

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13383

研究課題名（和文）時空間発展するテラヘルツ連続波の超高感度可視化-新しい計測原理の提案と実証-

研究課題名（英文）Development of a field visualization system based on EO sensing

研究代表者

久武 信太郎（Hisatake, Shintaro）

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：20362642

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：非偏光変調方式において、非平衡二波長光源を用いたシステムによる感度向上に取り組んだ。2つのLO光のパワー比をおよそ10とした時、得られた信号振幅は3倍となったが、同時に雑音レベルも1.5倍となった。その結果、検出光電流を一定としても、非平衡二波長光源を用いることで6 dBの感度向上が実現された。従来方式である偏光変調方式では電気光学効果の大きなEO結晶を用いることでしか感度向上を図ることができなかったが、本研究により提案された新たな感度向上法が実証され、合計16 dBの感度向上を実現した。

研究成果の概要（英文）：In the nonpolarization modulation scheme, we worked on improving the sensitivity by a system using an unbalanced dual wavelength light source. When the power ratio of the two LO lights was set to about 10, the signal amplitude obtained was tripled, but the noise level also became 1.5 times at the same time. As a result, even if the detected photocurrent is constant, sensitivity improvement of 6 dB was realized by using an unbalanced dual wavelength light source. In the conventional polarization modulation method, sensitivity can only be improved by using an EO crystal with a large electrooptic effect. A new scheme has realized a 16 dB improvement of the sensitivity using the same EO crystal.

研究分野：ミリ波フォトニクス、テラヘルツ波フォトニクス

キーワード：電界可視化 ミリ波 テラヘルツ波 計測

1. 研究開始当初の背景

永らく未開の電磁波領域と言われてきたテラヘルツ波 (100 GHz・10 THz の電磁波: THz 波)は、その発生・検出技術の進展に伴い、近年は「使える」電磁波領域として期待されている。例えば、高速無線通信に対するニーズから、300 GHz 帯高利得アンテナを始めとした THz デバイスの研究・開発競争が世界中で始まっている。THz 波への注目はこのような実用的観点にとどまらない。サブ波長金属要素の配置により実現される電磁メタマテリアル-自然界には存在しない有効誘電率と有効透磁率とを有する人工物質-は、デバイスの作り易さと実験系の規模の観点から、THz 波帯での実験に期待が寄せられている。

本研究では、これら実用・基礎研究を飛躍的に進展させるキーとなる計測技術、すなわち高感度・広帯域かつ低擾乱に金属近傍の連続(CW)電磁波(振幅と位相)の時空間発展を可視化する技術を創成する。

研究開発当初に想定された学術的意義 (波及効果の一例) は以下のとおりである。

- ・THz 波帯で問題となっているアンテナ特性の実験とシミュレーションとの食い違いの原因を直接的に調べることが可能となる。デバイス評価にも役立つ。
- ・高周波数領域での電磁界シミュレーションの実験的検証が可能となる。
- ・電磁メタマテリアルやプラズモニックデバイスの物理に関する実験的知見が得られる。
- ・光渦や非回折ビームなどの特異なビームの伝搬・回折・散乱現象の実験的研究が拓かれる。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの計測技術の常識を1桁以上凌駕する感度で、局在/伝搬する THz 波の時空間発展を可視化する技術を創成する。本研究者が最近世界で初めて実現した THz 連続波の可視化技術をベースに、独創的な新原理に基づく高感度電界計測法を実証することで、実用研究・基礎研究双方から注目を集めている 300 GHz 以上の周波数帯における電磁現象の実験的研究手法を創出し、新分野開拓のための計測技術を確立する。本技術により、THz デバイスの評価のみならず、非回折ビームや渦ビームを始めとした特異なビームの伝搬・回折・散乱現象や、電磁メタマテリアルの電磁応答を実験的に広帯域かつ精密に調べることが可能となり、マイクロ波から光波に亘る波動現象を扱う広い研究分野に大きなインパクトを与える。

