

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560381

研究課題名(和文) 固有ジョセフソン接合を用いた完全薄膜型テラヘルツ波発振素子の製作

研究課題名(英文) Fabrication of thin-film-type terahertz-wave oscillators using intrinsic Josephson junctions

研究代表者

立木 隆 (Tachiki, Takashi)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・電気情報学群・准教授)

研究者番号：60531796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 0円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導体Bi-2212の固有ジョセフソン接合を用いた薄膜型テラヘルツ波発振素子の実現を目指し、以下の結果を得た。平坦性の高い酸化セリウムバッファ層の作製を通して有機金属分解法による大粒径Bi-2212薄膜作製のための知見が得られた。次に結合サイン・ゴードン方程式を用いた解析により薄膜アンテナと結合する上で重要な素子の高周波インピーダンスが求められた。また、新たに構築したテラヘルツ波測定システムにより発振素子の放射電力と発振周波数のバイアス依存性を測定し、動作状態の解析に重要な共振モードを同定した。以上のような要素技術を組み合わせることにより、高出力な薄膜型発振素子の実現が期待される。

研究成果の概要(英文)：To realize thin-film-type terahertz (THz)-wave oscillators using high-temperature superconducting Bi-2212 intrinsic Josephson junctions, key technologies were developed as follows: Cerium dioxide buffer layers with a smooth surface were deposited to increase grain sizes in Bi-2212 thin films fabricated by metal-organic decomposition. A junction impedance for designing antenna-coupled oscillators was calculated from an analytical solution of the coupled sine-Gordon equation. Moreover, resonant modes in a Bi-2212 mesa were estimated from bias dependencies of the radiation power and frequency measured using a THz Fourier-transform spectrometer. These results are useful for fabricating the thin-film THz-wave oscillators for high power generation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：酸化物高温超伝導体 ジョセフソン接合 テラヘルツ波

1. 研究開始当初の背景

最近、テラヘルツ技術は、目覚ましい発展を遂げているものの、多くの分野で有用な 1 THz 前後の発振周波数をもつ信号源は、ほとんどなく、その実現が望まれている。銅酸化物超伝導体に内在する固有ジョセフソン接合は、この周波数帯において、コヒーレントかつ高出力で周波数可変な連続波を放射できる発振素子として注目されている。

筆者らは、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) 固有ジョセフソン接合に対してマイクロ波励起や直流電流バイアスにより、接合内にプラズマのキャビティ共振が起こることを実験と理論で示し、テラヘルツ波の放射特性を数値シミュレーションにより評価してきた。そして、2007 年に米国と日本の共同研究により、Bi-2212 単結晶のメサ構造への電流バイアス下で、0.3 ~ 0.85 THz の周波数帯のほぼ単一周波数で従来の Bi-2212 発振素子よりも 2 桁以上強い放射が得られた。

この報告以降、同素子の放射パターンや周波数スペクトルなどが盛んに調べられているが、これらはすべてバルク体の Bi-2212 単結晶が用いられている。将来の実用化を考えると、Bi-2212 の薄膜化技術、デバイス構造の検討、デバイス製作およびその評価が重要である。

2. 研究の目的

本研究では、良質な接合特性を有する Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いた完全薄膜型テラヘルツ波発振素子の実現を目指して、以下の要素技術を確認・発展させることを目的とした。

- (1) 有機金属分解(MOD)法による良質で大粒径を有する Bi-2212 超伝導薄膜の作製
- (2) 発振状態の解析とデバイス設計および結合させる薄膜アンテナの設計・試作
- (3) Nb 系ジョセフソン接合を用いたプロトタイプ試作
- (4) Bi-2212 発振素子の製作とその放射特性の評価

3. 研究の方法

(1) MOD 法による Bi-2212 薄膜の作製

先行研究により接合サイズに制限があるものの、MOD 法を用いて成長した Bi-2212 薄膜から方形メサを製作し、発振素子の実現への手がかりを得ている(図 1 参照)。ただし、薄膜の粒径が発振素子の代表的なサイズ (~60 x ~300 x ~1 μm^3) よりも大きい必要がある。薄膜作製においては、Bi-2212 薄膜との格子不整合度の低い CeO_2 バッファ層を MgO 基板との間に導入し、作製条件を検討することにより、Bi-2212 薄膜の大粒径化、厚膜化を行う。

