

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656049

研究課題名(和文) THz 波帯金属表面局在電場の 3 次元分光イメージング

研究課題名(英文) THz near-field spectroscopic visualization of metal-hole array

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、(間接経費) 930,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究は、THz波帯の電磁波を対象に、波長と構造寸法が同程度のいわゆる共鳴領域において特徴的に振る舞う金属周期開口の特性を、その表面に局在する電場の3次元イメージングにより実験的に明らかにし、局在電場モニタ型の物質センサへの応用の道を開拓することを目的としていた。THz電場の振幅と位相を同時に低擾乱で測定する手法を新たに確立し、ホーンアンテナから放射されるTHz電磁波(125 GHz)と金属周期開口の近傍界の振幅と位相の空間分布の可視化に初めて成功した。金属周期開口の近傍界が共鳴からのずれによって敏感に変化することを実験的に明らかにし、物質センシングへの応用の端緒をつけた。

研究成果の概要(英文)：In this project, we proposed and developed a new technique which enables terahertz (THz: 0.1-10 GHz) near-field spectroscopic visualization of metal-hole array. The self-heterodyne technique and nonpolarimetric electrooptic (EO) detection technique are the key. The frequency of the optical beat for the generation is shifted by an optical frequency shifter to realize THz self-heterodyne detection. The THz signal to be detected is once up-converted by the EO phase modulation in the fiber-mounted EO crystal (ZnTe), then down converted to the intermediate frequency band by the coherent detection of the generated sideband. Our coherent technique significantly improved not only the stability and the repeatability but also the simplicity of the measurements compared with the conventional polarimetric EO detection. As a result, phase evolution of the freely propagating continuous THz wave (125 GHz) and near-field of a metal-hole array have been demonstrated, for the first time.

研究分野：応用光学・量子光工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：テラヘルツ プラズモニクス 近接場 電界センシング

## 1. 研究開始当初の背景

金属表面に施された周期的開口構造の寸法が波長と同程度( $a < d \approx \lambda$ ,  $a$ :開口の寸法、 $d$ :開口の周期、 $\lambda$ :波長)の共鳴領域、いわゆる Wood's anomaly (ウッズの異常回折)領域では構造パラメータ、入射光の波長、あるいは入射角のわずかな変化に対して場が劇的に変化することが知られている。この領域には、擬似表面プラズモンポラリトンを含む表面モードや単一開口内の開放端共鳴モードなどが複合的に存在しており、これらが構造の特性に大きな影響を与えると考えられる。このような領域では場が複雑に振る舞うため数値解の精度と収束性の悪化が顕著となることが計算科学の分野で明らかとなっているが、これを逆に利用し、敏感に振る舞う局在電場をモニタすれば、非常に高感度なセンサが構築できる可能性がある。従来のプラズモンセンサは、場の増強により感度の向上を実現していたが、ここで提案の手法は物質により劇的に変化する金属表面局在電場の変化を捉えるもので、金属表面近傍、あるいは金属開口内部に配する微量物質(試料)による局在電場の分光特性の変化を高感度に観察するシステムの開発が鍵となる。局在電場(いわゆる近接場)を伝搬光に変換し、例えば MHA の透過ピーク周波数の変化等を観測する手法では、対象物質が微量の場合、背景光が大きく十分な SN 比がとれないが、本手法は試料近傍の局在電場そのものの変化をモニタするため、超高感度化が期待できる。

特に指紋スペクトルが豊富に存在する THz 波(0.1-10 THz)領域で上述のアイデアに基づくセンシングを行うためには、まずこの周波数領域での金属近傍界を計測する手法を開発する必要がある。これまでは THz パルスを用いた手法で試みられていたが、微小変化を計測するためには、単一周波数での測定が可能でかつ高周波数分解能での分光計測にも拡張できる連続 THz 波を用いる技術が適している。