3. 研究の方法

図1に従来の電気光学 (Electrooptic: EO) 計測の原理と本研究で提案する新原理との比較を示す。従来の EO 計測の原理は、被検出電場によるプローブ光の偏光変調に基づいている。一方、新原理は、被検出電場によりプローブ光に生成される位相変調サイドバンドと L0 光とのヘテロダイン検出である。偏光変調されたプローブ光を偏光分離により強度変調に変換する従来の EO 計測は、変調サイドバンドと元のプローブ光とのホモダイン検出と捉えることができる。この場合、サイドバンド生成のためのプローブ光と L0 光とが同一であるため、最終的な検出感度は、EO 結晶の電気光学定数に支配されることとなる。このため、従来技術には高感度化に限界があった。一方、新原理に基づけば、サイドバンド生成のためのプローブ光強度とコヒーレント検出のための L0 光強度とを独立個別に最適化することが可能となり、従来にない高感度化が達成される可能性がある。すなわち、位相変調サイドバンド強度を大きくするために強いプローブ光を用いることで、より大きな変調サイドバンドを生成し高感度化を達成する。従来技術では、プローブ光を強くした場合、フォトダイオード (PD) の飽和により感度が制限される問題があったが、本手法においては強いプローブ光は波長フィルタにより抑圧されるため、PD を飽和させることなく高感度化が可能である。

ところで、電気光学係数は大きいものの複屈折揺らぎによる感度揺らぎの問題からこれまで利用が避けられてきた EO 結晶 (DAST 等)も、新原理に基づけば感度変動無く利用することが可能と考えられる。本研究では、EO 計測の実用上の観点からこれまで歴史的に葬り去られてきた EO 結晶群を新原理に基き再検討するアプローチも採用する。

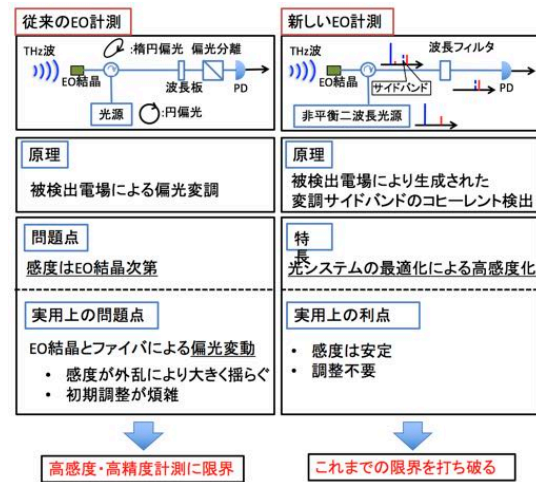


図1. 従来技術との比較.

4. 研究成果

本研究では以下の項目に取り組む予定であった。

- 【1】 平衡二波長光源による理論感度限界の達成
- 【2】 非平衡二波長光源による感度向上の定量的評価
- 【3】 電気光学係数の高い複屈折性 EO 結晶の実験的再検討
- 【4】 適用可能な周波数範囲の実験的検討
- 【5】 電磁現象の時空間発展の可視化のデモンストレーション

以下では得られた成果の中で特に重要な【2】-【5】について述べる。

非平衡二波長光源による感度向上の定量的評価

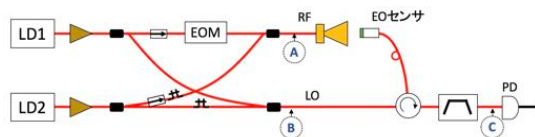


図 2. 非平衡二波長光源を用いた感度向上の原理検証。

図 2 に示す実験系を用いて非平衡二波長光源による感度向上の原理実証を行った。本原理実証では、同じパワーのレーザを用いているが、各場所に配した可変アッテネータを用いてパワーの非平衡状態を作り出している。2 波長プローブ光のパワー比を 10 dB としたときに図 2 中 B 点で観測された光スペクトルを図 3 に示す。なお、RF 側の 2 波長光のパワーレベルは同じとしている（平衡）。

