

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286060

研究課題名(和文) 光励起半導体表面プラズマ移動境界における電磁波散乱による周波数変換法の研究

研究課題名(英文) Study on frequency conversion utilizing electromagnetic wave scattering from a moving boundary of electron-hole plasma optically generated on a semiconductor surface

研究代表者

ベイ ジョンソク (BAE, Jongsuck)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20165525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：GaAs基板上に製作されたスロット線路上を伝搬する周波数90GHzから100GHzのミリ波を、相対論的速度で移動する光励起半導体プラズマ境界で反射させ、ドップラー効果により0.3THz帯のテラヘルツ波へ、最大周波数増倍率4.2で周波数変換することに成功した。一方、その出力振幅は理論的な値より一桁以上小さく、その原因究明が今後の課題となった。また、本研究課題を通して、金属導波管を用いた周期的静電場-THz波変換法を新たに提案し、その動作原理の実験的に検証し、中心周波数が0.2THzから0.6THzまでの周期的THz波発生に成功した。

研究成果の概要(英文)：Frequency up-conversion from millimeter waves of frequencies between 90-100 GHz to 0.3 THz-band terahertz waves through the Doppler effect have been observed experimentally using a slot transmission line on an optically excited GaAs substrate. The maximum frequency up-conversion ratio was 4.2. The measured amplitudes of the terahertz waves, however, have been lower than one tenth compared to theoretical predictions. The cause of that is still under investigation. In this research project, new conversion method from periodic static fields to terahertz waves using a metal waveguide as a transmission line has been proposed and experimentally demonstrated. Using the conversion method, periodic terahertz waves at frequencies between 0.2-0.6 THz have been successfully generated.

研究分野：工学

キーワード：光エレクトロニクス テラヘルツ発生 ドップラー効果

### 1. 研究開始当初の背景

ドップラー効果による周波数変換法は、原理的に高効率、高出力、広帯域特性を有しており、ほぼ理想的な方式である。この周波数変換原理は、自由電子レーザーといった大規模電子ビーム装置で利用されている。一方、このドップラー効果は、電磁波散乱媒質自体は静止し、その境界面のみ移動しても同様に起きることは1960年代より理論的に示されている。1995年、米国のMu等は、半導体基板上の光励起高密度表面プラズマ境界を利用する新たな方法を提案した。しかし、その後、他所を含め初期提案以上の研究報告が無かったため、この方式に関する研究は、実験はもちろん理論的にも皆無に近い状況にあった。我々は、相対論的速度で移動する半導体プラズマ境界を用い、2009年にマイクロ波からミリ波への周波数増倍に成功し、本方式による周波数変換が可能であることを実証している。

### 2. 研究の目的

本研究は、相対論的速度で移動する光励起半導体表面プラズマ(電子-正孔ペア)境界における電磁波散乱現象をテラヘルツ(THz)帯で実験的に詳細に調べ、理論との照合を通して、周波数変化を伴う電磁波散乱の基礎メカニズムを明らかにするものである。

### 3. 研究の方法

(1) 先ず、GaAs周波数変換回路、入出力用導波管回路、レーザーを含む光学系の設計と製作、高出力ミリ波発振器の開発、そしてそれら基礎特性評価を行う。

(2) 次に、周波数変換実験を集中的に実施する。その内容は、2種類の高周波線路(コプレーナ・ストリップ線路およびスロット線路)に対し、プラズマ移動境界速度(レーザー波面傾斜角度) - 周波数増倍率、プラズマ密度(レーザー照射エネルギー) - 反射波および透過波振幅の時間変化とその平均電力の測定である。この結果に基づき、理論の正当性を立証し、プラズマ移動境界における電磁波散乱機構を明らかにする。

(3) 上の結果に基づき、GaAs周波数変換回路を含む装置の最適化を実施する。

### 4. 研究成果

(1) 周波数変換回路となるGaAsスロット線路およびストリップ線路と透過型および反射型の2種類の入出力用導波管回路の設計、製作を行い、その基礎特性評価を完了した。

図1は、GaAs基板上に製作したスロット線路の写真である。線路間隙幅 $17\mu\text{m}$ 、幅 $0.7\text{mm}$ 、長さ $6\text{mm}$ 、厚さは、可能な限り伝搬損失を減らすため約 $45\mu\text{m}$ まで薄く製作した。