- (2) 発振状態の解析と薄膜アンテナの試作
接合内の発振状態を、結合サイン・ゴード

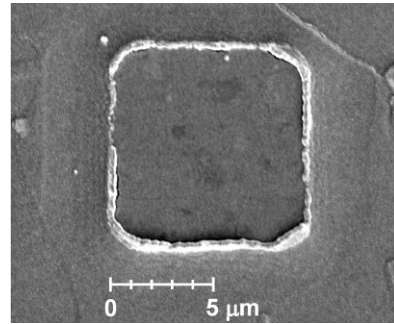


図1 MOD法により作製したBi-2212薄膜のメサ構造のSEM像 Hamanaka et al. IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 168

ン方程式を用いて数値シミュレーションと解析的な手法により検討する。また、外部放射を効率良く行えるよう発振部に結合した薄膜アンテナの特性評価をシミュレーションと実測で行う。

(3) Nb 系ジョセフソン接合の試作

Bi-2212 薄膜の大粒径化には時間を要すると予想されるので、発振素子のプロトタイプを試作するために既存のスパッタ装置を用いて Nb 系ジョセフソン接合を製作する。

(4) 発振素子の製作とその放射特性の評価

図 2 に示すメサ型 Bi-2212 発振素子の製作は、我々がこれまで行ってきたバルク単結晶を用いた素子製作プロセスを元にして行う。また、テラヘルツ波検出に適した干渉計を製作し、既存の極低温シリコンボロメータと組み合わせることにより、放射電力と発振周波数が測定できるシステムを構築する。これにより素子の放射電力等のバイアス依存性や温度依存性を評価する。

以上の結果を(1)~(4)にフィードバックし、より出力が高く、安定に発振できるテラヘルツ波発振素子の実現を目指す。

4. 研究成果

(1) MOD 法による Bi-2212 薄膜の作製

MOD 法により作製する Bi-2212 薄膜の大

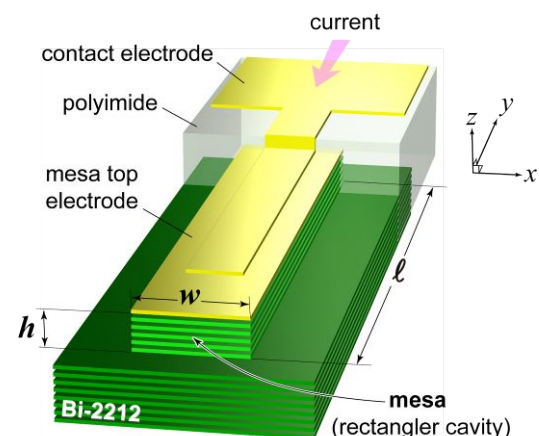


図2 メサ型Bi-2212テラヘルツ波発振素子の概略図

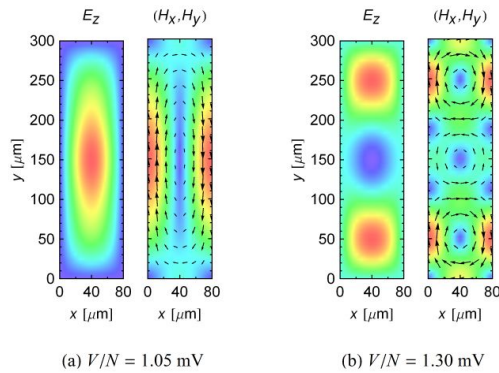


図3 メサ内部の電磁界分布の計算結果

粒径化のために MgO 基板上にバッファ層である CeO₂ 薄膜を電子ビーム蒸着およびポスト熱処理により作製した。得られた CeO₂ 薄膜は膜厚 約 100 nm に対して自乗平均粗さが 1.35 nm とバッファ層に適した平坦性を有していた。今後は CeO₂ 薄膜の高精度な配向制御を行う必要がある。また、MOD 法による Bi-2212 薄膜の更なる大粒径化には、液相成長に近い状態で結晶成長させることが有用と考えられる。

(2) 発振状態の解析と薄膜アンテナの試作

テラヘルツ波発振部つまり Bi-2212 のメサ部において、線形化された結合サイン・ゴードン方程式を用いた簡易的解析法により素子の I-V 特性、電磁界分布、高周波インピーダンスを求めた。とりわけ図 3 の電界、磁界分布が示すように特定のバイアス電圧において明瞭な定在波パターン（同図(a)では TE₁₁₁、(b)では TE₁₃₁ モード）が生じ、バイアス条件についての知見が得られた。