本研究が開始されるまでは、低擾乱に場を計測する手法として電気光学結晶を用いた電界計測の手法がマイクロ波帯、ミリ波帯に置いてすでに開発されていた。当初この技術 THz 波帯へ拡張することを予定していたが、研究開始後にこの技術を利用してみると特に安定性に重大な問題が有ることが判明した。本研究の目的は研究タイトルに有るように、THz 波帯金属表面局在電場の精密な空間分布計測であるため、従来手法の拡張を諦め、この周波数領域で振幅と位相の空間分布を精密に可視化する新しい技術の開発からスタートすることにした。つまり、本研究開始当初は、THz 波帯で電界の振幅と位相の空間分布を精密に可視化する技術は未開拓であった。

## 2. 研究の目的

本研究は、THz 波帯の電磁波を対象に、波長と構造寸法が同程度のいわゆる共鳴領域において特徴的に振る舞う金属周期開口アレイ(図 1)の特性を、その表面に局在する電場の 3 次元イメージングにより実験的に明らかにし、局在電場モニタ型の物質センサへの可能性を模索することを目指していた。その可能性を探るために、これまで未開拓であった THz 波領域において低擾乱で金属近傍電界の振幅と位相の空間分布を計測する新しい手法を構築することを目的としていた。

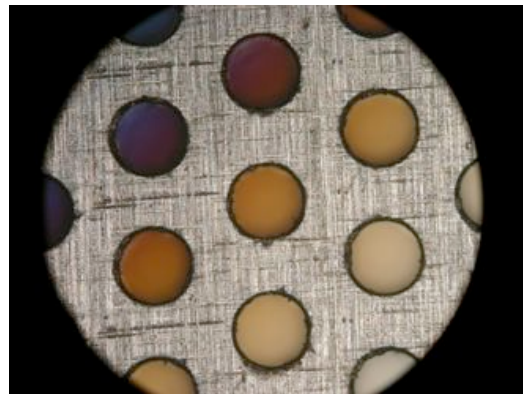


図 1. 金属開口アレイ。

## 3. 研究の方法

研究開始当初は、これ迄に確立されていた電気光学センシング(EO センシング)の手法を THz 波帯へ適用し、目標のシステムを構築する予定であった。ところが実際に研究を開始しシステムを構築してみると、以下の大きな問題が有ることがわかった：(1)振幅と位相の測定精度が低い、(2)安定性が悪い。本研究の第一目的は、局在電場分布の分光学的変化を実験的に観測するシステムの構築であるため、はまずこれらの問題の解決を最優先課題と位置付け、研究を遂行した。

### (1) 自己ヘテロダイン法の開発

THz 波を広帯域にわたって掃引する必要があることから、発生と検出には光技術を利用する。2 台のレーザのビート信号を高速フォトダイオードにより光電変換するシステムを採用するが、THz 波周波数の掃引のためには、2 台のレーザ間を位相同期するよりはフリーランニングとするほうが都合良い。ところが、2 台のフリーランニングレーザ間のビート周波数は不安定であるため、この波源を用いた THz 波位相の精密測定はこれ迄になされていなかった。本研究ではまず、光源の位相雑音がキャンセルされた状態で THz 波の振幅と位相が同時に計測できる新しい手法を提案し、実証した。

(2) 非偏光方式による電気光学センシング手法の開発

被測定電界によりプローブ光に誘起される偏光状態の変化量を検出する従来の手法では、検出感度が外乱によるプローブ光の偏光変動により低下する問題があった。この問題は本研究を遂行する上で大きな問題となる。本研究では、金属デバイスの近傍界を、ファイバ先端に取り付けた E0 センサを空間的に走査させることによって 3次元イメージングを行う。センサを動かす際に、ファイバも同時に動くことになるが、この時に生じる偏波変動が E0 検出の感度変動となり、安定な測定ができない。本研究では、偏光変調を利用しない手法を提案し実証した。検出の原理は、被測定電界とプローブ光との相互作用により生じた変調サイドバンドの光領域でのコヒーレント検出である。