図1のGaAs線路へのミリ波およびTHz波

の入出力回路として、ミリ波を透過型で用いるものと反射型で用いるもの、2種類をそれぞれ設計・製作した。

図2は、反射型導波管回路にGaAsスロット線路を装着し、スロット線路部に直流電圧を印加し、THz時間領域分光法(THz-TDS)を用いてTHz波伝搬特性を測定した結果の一例である。図2(a)が時間軸でのTHz波波形、(b)がそのフーリエ変換した結果である。この一連の実験を通して、スロット線路でのTHz波の伝搬相対速度が約0.43、減衰特性が周波数 $0.6\text{THz}$ にて $5.3\text{dB/mm}$ となることが分かった。同様の実験を他の回路についても行い、その基本特性を明らかにした。

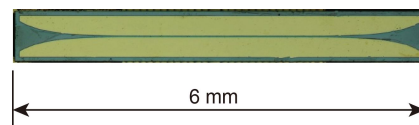
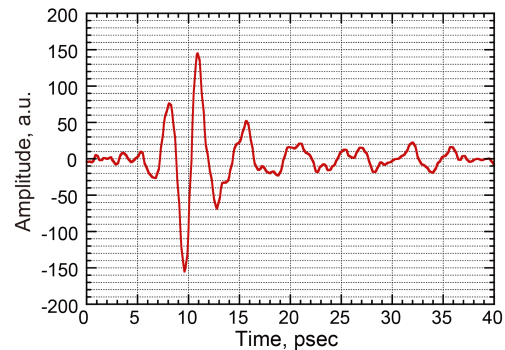
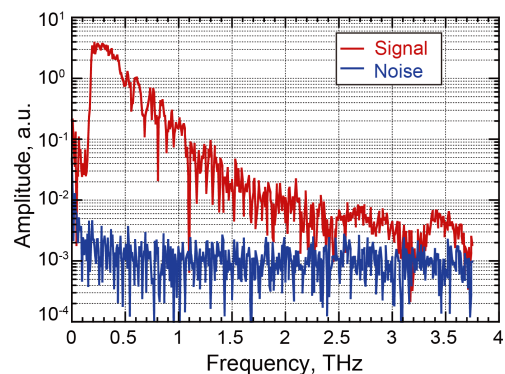


図1 製作したGaAsスロット線路の写真



(a) 時間波形



(b) 周波数分布

図2 GaAsスロット線路を装着した反射型導波管回路のTHz特性

(2) ミリ波帯ガンダイオード発振器の製作を行い、 $90\text{GHz}$ から約 $100\text{GHz}$ で発振動作し、最大出力 $80\text{mW}$ を持つ高出力ミリ波入力源の開発を完了した。

(3) 周波数変換回路の基礎特性評価結果に基づき、実際の実験条件を考慮し、周波数変換動作の理論解析モデルを構築し、変換効率を理論的に計算した。その結果、GaAs線路上での周波数変換効率が出力周波数 $0.3\text{THz}$ で

32%、1THz で 13% なるとの知見を得た。

(4) ミリ波から周波数増倍された THz 波を測定するため、電圧感度 2500V/W の 0.3THz 帯高感度 InP ショットキ・バリア・ダイオード (SBD) 検出器を新たに開発した。

光伝導アンテナを THz 波検出器として用いる THz-TDS によりミリ波 - THz 波変換実験を実施した。しかし、照射レーザーパルスと入力ミリ波との精密な位相同期が、使用装置の性能の制限から十分とれず、有意な結果が得られなかった。

この問題を解決するため、上記同期関係が不要な THz 検出器として、新たに 0.3THz 帯 SBD 検出器の開発を行った。図 3 は、検出器に使用した InP-SBD チップの写真である。この SBD は、SBD がそれぞれ取り付けられた 2 つのスロットアンテナを、縦幅 1mm、横幅 2mm の InP 基板上に並べた構造を持ち、THz 波の水平 (x-pol) および垂直偏波 (y-pol) 成分を独立に検出できるように製作した。図 4 に測定した検出器の周波数に依存した感度特性を示す。図より分かるとおり、約 0.29THz に最大感度 ( $\sim 2500\text{V/W}$ ) を持ち、その周波数帯域幅は約 0.03THz である。この狭帯域特性は、THz 波出力の周波数を確認するために必要なものである。

(5) 製作した SBD 検出器を用いた周波数変換実験を実施し、90GHz ~ 100GHz のミリ波から 0.3THz 帯の THz 波への周波数変換に成功した。