また、発振素子の放射効率を向上させるための薄膜アンテナの一つとして、比較的広帯

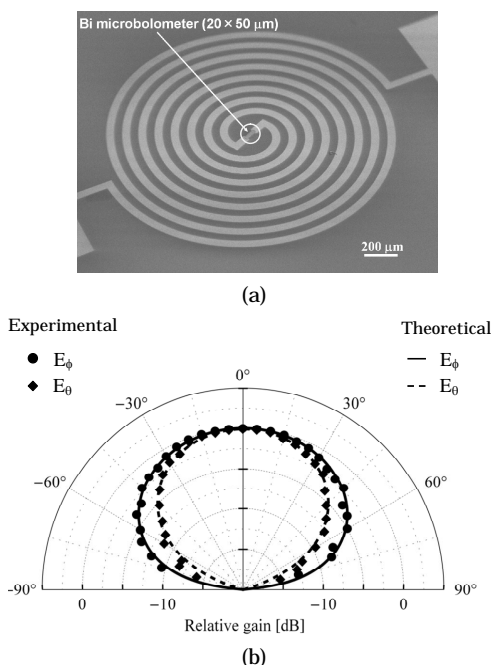


図4 薄膜スパイラルアンテナのSEM像とアンテナパターン

域な周波数特性をもつスパイラルアンテナを選定し、設計・試作した。図 4(a)は石英基板上に製作した Au 薄膜アンテナの SEM 像である。アンテナの外形が約 2 mm、設計帯域が 70 ~ 110 GHz と低いものの、同図(b)のアンテナパターンが数値シミュレーションとほぼ一致することからアンテナ動作が確かめられ、また、上記の広い帯域特性も試作アンテナから確認された。

これらの研究により、発振部のインピーダンス (~1 Ω) と薄膜アンテナの入力インピーダンスが 1 ~ 2 桁違うことから、発振部とアンテナの間に整合器が必要であることが分かった。

(3) Nb 系ジョセフソン接合の試作

発振素子のプロトタイプを試作を目指して Nb 系ジョセフソン接合を製作した。まず、接合に適した 20 nm 程度の極薄の Nb 薄膜を DC マグネトロンスパッタにより作製した。次に Nb 薄膜上に電子ビーム描画および反応性イオンエッチングによりナノブリッジを形成させ、薄膜アンテナとの結合に適した Nb ジョセフソン接合を製作した。この研究を発案した当初は、同接合によるアンテナ結合発振素子の製作を予定していた。しかしながら、製作した Nb ジョセフソン接合は、接合の性質上、アンテナ結合検出素子に適し、そのことはシャピロステップ等の高周波応答が得られたことから示唆された。この接合素子を下記のテラヘルツ波測定システムに組み込むことにより、測定周波数の精度が大幅に向上することが期待できる。

(4) 発振素子の製作とその放射特性の評価

既存の検出素子(低温 Si ボロメータ)および新たに自作したラメラ干渉計により図 5 に示すようなテラヘルツ波測定システムを

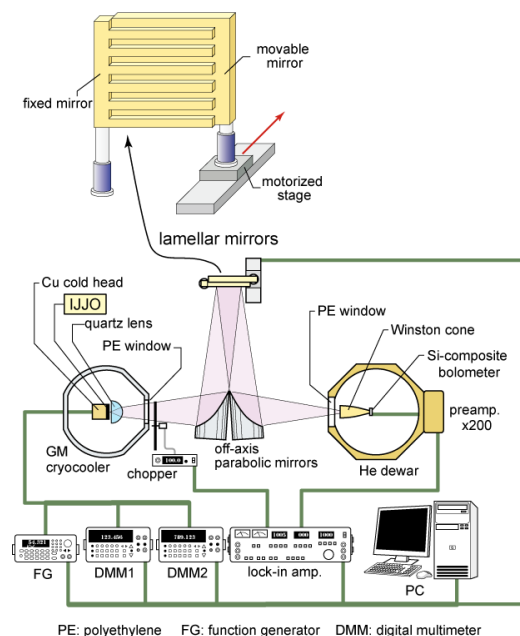
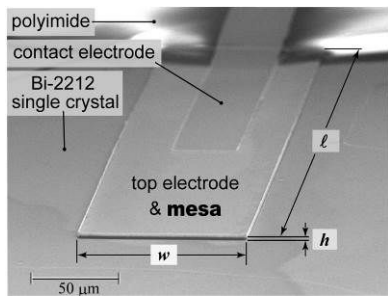
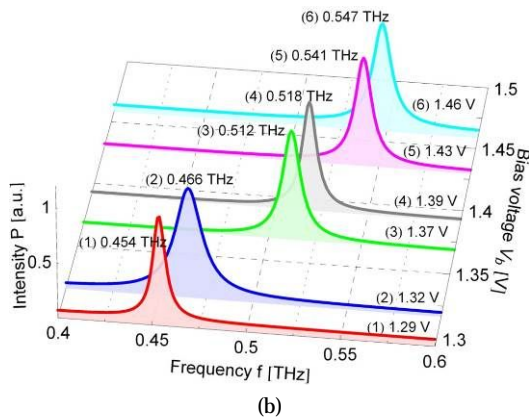