(2) THz 波の可視化

本研究で新たに提案・開発した上記技術を組み合わせることで、安定性と再現性に優れた THz 波帯電界計測システムを構築した。本システムを用いてホーンアンテナから放射される THz 波の可視化を行った。システムの安定性と再現性について評価を行い、金属デバイスの代表でありかつ挙動がよく知られているホーンアンテナの近傍界を測定した。測定データをシミュレーションと比較することで本システムにより低擾乱で電場の振幅と位相の空間分布計測が可能であることを示した。また、本システムの再現性は、システムの SNR により制限されることを示した。優れた再現性は、THz 波の初期位相を変えた複数回の計測を可能とする。これにより、当初目標としていた金属デバイス近傍界の 3次元空間的可視化のみならず、位相発展をも可視化することに成功した。

4. 研究成果

(1) 自己ヘテロダインシステムの開発

図 2 に従来手法であるホモダイン法と本研究により新しく提案した自己ヘテロダイン法のブロック図を示す。両技術共に THz 波の発生・検出は二台のレーザー光のビート信号を用いる。光ビート信号は光電変換 (O/E 変換) により THz 波に変換され (RF 信号)、光 LO とミキシングされる事により検出される。従来技術であるホモダイン法では、RF 信号と LO 信号の周波数は同一であるため、ミキシングの結果ベースバンド信号が直接得られる。この場合、THz 波の振幅と位相の情報は式 (1) に示すように結合された状態となる。

$$s(t) \propto T(\omega) \cos(\omega\tau + \phi(\omega)) \quad (1)$$

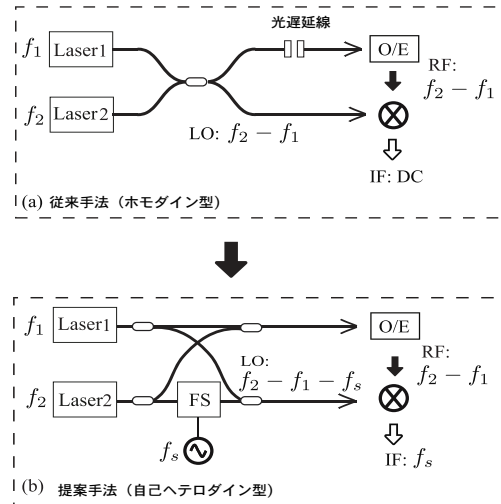


図 2. 従来手法と新たに開発した手法.

ここで  $T(\omega)$  は THz 波の振幅、 $\phi(\omega)$  は THz 波の位相で、 $\tau$  は RF 側と LO 側の遅延時間差である。例えば図中の光遅延線を調整することにより THz 波位相を変化させた時は図 3 に示すようになり、振幅と位相を分離して計測することが出来ない。なお、図 3 は動作原理を確認するためにマイクロ波帯 (15 GHz) で行った実験結果である。このようなホモダイン型の場合、振幅と位相を分離して計測するためには、遅延線を変調して少なくとも 2 つの  $\tau$  でのデータを用いる必要があった。すなわち、3次元空間中の各点での電界計測のためには、各データ取得点 (ピクセル) において遅延線を動かす必要があり、膨大な計測時間を有することになる。

一方、本研究で提案した自己ヘテロダイン法では、ミキシングの結果得られる信号は中間周波数帯域 (IF 信号) となるため、IF 信号のロックイン検出により振幅と位相のデータが同時に取得可能となる。自己ヘテロダイン法では、RF 信号の周波数は光源として用いる二台のレーザーの周波数差:  $f_2 - f_1$  である一方、LO 信号の周波数は図中 FS (frequency shifter) で示されている光周波数シフタにより  $f_s$  だけシフトされた状況となっている。LD2 の周波数はコヒーレントにシフトされているため、RF と LO、両信号の雑音には相関が有る一方で、周波数がシフトしているため、

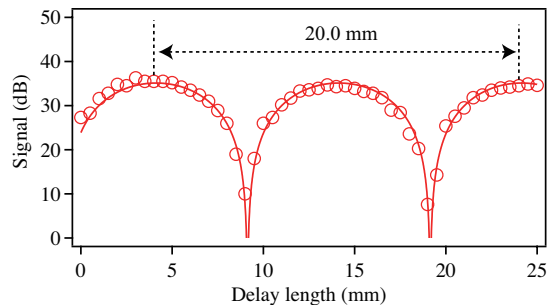


図 3. ホモダイン法で得られる信号.