図 5 に、実験システムの概略を示す。波面が傾斜したフェムト秒 Ti: サファイヤレーザー光を、製作した GaAs スロット線路に照射し、相対論的速度で移動する電子 - 正孔プラズマ境界を生成する。この境界面でミリ波を反射させることで、ドップラー効果によりミリ波から THz 波へと周波数変換する。実験では、THz 波の出力と同時にミリ波自体の反射電力も測定している。

図 6 に、周波数依存した SBD 検出器出力の測定結果を示す。は、周波数増倍率  $G$  が 3 となるようにレーザー波面の傾斜角度を固定し、ミリ波の周波数を変えた場合の SBD 検出器の出力である。は、ミリ波の周波数  $f_{in}$  を 95.2GHz に固定し、レーザー波面の傾斜角度を変えて、 $G$  を変化させて測定した結果である。 $G$  を変えて測定した結果は、図 4 と比べると分かるとおり、SBD 検出器の感度特性にほぼ一致している。 $f_{in}$  を変えた実験結果が、より狭帯域となっているのは、ガンダイオード発振器の発振周波数 - 出力電力特性のためである。この結果より、95.2GHz のミリ波が、周波数増倍率  $G$  として 2.5 倍から 4.2 倍の範囲で THz 波へと変換されていることが分かった。

(6) ミリ波 - THz 波変換実験を通して以下の知見を得た。

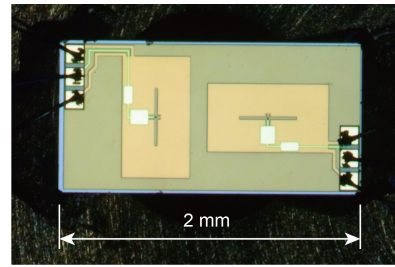


図 3 InP-SBD チップの写真

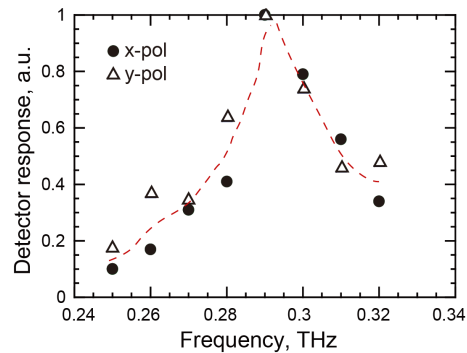


図 4 製作した SBD 検出器の周波数特性

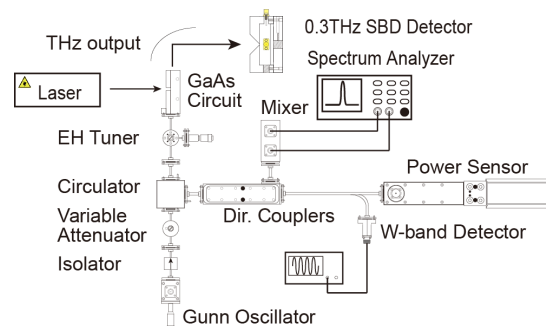


図 5 ミリ波 - THz 波変換の実験システム図

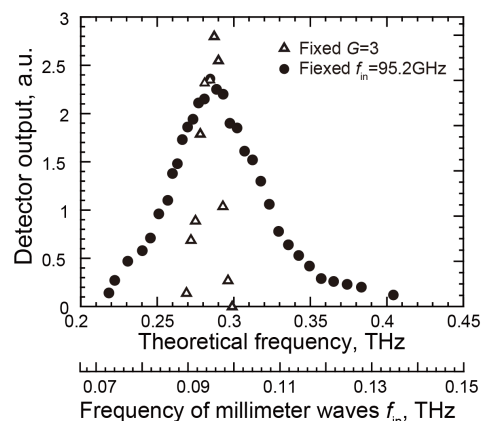


図 6 ミリ波 - THz 波変換の実験結果

照射レーザーの波面傾斜角度と周波数増倍率の関係は、ほぼ理論と一致した。

THz 波出力は、GaAs 線路への最大入力電力 50mW の範囲において飽和等はなく、入射

ミリ波電力に比例し増加する。

照射レーザーパワー密度に対する THz 波出力は、約  $0.67\text{W}/\text{mm}^2$  より僅かに飽和傾向が見られるが、 $1.3\text{W}/\text{mm}^2$  以上でも単調に増加する。