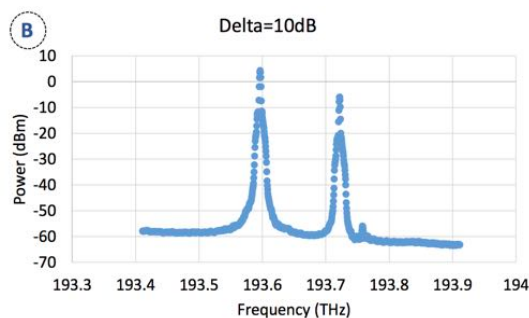


図 3. B 点で観測された光スペクトル。2 波長光のパワー比は 10 dB である。

2 波長プローブ光のパワー比と得られた信号対雑音比(Signal-to-noise ratio: SNR)との関係を図 4 に示す。

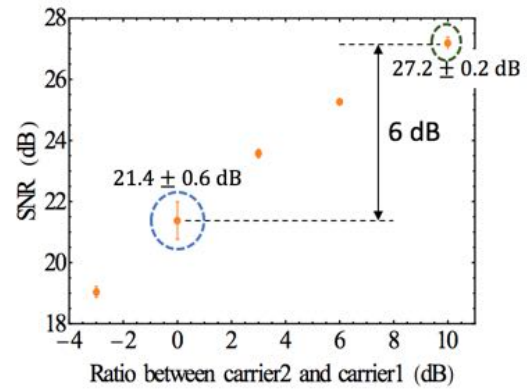


図 4. 2 波長プローブ光のパワー比と得られた SNR との関係。

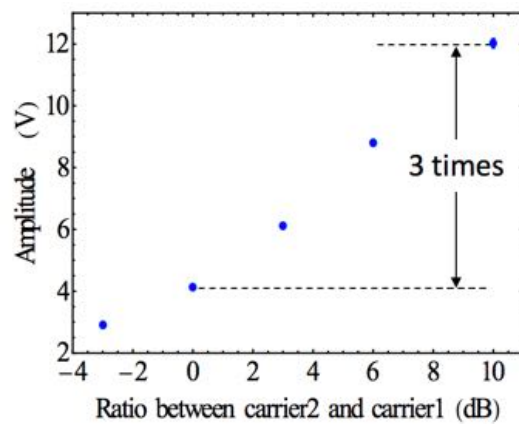


図 5. 2 波長プローブ光のパワー比と得られた信号振幅との関係。

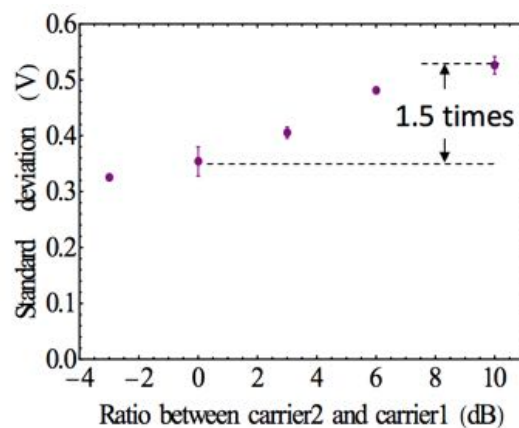


図 6. 2 波長プローブ光のパワー比と得られた信号の標準偏差との関係。

平衡状態(パワー比 0 dB)と比べ、パワー比を 10 dB とした時、理論的には 10 dB の SNR 向上を見込んでいたが、実験的には 6 dB の感度向上にとどまった。この時の信号振幅とその標準偏差を図 5 と図 6 に示す。信号振幅は理論通りの振る舞いをしている一方で、PD に流れる光電流値が一定であるにもかかわらず、

計測された信号振幅の標準偏差はパワー比 0 dB と比べてパワー比 10 dB では 1.5 倍となっていることがわかった。これは、サイドバンドを生成するプローブ光に重畳されている光アンプの ASE 雑音が原因だと考えられる。現時点ではこれによって感度向上は制限されているが、従来手法である平衡プローブを用いるよりも少なくとも 6 dB の感度向上が達成された。

電気光学係数の高い複屈折性 E0 結晶の実験的再検討と適用可能な周波数範囲の実験的検討

本手法では図 1 に示すように、従来手法の偏波変動が感度変動を引き起こす問題が解決されているため、これまでファイバ型 E0 プローブでの計測には使用できないと考えられてきた複屈折の大きな結晶でもセンサに利用可能と考えられる。そこで DAST 結晶による計測を行った。