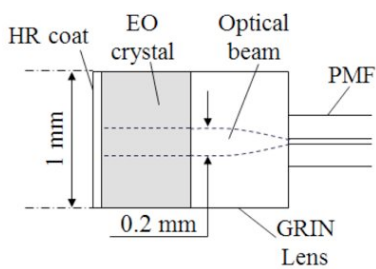


図 4. ファイバ先端に装荷された電界センサの概要.

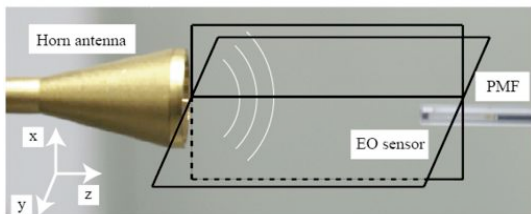


図 5. ホーンアンテナとセンサとの位置関係.

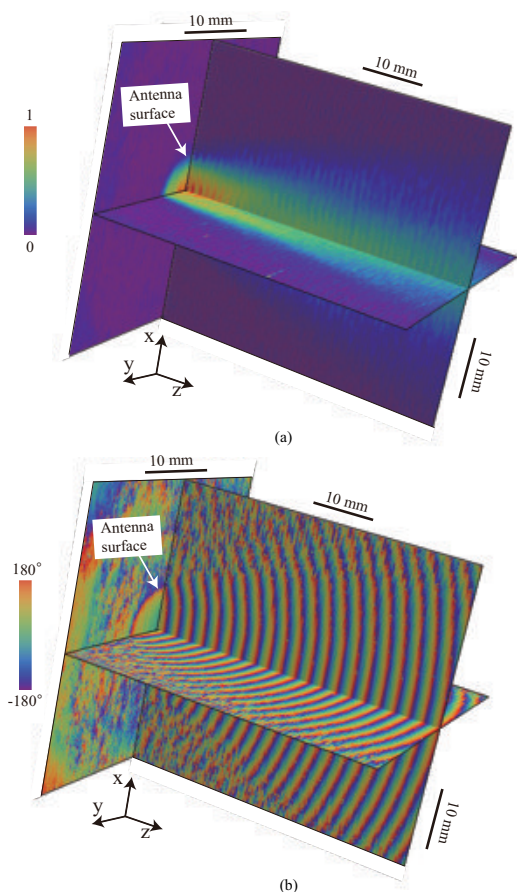


図 6. ホーンアンテナから放射される THz 電磁波の空間分布.

光源の位相雑音がキャンセルされつつ振幅と位相の同時計測が可能となる。この手法により、空間中の各点において遅延線等を変動させる必要がなく、高速にデータの取得が可能となった。

この新しい計測技術にもとづき、ホーンアンテナから放射される THz 電磁波 (125 GHz) の電界分布計測を行った。図 4 にセンサの概

要を示す。偏波保持ファイバ (PMF: polarization maintaining fiber) の先端に GRIN レンズを介して電気光学結晶 (ZnTe) が装荷されている。ZnTe 結晶の表面は、 $1.55 \mu\text{m}$  プロブ光を反射させる高反射膜が蒸着されており、反射光は再び GRIN レンズを介して PMF へ結合する構成となっている。

