-37, DOI: 10.1007/s10762-013-0041-0
3. S. Fan, F. Qi, T. Notake, K. Nawata, T. Matsukawa, Y. Takida, and H. Minamide, Real-time terahertz wave imaging by nonlinear optical frequency up-conversion in a 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate crystal, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, Vol.104, 2014, 101106-1-4, DOI: 10.1063/1.4868134
4. F. Qi, S. Fan, T. Notake, K. Nawata, T. Matsukawa, Y. Takida, and H. Minamide, 10 aJ-level detection of ns pulse below 10 THz by frequency upconversion detection via DAST crystal: more than a 4 K bolometer, *Opt. Lett.*, 査読有, Vol.39, 2014, pp. 1294-1297
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.39.001294>
5. F. Qi, K. Nawata, S. Hayashi, T. Notake, T. Matsukawa, and H. Minamide, Bridging a few terahertz to tens of terahertz: inspection on a cost-effective, room-temperature operated measurement system based on frequency conversion via 4-dimethylamino-N'-methyl-4'-stilbazolium tosylate crystal, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, Vol. 104, 2014, 031110-1-4, DOI: 10.1063/1.4863082
6. T. Matsukawa, K. Nawata, T. Notake, F. Qi, H. Kawamata, and H. Minamide, Pump-beam-induced optical damage depended on repetition frequency and pulse width in 4-dimethylamino-N'-methyl-4'-stilbazolium tosylate crystal, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有,

Vol. 103, 2013, 023302-1-4, DOI: 10.1063/1.4813602

7. 南出泰壘、非線形光学波長変換による高効率テラヘルツ波発生および検出、応用物理、査読有、Vol. 81、2012、284-290、<http://www.jsap.or.jp/ap/2012/04/ob810284.xml>
8. H. Minamide and H. Ito, Frequency-agile terahertz-wave sources and applications to sensitive diagnosis of semiconductor wafers, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 8023, 2011, 802317-1-5, DOI: 10.1117/12.899625

[学会発表](計 53 件)

1. 南出泰壘、非線形光学効果によるテラヘルツ波発生検出技術開発の最先端、電子情報通信学会総合大会、2014年3月18日、新潟
2. 四方潤一、三瓶有輝、斎藤光留、白石拓也、田中宏樹、南出泰壘、表面プラズモン共鳴を用いたテラヘルツ波制御デバイスの動作特性、日本表面科学会東北・北海道支部学術講演会、2014年3月11日、仙台
3. 四方潤一、南出泰壘、林伸一郎、表面フォノン共鳴による負誘電率領域のテラヘルツ波発生特性、日本表面科学会東北・北海道支部学術講演会、2014年3月11日、仙台
4. S. Fan, F. Qi, T. Notake, K. Nawata, T. Matsukawa, Y. Takida, and H. Minamide, Room temperature terahertz wave imaging at 60 fps by frequency up-conversion in DAST crystal, Photonics West, 2014年2月1~6日、San Francisco, USA
5. S. Fan, F. Qi, T. Notake, K. Nawata, T. Matsukawa, Y. Takida, and H. Minamide, Real-time Room-temperature terahertz wave imaging by frequency up-conversion in DAST crystal, NICT—理研合同テラヘルツ研究交流会、2014年1月17日、東京
6. F. Qi, S. Fan, T. Notake, K. Nawata, T. Matsukawa, Y. Takida, and H. Minamide, 10 aJ-level sensing of ns pulse below 10 THz by frequency upconversion detection via DAST crystal: more than a 4 K bolometer, NICT—理研合同テラヘルツ研究交流会、2014年1月17日、東京
7. 林伸一郎、縄田耕二、川瀬晃道、南出泰壘、非線型波長変換による超高輝度テラヘルツ光の発生と検出、NICT—理研合同テラヘルツ研究交流会、2014年1月17日、東京
8. 南出泰壘、最先端テラフォトンクス研究開発と将来展開、NICT—理研合同テラヘルツ研究交流会、2014年1月17日、東京
9. 南出泰壘、非線形光学波長変換による最先端テラヘルツ波発生および検出技術の開発、電子情報通信学会電子デバイス研究会
- ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システム、2013年12月17日、仙台
10. 松川健、野竹孝志、縄田耕二、南出泰壘、高出力テラヘルツ波発生のための有機非線形光学結晶の開発、理研シンポジウム第1回「光量子工学研究」、2013年10月31日~11月1日、和光
11. 三宅良宜、縄田耕二、山下将嗣、佐藤篤、南出泰壘、有機非線形結晶を用いた波長変換における sub-THz 帯位相整合条件に関する検討、理研シンポジウム 第1回「光量子工学研究」、2013年10月31日~11月1日、和光
12. 林伸一郎、縄田耕二、川瀬晃道、南出泰壘、非線型波長変換による超高輝度テラヘルツ光の発生、理研シンポジウム 第1回「光量子工学研究」、2013年10月31日~11月1日、和光
13. S. Fan, F. Qi, T. Notake, K. Nawata, T. Matsukawa, Y. Takida, and H. Minamide, Room temperature terahertz wave imaging at video-rate by frequency up-conversion in DAST crystal, 理研シンポジウム 第1回「光量子工学研究」、2013年10月31日~11月1日、和光
14. F. Qi, S. Fan, T. Notake, K. Nawata, T. Matsukawa, Y. Takida, and H. Minamide, 10 aJ-level detection of ns pulse below 10 THz by frequency upconversion via DAST-DFG: more than a 4K bolometer, 理研シンポジウム 第1回「光量子工学研究」、2013年10月31日~11月1日、和光
15. 南出泰壘、最先端テラフォトンクス研究と将来展開、理研シンポジウム 第1回「光量子工学研究」、2013年10月31日~11月1日、和光
16. H. Minamide, Efficient wavelength-conversion between terahertz wave and near-infrared beam using lithium niobate crystal, GDR-I and GDR Workshop, 2013年12月9~11日、Montpellier, France
17. T. Matsukawa, S. Inada, S. Okada, and H. Minamide, Development of a single-crystalline stilbazolium derivative with halogenated benzenesulfonate for terahertz-wave generation, 6th International Symposium on Lasers, Scintillators and Non-Linear Optical Materials (ISLOM-6), 2013年10月20~23日、Shanghai, China
18. H. Minamide, F. Qi, and S. Fan, Terahertz Wave Detection using Nonlinear Optical Up Conversion by DAST, 21st International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom 2013), 2013年10月14~16日、Dubrovnik, Croatia
19. 四方潤一、南出泰壘、林伸一郎、表面フォノン共鳴型テラヘルツ波発生の動作特