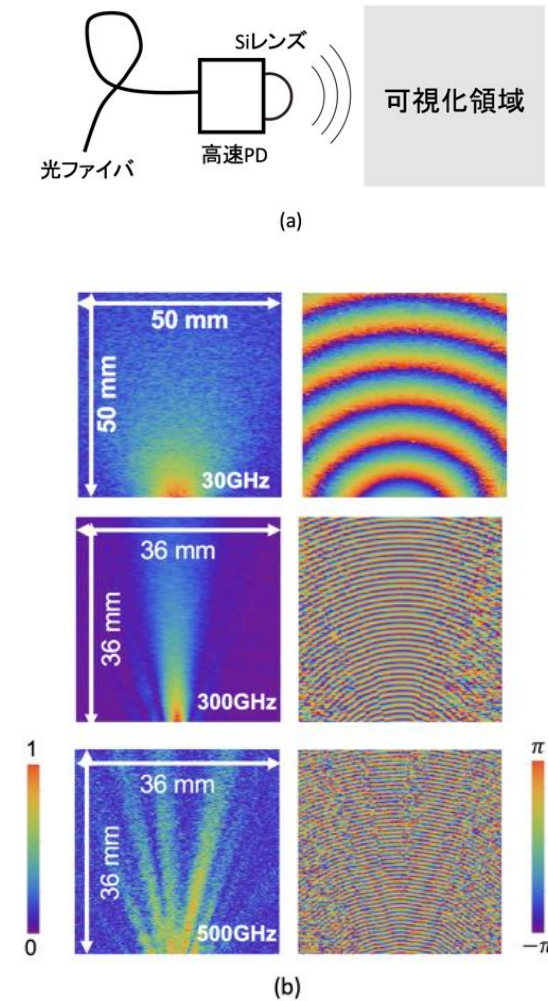


図 7. Si レンズが装荷された高速 PD からの放射パターン。ミリ波・THz 波は光ビートにより生成された。

図 7 に得られた結果を示す。平衡型の実験系において、Si レンズが装荷された高速 PD から放射される電界分布を示している。可視化領域は図 7(a) に示すように、Si レンズ直後の領域において 36 mm×36 mm あるいは、50 mm×50 mm である。本可視化においては、DAST センサが先端に装荷された偏波保持ファイバを 2 次元平面内で掃引させているが、余剰雑音は見られず高い再現性での計測が可能であることが実証された。また、適用可能な周波数範囲は少なくとも 20 GHz から 500 GHz にわたることも実験的に確認できた。

電磁現象の時空間発展の可視化のデモンストレーション

寸法が波長程度の誘電体直方体 (cuboid) に電磁波を照射すると、直方体直後の領域に波長以下のホットスポットが生成されることを見出した。実験系の概略を図 8 に示す。