図 5 にアンテナとセンサとの位置関係を、図 6 にホーンアンテナから放射された THz 電磁波の電界分布をそれぞれ示す。図に示すように本技術により、THz 波電磁波の空間分布の可視化に成功したが、実はこのデータは、電界センサではなく、アンテナそのものを空間的に移動させることで得られたものである。これは、従来手法である偏光変調方式に基づく電界検出の手法を利用しており、プローブ光の偏光状態に検出感度が敏感に変化する問題があったためである。この問題は、次に述べる非偏光方式による電気光学センシング手法の開発により解決された。

## (2) 非偏光方式による電気光学センシング手法の開発

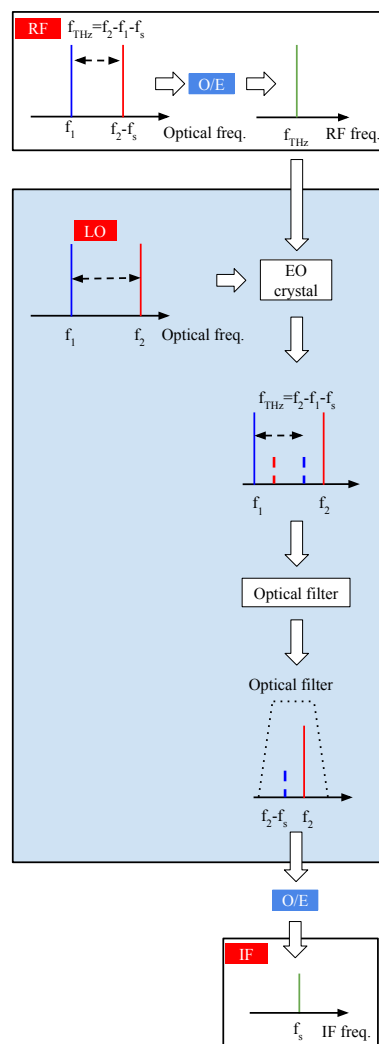


図 7. 非偏光方式による電界センシングの原理



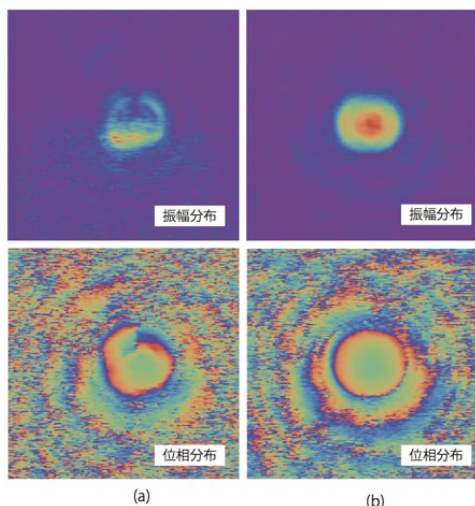
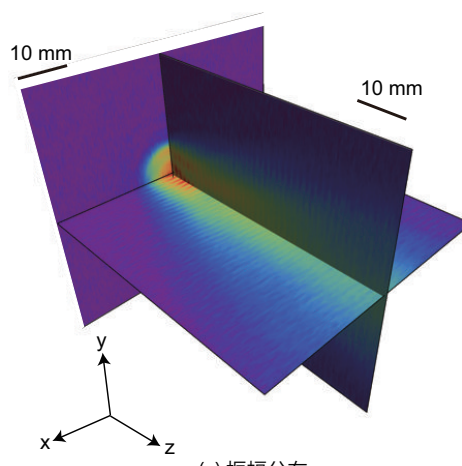


図 8. (a) 従来手法（偏波変調方式）と (b) 新方式との比較.