ミリ波入力パワーが  $50\text{mW}$  のときに測定された SBD 検出器の出力電圧より THz 波出力電力を見積もった結果、約  $37\mu\text{W}$  となった。これは、理論的に予想された周波数変換効率に比較し、GaAs 線路における伝搬損失を考慮しても約 1 桁以上低い値であった。この大きな差異の原因として、高密度レーザー光照射による光励起キャリアの移動度の低下等が考えられる。しかし明確な理由究明には、より詳細な実験が必要であり、今後の課題として残された。

波面傾斜のないレーザー光を照射し、GaAs 線路間に直流バイアス電圧をかけ、かつミリ波を入力した時のみ、SBD 検出器より有意な出力が得られることを発見した。これは、GaAs 線路の金属 - 半導体間のダイオード構造に基づく非線形電圧 - 電流特性もしくは Gunn 効果に基づく周波数逡倍動作によるものと推論された。この効果は、従来にはない新たな THz 波発生原理となりえることから、今後、更に研究を進めることとした。

$0.3\text{THz}$  以上の広い THz 周波数域での、出力 THz 波パルスの時間変化をも含めた周波数変換動作を測定するには、THz-TDS による測定が必要となる。このためには、ミリ波発振器と励起レーザーパルスとの精密な位相同期をとるため、高安定レーザー源が必要不可欠である。

(7) 入力波としてミリ波に替えて周期的静電場を用いる THz 波発生器構造を新たに提案し、その動作原理を実験的に検証することに成功した。

図 7 に提案した周期的静電場 - THz 波変換回路の動作原理図を示す。GaAs 基板上に周期的に配置された光伝導アンテナ（ボウタイアンテナ）に、直流バイアスを印加し、そこに波面傾斜したフェムト秒レーザー光を照射することで、アンテナから THz 波パルスを放射する。この放射された THz 波パルスを金属導波管内で合成することで、アンテナ周期とレーザーの波面傾斜角度によって決定される特定の周波数を持つ周期的かつ高出力な THz 波発生が可能になる。

この THz 波発生器は、(1) で述べた GaAs 線路の大きな伝搬損失が、主に線路からの放射損失であることに着目し、この放射損失そのものを THz 波出力として用いる方式の検討中に着想を得て提案したものである。

#### 周期的静電場 - THz 波発生器の動作原理

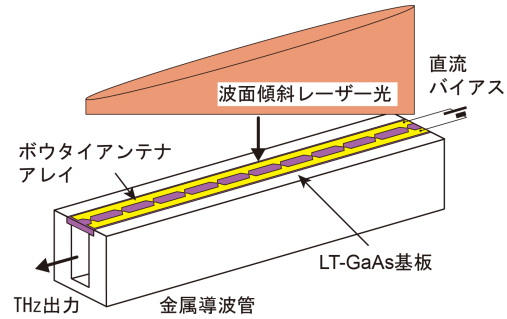
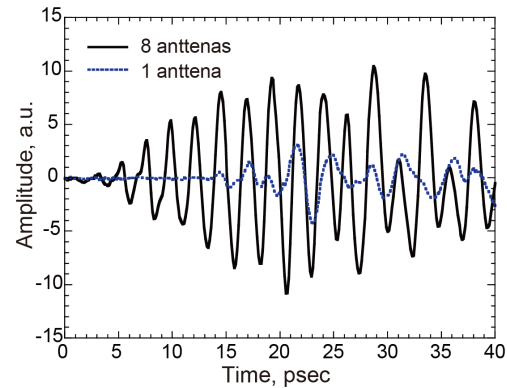
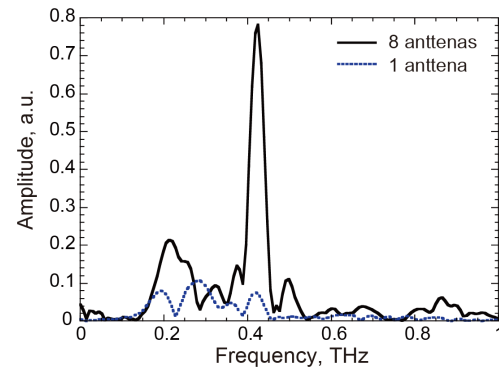