- 性、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、2013年9月17日、福岡
20. 林伸一郎、縄田耕二、川瀬晃道、南出泰壘、非線形光学波長変換による高感度テラヘルツ光検出、第74回応用物理学会学術講演会、2013年9月16~20日、京都
 21. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase, and H. Minamide、Realizing of Extremely Wide Dynamic Range Measurement Using High-Brightness Terahertz-Wave、38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2013)、2013年9月1~6日、Mainz, Germany
 22. 三瓶有輝、四方潤一、大寺康夫、南出泰壘、表面波共鳴テラヘルツ波共振器デバイスの動作解析、電気関係学会東北支部連合大会、2013年8月22日、会津若松
 23. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase, and H. Minamide、High-peak-power and Tunable Terahertz-wave Generation by Using Nonlinear Parametric Conversion、PIERS 2013 Stockholm (Progress In Electromagnetics Research Symposium、2013年8月12~15日、Stockholm, Sweden
 24. H. Minamide、Efficient wavelength-conversion between terahertz wave and infrared light using nonlinear optical susceptibility $\chi^{(2)}$ 、Int. Symposium on Microwave/Terahertz Science and Application (MTSA 2013)、2013年7月22~23日、Shanghai, China
 25. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase, and H. Minamide、Terahertz-wave Parametric Generation and Detection System Covering the Range From 1 to 3 THz、10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013)、2013年6月30日~7月4日、Kyoto, Japan
 26. H. Minamide、Intense Terahertz-wave Generation and Sensitive Detection Using Nonlinear Optical Effect、10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013)、2013年6月30日~7月4日、Kyoto, Japan
 27. K. Nawata, Y. Miyake, S. Hayashi, T. Notake, H. Kawamata, T. Matsukawa, F. Qi, and H. Minamide、Study of efficient optical parametric generation in KTP crystal as pump source for DAST-DFG、Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO2013)、2013年6月9~14日、San Jose, USA
 28. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase, and H. Minamide、Highly sensitive Terahertz-wave Detection by using Nonlinear Parametric Conversion、Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO2013)、2013年6月9~14日、San Jose, USA
 29. T. Notake, K. Nawata, T. Matsukawa, F. Qi, H. Kawamata and H. Minamide、Ultra-widely tunable DFG THz-wave source using organic DAST and BNA crystals pumped by a dual-wavelength β -BaB₂O₄ optical parametric oscillator、Advanced Lasers & Photon Sources Conference (ALPS'13)、2013年4月23~25日、Yokohama, Japan
 30. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase and H. Minamide、1.1 kW peak-power terahertz-wave generation comparable to THz-FEL by nonlinear parametric conversion、Advanced Lasers & Photon Sources Conference (ALPS'13)、2013年4月23~25日、Yokohama, Japan
 31. F. Qi, K. Nawata, T. Notake, H. Kawamata, T. Matsukawa and H. Minamide、Frequency up-conversion detection of THz waves by DAST-DFG: approaching more than 4K bolometer、Int. Workshop on Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2013)、2013年4月1~5日、Kyoto, Japan
 32. Y. Miyake, K. Nawata, M. Yamashita, A. Sato and H. Minamide、Design of sub-THz-wave generation based on DAST-DFG pumped by injection-seeded OPG、Int. Workshop on Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2013)、2013年4月1~5日、Kyoto, Japan
 33. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase and H. Minamide、Highly sensitive terahertz-wave up-conversion detection with dynamic range over 100dB、Int. Workshop on Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2013)、2013年4月1~5日、Kyoto, Japan
 34. 南出泰壘、テラヘルツ波の発生と検出 - テラヘルツ波と光波の間を自在に変換 -、2012年度電子情報通信学会東北支部先端シンポジウム「テラヘルツ光学の最前線」、2013年3月6日、郡山
 35. H. Minamide、Development of cutting-edge terahertz-wave source and detection using a nonlinear optical effect、RIKEN Metamaterials Symposium 2012、2013年1月18日、Wako, Japan
 36. 四方潤一、明るい未来を拓く新しい「光」、2012年度表面科学会東北・北海道支部市民講座、2012年12月22日、郡山
 37. 三瓶有輝、四方潤一、大寺康夫、柴田宣、表面波共鳴型テラヘルツ波共振器デバイスの多波長動作解析、第67回応用物理学会東北支部学術講演会、2012年12月6日、仙台
 38. K. Kawase, S. Hayashi, and H. Minamide、Highly efficient THz-wave parametric generation and detection、International

- Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT 2012)、2012年11月27~29日、Nara, Japan
39. H. Ito, S. Hayashi, and H. Minamide、Efficient frequency conversion between light and terahertz waves、50 Years of Nonlinear Optics, International Symposium、2012年10月8~10日、Barcelona, Spain
 40. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase, and H. Minamide、High-power and Tunable Terahertz-wave Generation and Sensitive Detection by using Nonlinear Parametric Conversion、37th International conference on infrared, millimeter and terahertz waves (IRMMW-THz 2012)、2012年9月23~28日、Wollongong, Australia
 41. 四方潤一、三瓶有輝、柴田宣、南出泰亜、大寺康夫、野村祐蔵、八坂洋、表面波共鳴型テラヘルツ共振器デバイスの動作特性、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、2012年9月12日、富山
 42. H. Minamide、High peak-power, tunable terahertz-wave generation and sensitive detection using nonlinear optical wavelength-conversion、2012 THz workshop、2012年7月6日、Seoul, Korea
 43. H. Minamide、Tunable and high peak-power Terahertz-wave generation using nonlinear optical wavelength conversion、Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) THz Seminar、2012年7月5日、Daejeon, Korea
 44. H. Minamide、Terahertz-wave generation and detection using organic nonlinear optical crystals、Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI) THz Seminar、2012年7月5日、Daejeon, Korea
 45. H. Minamide and H. Ito、Ultra-broadband Terahertz generation and detection using a nonlinear optical effect、Laser Seminar、2012年4月27日、Zurich, Switzerland
 46. H. Minamide、High-power Terahertz-wave Generation Based on Nonlinear Optics and Its Sensing Application、1st Annual Conference and EXPO of AnalytiX-2012、2012年3月24日、Beijing, China
 47. 四方潤一、野村祐蔵、南出泰亜、八坂洋、表面プラズモン共鳴型テラヘルツ波結合デバイスの動作特性、第66回応用物理学会東北支部学術講演会、2011年12月2日、盛岡
 48. H. Minamide、High-peak-power Terahertz-wave generation and sensitive detection using nonlinear optical wavelength-conversion、Joint Conference of International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2011) Workshop of International Terahertz Research Network (GDR-I)、2011年11月25日、Osaka, Japan
 49. 西條直也、四方潤一、石塚徹、植澤裕史、末光眞希、虫明元、坂本一寛、混合神経伝達物質のラマン・スペクトルの背景補正法：脳活動の新しいラベル・フリー計測法に向けて、第34回日本神経科学大会、2011年9月15日、横浜
 50. 南出泰亜、テラフォトンクス研究の新展開、理研シンポジウム「第12回理研・分子研合同シンポジウム：エクストリームフォトンクス研究」、2011年6月30日、和光
 51. H. Minamide、Ultra-broadband Terahertz generation and detection using a nonlinear optical technique、The 2011 International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2011)、2011年6月21日、Nanjing, China
 52. H. Minamide and H. Ito、Frequency-agile terahertz-wave sources and applications to sensitive diagnosis of semiconductor wafers、SPIE Defense, Security and Sensing、2011年4月26日、Florida, USA
 53. 南出泰亜、伊藤弘昌、非線形光学技術による最先端テラヘルツ波発生・検出、第9回レーザー学会「マイクロ固体フォトンクスの新展開ージャイアントマイクロフォトンクスの創成ー」専門委員会講演会、2011年4月20日、横浜
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Profiles/89/0008827/profile.html>
6. 研究組織
- (1)研究代表者
四方潤一 (SHIKATA, Jun-ichi)
日本大学・工学部・准教授
研究者番号：50302237
- (2)研究分担者
南出泰亜 (MINAMIDE, Hiroaki)
独立行政法人理化学研究所・光量子工学研究領域・チームリーダー
研究者番号：10322687