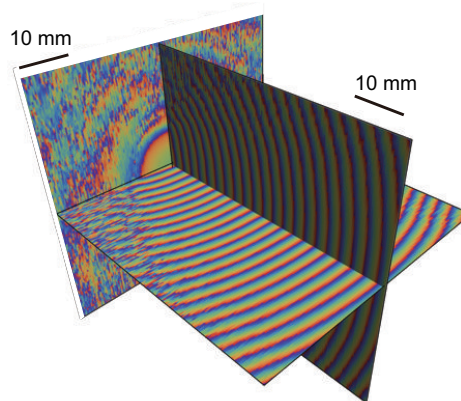
図 7 に新しく提案した非偏光方式による電気光学センシングの原理図を示す。本手法は、被検出電界によって電気光学結晶中でプローブ光に生成された変調サイドバンドの光領域でのコヒーレント検出が原理である。図に示すように RF 周波数が  $f_2 - f_1 - f_s$  である一方、プローブ光は  $f_2$  と  $f_1$  の 2 つの周波数の光から構成されている。電気光学結晶中での相互作用により、それぞれの光キャリアには変調サイドバンドが生成される。図に示すように、光フィルタを用いることで、光キャリアと変調サイドバンドの組の一つを抜き出し、低速フォトダイオードによりコヒーレント受信すると、THz 波信号は IF 信号に下方変換されることとなる。この手法では、プローブ光の偏波変調を用いないため、偏波保持ファイバの slow 軸に偏波を合わせることで、感度変動の無い電界センシングが可能となる。

図 8 に、ホーンアンテナ近傍界を従来方式の偏波変調方式と本研究により提案した新方式で可視化した例を示す。本可視化は、センサ装荷ファイバを動かすことによって得ている。図 8(a) に示すように、従来方式では、センサ装荷ファイバを動かすことにより偏波が変動し、それに伴い感度が変動することで像がゆがんでいることがわかる。一方、本研究により新たに開発された手法に基づけば、センサ装荷ファイバを動かしても感度変動等は生じず、適正な像が得られた。

図 9 に本手法により得られたホーンアンテナから放射される電場の空間分布を示す。図 6 の時とは異なり、本結果はセンサ装荷ファイバを空間的に動かすことによって得ている。THz 波帯において振幅と位相の空間分布を精密に計測する技術の開発に成功した。



(a) 振幅分布



(b) 位相分布

図 9. ホーンアンテナから放射される THz 電磁波の空間分布. センサ装荷ファイバを動かすことによって得た。

### (3) 金属開口近傍界の観測

構築したシステムを THz 波帯金属表面局在電場の 3 次元分光イメージングへ適用した。図 10 に MHA 近傍界の振幅分布を、図 11 に位相分布を示す。座標系は図 5 に示したものと同一で、測定範囲はそれぞれ  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  である。なお、THz 波の電場の振動方向は Y 軸でその方向の電場を可視化した。MHA の格子形状は図 1 に示したカゴメ格子である。図 10 に示されるように、120 GHz に対して 6 GHz、つまり 5% の周波数変化に対して近傍界の形状は劇的に変化していることがわかる。特に振幅分布よりも位相分布でモニタしたほうが、感度が高いことがわかる。129.5 GHz は MHA の共鳴周波数 (120 GHz) から大きく離調しているため、透過率が小さいことから、この領域における特性変化を遠方界観測から抽出することは SN 比の観点からも難しいが、本手法のように近接場観察をすることにより、場の状態変化を高感度に計測することが可能であることが示された。本実験は MHA の近傍界が励起 THz 波の周波数に強く依存す