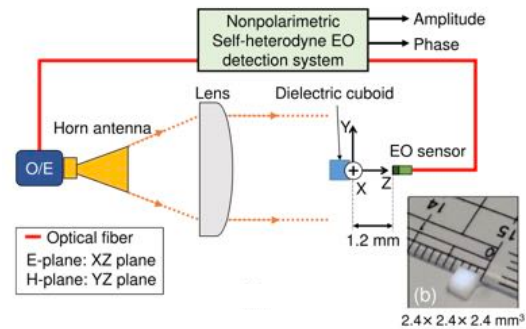


図 8. 誘電体直方体により生成されたホットスポットの可視化系。

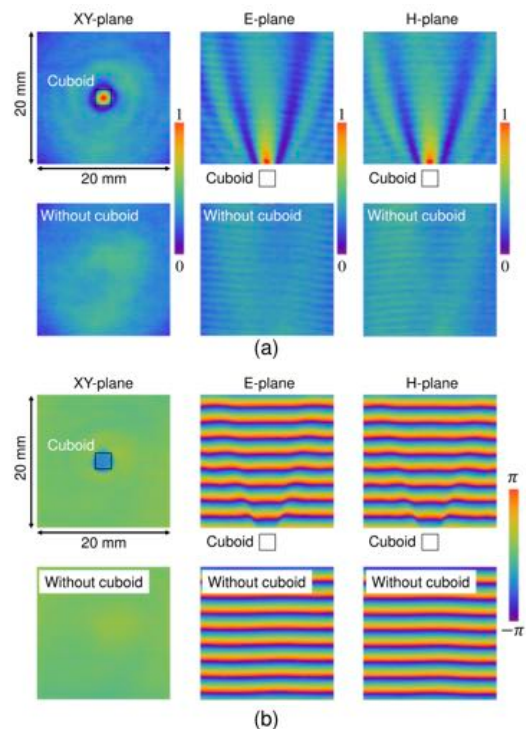


図 9. 可視化結果。(a) 振幅分布、(b) 位相分布。

図 9 に可視化結果を示す。誘電体直方体に 125 GHz の平面波を照射した。誘電体直方体直後に強度が大きくなったホットスポットが形成されていることがわかる。また、ホットスポットが形成された領域において、Gouy 位相シフトも観測されている。図 10 に誘電体直方体直後から、THz 波伝搬方向(Z 方向)の強度分布を示す。誘電体直方体直後では、およそ 7 dB の強度増強がにられた。伝搬に伴う強度の減衰は、シミュレーションと良い一致を示しており、本計測技術の正確性が実証された。

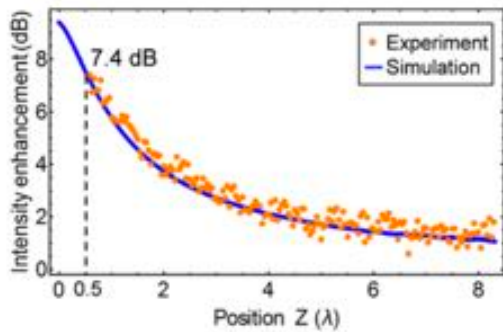


図 10. 強度増強の距離依存性.

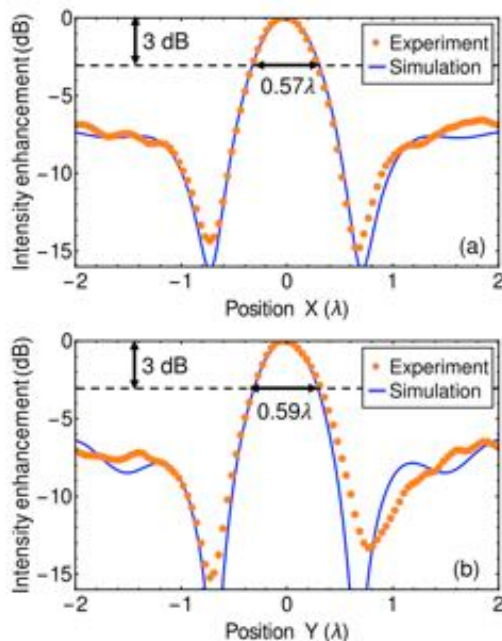


図 11. ホットスポットの大きさ.

図 11 にホットスポットの強度分布を示す。青線はシミュレーション結果である。得られた実験結果はシミュレーションと良い一致を示しており、およそ 0.6λ の半値幅となっていることが実験的に確かめられた。

以上のように、本研究で開発された高感度・高精度・高角度な可視化システムにより、電磁現象の時空間発展を実験的に研究することが可能となった。今後は本技術により、THz