図 7 周期的静電場 - THz 波変換器



(a) 時間波形



(b) 周波数分布

図 8 周期的静電場 - THz 波変換器出力の測定結果

検証実験に実施し、出力周波数  $0.2\text{THz}$  から  $0.6\text{THz}$  の THz 波発生に成功した。

アンテナ周期  $0.56\text{mm}$  で 8 個のアンテナアレイと、幅  $0.43\text{mm}$ 、高さ  $0.86\text{mm}$  の J バンド金属導波管を用い、アンテナに直流バイアス電圧  $40\text{V}$  をかけ、THz 波出力を測定した。図 8 がその結果の一例である。図 8 (a) が時間波形、(b) がその周波数分布である。比較のため、アレイ中心に配置されたアンテナ 1 個のみにレーザー光を照射したときの結果を合わせて示している。図より、 $0.42\text{THz}$  に明確なピークが観測されていることが分かる。

次に、照射レーザーの波面角度を変えてその出力周波数を測定した結果を、図 9 に示す。横軸は、レーザーの波面傾斜角で決定されるアンテナアレイ上での等価的な光の相対伝搬速度を表している。図より、測定した出力

周波数が、理論とよく一致していることが分かる。

最後に、THz 波の周波数に対する出力振幅を図 10 に示す。この結果より、THz 波出力振幅が、0.35THz 近傍から急激に減少している。これは、実験で使用した J バンド導波管の基本モードでの動作周波数上限とほぼ一致しており、導波管中で多モード動作となり出力が減少したものと考えられる。

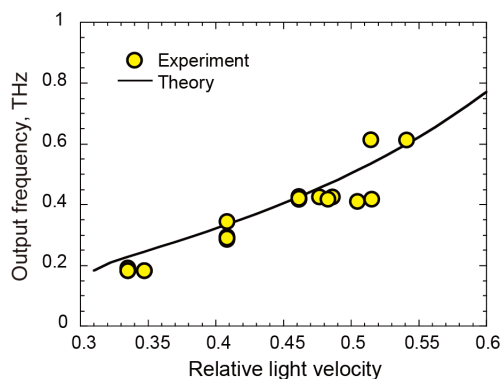


図 9 測定した出力周波数と理論との比較

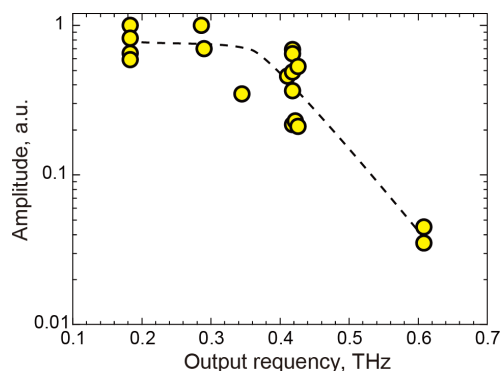


図 10 測定した THz 波出力振幅の周波数依存性

#### (8) 今後の展望

本研究を通して、相対論的速度で移動する光励起半導体プラズマ境界での反射により、入射ミリ波がドップラー効果により THz 波へと変換可能であることを実験的に証明できた。一方、その振幅は理論的な値より一桁以上小さく、その原因究明が今後の課題として残された。また、本研究において製作した THz 帯 GaAs 伝送線路の減衰特性評価結果に対する考察過程で着想した金属導波管を用いた周期的静電場 - THz 波変換方式の動作原理の実験的検証に成功し、0.6THz までの周期的 THz 波発生に成功した。今後、更なる高出力、高周波数化を目指し、研究を進める予定である。

#### < 引用文献 >

L. Mu, W. R. Donaldson, J. C. Adams, and R. A. Falk、Electromagnetic wave interaction with laser-induced plasma in GaAs, Proc. SPIE 2343, 1995, 107

J. Bae, Y. J. Xian, S. Yamada, and R. Ishikawa、Doppler frequency up conversion of electromagnetic waves in a slotline on an optically excited silicon substrate, Appl. Phys. Lett., vol. 94, no. 9, 2009, pp. 091120\_1-3

J. Bae and K. Mizuno、Frequency Conversion Using a Moving Plasma Front Generated Optically in Transmission Lines, 2003 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., vol. 2, 2003, pp. 1359-1362

#### 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 13件)

T. Nozokido, M. Ishino, J. Bae, Contrast of near-field scanning millimeter-wave microscopy using a metal slit probe, Proceedings of the 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz2016 (Copenhagen, Denmark)、査無、Paper No. M5P.10.03 (2 pages), 2016