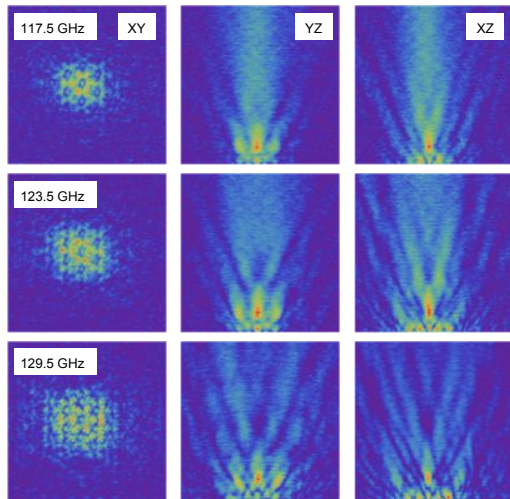


図 10. MHA 近傍界の振幅分布

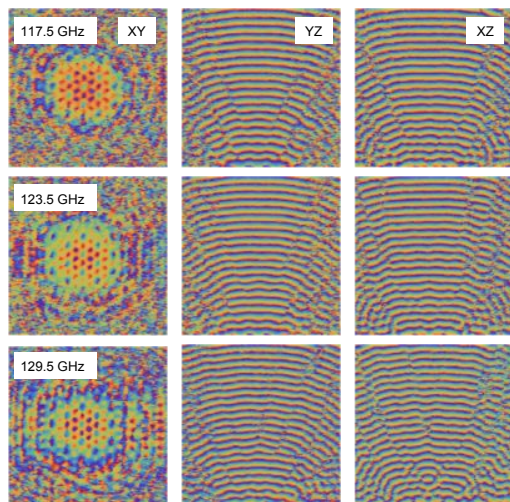


図 11. MHA 近傍界の位相分布

ることを実験的に示しているが、MHA 近傍に物質が付着すると共鳴周波数がシフトするため、同様な効果が期待できる。

#### 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 4 件)

- ① S. Hisatake and T. Nagatsuma, "Nonpolarimetric Technique for Homodyne-type Electrooptic Field Detection," Appl. Phys. Express, vol. 5, 012701 (3 pages) (2012) 査読有.
- ② S. Hisatake et al., "Phase-Sensitive Terahertz Self-Heterodyne System Based on Photodiode and Low-Temperature-Grown GaAs Photoconductor at 1.55  $\mu\text{m}$ ," IEEE Sensors Journal, vol. 13, pp. 31-36 (2013) 査読有.
- ③ S. Hisatake and T. Nagatsuma, "Continuous-wave terahertz field imaging based on photonics-based self-heterodyne electrooptic detection," Opt. Lett., vol. 38, No. 13, pp.

2307-2310 (2013) 査読有.

- ④ 永妻忠夫, 久武信太郎, "電気光学効果を利用した電磁界計測技術の動向," 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J97-B No.3 pp.243-252, (2014) 査読有.

[学会発表] (計 6 件)

- ① S. Hisatake et al., "Electric Field Visualization System for Antenna Characterization at Terahertz Frequency Based on a Nonpolarimetric Self-heterodyne EO Technique," 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium, to be presented.
- ② S. Hisatake et al., "Terahertz Electric Field Mapping Based on All-optical Self-heterodyne Electrooptic Sensing," Asia-Pacific Microwave Photonics Conference 2013, TuC-2 (2013).
- ③ S. Hisatake et al., "Phase-sensitive terahertz Self-heterodyne System based on Photonic Techniques," 2012 IEEE International Topical Meeting on IEEE Microwave Photonics (MWP 2012) (Netherlands) (2012).
- ④ S. Hisatake and T. Nagatsuma, "Homodyne Detection of Microwaves Based on Non-polarimetric Electrooptic Technique," Asia-Pacific Microwave Photonics Conference 2012, FB-2, Kyoto (2012/4/27).
- ⑤ S. Hisatake et al., "Terahertz Frequency-domain Spectrometer Based on Photodiode and Low-temperature-grown GaAs Photoconductor at 1.55  $\mu\text{m}$ ," Asia-Pacific Microwave Photonics Conference 2012, ThA-3, Kyoto (2012).
- ⑥ S. Hisatake et al., "Homodyne Detection of Microwaves Using Low-Temperature-Grown GaAs at 1.55  $\mu\text{m}$ ," 2011 IEEE International Topical Meeting on IEEE Microwave Photonics (MWP 2011) (Singapore).

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/shintarohisatake/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

久武 信太郎 (HISATAKE, Shintaro)  
研究者番号 : 20362642

##### (2) 研究分担者

高原 淳一 (TAKAHAR, Junichi)  
研究者番号 : 90273606