デバイスの評価のみならず、非回折ビームや渦ビームを始めとした特異なビームの伝搬・回折・散乱現象や、電磁メタマテリアルの電磁応答を実験的に広帯域かつ精密に調べる事が可能となる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① T. Nagatsuma, S. Hisatake, M. Fujita, H. H. Nguyen Pham, K. Tsuruda, S. Kuwano, J. Terada, "Millimeter-Wave and Terahertz-Wave Applications Enabled by Photonics," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 52, Issue 1, 0600912 (2015).
- ② T. Nagatsuma, S. Hisatake, H. H. Nguyen Pham, "Photonics for Millimeter-wave and Terahertz Sensing and Measurement," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E99-C, No. 2, pp.173-180 (2016).
- ③ H. H. Nguyen Pham, S. Hisatake, I. V. Minin, O. V. Minin, and T. Nagatsuma, "Three-Dimensional Direct Observation of Gouy Phase Shift in a Terajet Produced by a Dielectric Cuboid," *Applied Physics Letters*, 108, 191102 (2016).
- ④ H. H. Nguyen Pham, S. Hisatake, O. V. Minin, and T. Nagatsuma and I. V. Minin, "Enhancement of Spatial Resolution of Terahertz Imaging Systems Based on Terajet Generation by Dielectric Cube," *APL Photonics*, 056106 (2017).
- ⑤ H. H. Nguyen Pham, S. Hisatake, O. V. Minin, T. Nagatsuma, I. V. Minin, "Asymmetric phase anomaly of terajet generated from dielectric cube under oblique illumination," *Applied Physics Letters*, 110, 201105 (2017).

[学会発表] (計 13 件)

- ① S. Hisatake, "Precise measurement and visualization of continuous terahertz wave based on photonics technology," EMN open access week 2015, to be presented (2015).
- ② H. H. Nguyen Pham, S. Hisatake, and Tadao Nagatsuma, "Experimental Visualization of Beam-collimating Effect by Metal Hole Array in THz Region," *The 76th JSAP Autumn Meeting*, 2015, to be presented (2015).
- ③ H. H. Nguyen Pham, S. Hisatake, H. Uchida, and T. Nagatsuma,

“Evaluation of DAST Crystals for Nonpolarimetric Self-heterodyne Electro-optic Detection of Terahertz Waves,” First PEM International Workshop, Kyoto Japan, (2015).

- ④ H. H. Nguyen Pham, S. Hisatake, H. Uchida, and T. Nagatsuma, “Evaluation of DAST Crystals for Nonpolarimetric Self-heterodyne Electro-optic Detection of Terahertz Waves,” First PEM International Workshop, FB-1 (2015).
- ⑤ S. Hisatake, “THz radio visualization by photonics,” Joint Workshop for Photonics and Radio Technologies: Radio and Optical Technologies for Sensor Networks, Jakarta, Indonesia (2016).
- ⑥ H. H. Nguyen Pham, S. Hisatake, I. V. Minin, O. V. Minin, “Experimental Evaluation of Terajet Produced by a Dielectric Cuboid in the THz Region,” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 22a-H135-7 (2016).
- ⑦ S. Hisatake, “Precise THz wave measurements enabled by photonics technology,” EMN Meeting on Optoelectronics, Thailand, B04 (2016).
- ⑧ S. Hisatake, “Millimeter wave and THz wave measurements by photonics,” 5th Annual World Congress of Advanced Materials2, China, 1-3-9 (2016).
- ⑨ 久武信太郎, “フォトニクスが拓くミリ波・テラヘルツ波計測,” 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 フォトニクス分科会シンポジウム「フォトニクスの未来を担う研究者」14p-A41-9 (2016)
- ⑩ 久武信太郎, “光技術に基づくミリ波・テラヘルツ波計測,” 2016 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会 シンポジウム「光技術を利用した高周波信号計測の最新動向」BCI-1-2, (2016).
- ⑪ S. Hisatake, “Visualization of Millimeter and Terahertz Waves Based on Photonics,” International Topical Meeting on Microwave Photonics 2016 (MWP 2016) (2016).
- ⑫ 久武信太郎, “電気光学プローブによるミリ波・テラヘルツ波の精密計測,” 光応用電磁界計測 (PEM) 時限研究専門委員会 第 3 回研究会 (2017).
- ⑬ H. H. Nguyen Pham, S. Hisatake, I. V. Minin, O. V. Minin, and T. Nagatsuma, “Angular Characteristic of Terajet Generated From Dielectric Cuboid in THz Region,” The 64th JSAP Spring Meeting 2017, 14a-211-17 (2017).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久武信太郎 (Hisatake, Shintaro)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号：20362642