A. Saito, K. Nakajima, K. Hayashi, Y. Ogawa, Y. Okuyama, D. Oda, S. Ariyoshi, H. Yamada, T. Taino, C. Otani, J. Bae, S. Ohshima, Relationship between Loaded Quality Factor and Responsivity for NbN-Based MKIDs using Dual-Function Spiral Strip, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有、Vol. 25、2015、2401204\_1-4、10.1109/TASC.2014.2367459

杉村佑一、有吉誠一郎、裴鐘石、シリコン基板上的高周波平面線路におけるマイクロ波の光制御特性、信学技法、査読無、MW2014-50, Vol. 114, No. 111, 2014, 45-50

[学会発表](計 38件)

Motoki Bessho (Jongsuck Bae)、Experimental Demonstration of Conversion from Periodic Static Electric Fields to Terahertz Waves, IEEE Nagoya Chapter Midland Student Express 2017 Spring, 2017年4月29日、名古屋工業大学(愛知県・名古屋市)

伊藤亮祐(バイジョンソク)、周期的静電場 - テラヘルツ波変換法の実験的検証、第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月14日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

伊藤圭介 ( ベイジョンソク ) 金属導波管を用いた一次元光伝導アンテナアレイの信号合成、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 14 日、パシフィコ横浜 ( 神奈川県・横浜市 )

伊藤亮祐 ( ベイジョンソク ) 周期的静電場 - テラヘルツ変換用金属導波管のテラヘルツ波伝搬特性、第 63 回応用物理学会春季学術講演会 20p-H135-15、2016 年 3 月 20 日、東京工業大学 ( 東京都・目黒区 )

Xiongbin Yu ( Jongsuck Bae ) Transmission characteristics of a terahertz-wave generation circuit using the Doppler effect at millimeter wave frequencies、IEEE Nagoya Chapter Midland Student Express 2015 Autumn、2015 年 12 月 4 日、金沢大学 ( 石川県・金沢市 )

伊藤圭介 ( ベイジョンソク ) 金属導波管を用いた交替静電場 - テラヘルツ波変換器の出力特性、赤外線学会第 25 回研究発表会 2015-IR-05、2015 年 10 月 23 日、中部大学 ( 愛知県・春日井市 )

兪熊斌 ( ベイジョンソク ) ドップラー効果型周波数変換法によるテラヘルツ波発生回路の理論設計、第 76 回応用物理学会秋季学術講演 16p-2J-1、2015 年 9 月 16 日、名古屋国際会議場 ( 愛知県・名古屋市 )

伊藤圭介 ( ベイジョンソク ) 高効率静電場-テラヘルツ波変換回路の理論的検討、第 76 回応用物理学会秋季学術講演 16p-2J-3、2015 年 9 月 16 日、名古屋国際会議場 ( 愛知県・名古屋市 )

S. Ariyoshi、Optical Evaluation of Microwave Kinetic Inductance Detectors for Fourier Transform Terahertz Spectroscopy、12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2015)、2015 年 9 月 6 日、Lyon ( France )

S. Ariyoshi ( J. Bae ) Two-dimensional Microwave Kinetic Inductance Detector array for an Imaging Terahertz Spectrometer、2014 Korea-Japan Microwave Workshop (KJMW2014) TH\_4A\_1、2014 年 12 月 5 日、Suwon ( Korea )

12/4-5

M. Sato ( J. Bae ) Terahertz Frozen Wave Generator Using a Photo-excited Moving Plasma Boundary on a GaAs Coplanar Stripline、2014 Korea-Japan Microwave Workshop (KJMW2014) TH\_4A\_4、2014 年 12

月 5 日、Suwon ( Korea )

[ 図書 ] ( 計 0 件 )

[ 産業財産権 ]

出願状況 ( 計 0 件 )

取得状況 ( 計 0 件 )

[ その他 ]

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

ベイ ジョンソク ( BAE, Jongsuck )  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 2 0 1 6 5 5 2 5

### (2) 研究分担者

有吉 誠一郎 ( ARIYOSHI, Seiichiro )  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号 : 2 0 3 9 1 8 4 9

荻戸 立夫 ( NOZOKIDO, Tatsuo )  
富山大学・理工学研究部 ( 工学 ) ・准教授  
研究者番号 : 0 0 2 6 1 1 4 9