図5 本研究で構築したテラヘルツ波評価システム



(a)



(b)

図6 メサ型Bi-2212発振素子のSEM像と発振周波数のバイアス依存性

構築した。ラメラ干渉計は、素子冷却に使用した GM 冷凍機による機械的振動の影響も少なく、アライメントも比較的容易であるといった利点を持つ。本測定システムは、測定周波数範囲が数 0.2 ~ 1.2 THz、周波数分解能 6 GHz の性能を示す。

本システムの確認も兼ねて薄膜型発振素子の代わりに Bi-2212 バルク単結晶を用いた発振素子を製作し、テラヘルツ波放射特性を評価した。図 6 はメサの寸法が $78 \times 300 \times 2.3 \mu\text{m}^3$ の発振素子の SEM 像および発振周波数のバイアス電圧依存性である。同素子の放射電力は $1.1 \mu\text{W}$ 、発振モードは TE_{111} であった。また、同図(b)よりバイアス電圧に比例して発振周波数が変化することが示された。さらに発振周波数の温度依存性と素子サイズ依存性を測定した。これらを理論的に得られた共振周波数 (420 ~ 970GHz) と比較検討することにより、実際の共振モード (TE_{111} , TE_{121} ,

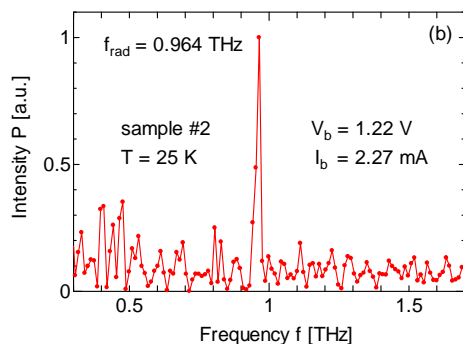


図7 最高発振周波数測定時の周波数スペクトル

TE_{131} モード)を同定することができた。このように発振状態の素子内の共振モードを実験と理論の双方から検討することにより、発振に適切なバイアス範囲と発振周波数帯域に関する知見が得られた。

最後に、メサ寸法が $78 \times 118 \times 1.0 \mu\text{m}^3$ の素子の TE_{131} モードの発振により、これまで報告されている最高発振周波数に近い、0.964 THz のテラヘルツ波放射を本測定システムにより観測した。図 7 は、このことを示す周波数スペクトルである。

以上のように、本研究で得られた要素技術を組み合わせることにより、高出力な完全薄膜型 Bi-2212 発振素子が実現できることが期待される。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

L. N. Son, T. Tachiki, T. Uchida, Y. Yasuoka, Receiving Properties of Thin-Film Spiral Antenna Fabricated on Fused Quartz Substrate Backed by Copper Plate Reflector, IEICE Transactions on Electronics, 査読有, Vol. E-95C, 2012, pp. 936-941.

立木 隆、内田 貴司、固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子のキャビティーモードの計算、電気学会論文誌 A、査読有、Vol.132、2012、pp. 747-752.
L. N. Son, T. Tachiki, T. Uchida, Fabrication and Evaluation of Thin-Film Spiral-Antenna-Coupled VO_x Microbolometer by Metal-Organic Decomposition, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 52, 2013, pp. 046601 1-4.

立木 隆、堅田 寛、内田貴司、Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子の特性評価、日本赤外線学会誌、査読有、Vol. 23、No. 2、2013、pp. 66-72.

T. Tachiki, K. Horiguchi and T. Uchida, Fabrication of Niobium Nanobridge Josephson Junctions, J. Phys.: Conf. Series, 査読有, Vol. 491, 2014, pp. 012157 1-6.

T. Tachiki, H. Katada, T. Uchida, Evaluation of Cavity Modes in Superconducting Intrinsic-Josephson-Junction Oscillators for Terahertz-wave Generation, J. Infrared Milli. Terahz. Waves, 2014, 査読有, Vol. 35, pp. 509-516.

[学会発表](計 2 3 件)

堀口 顕司、立木 隆、内田 貴司、新規平面型ジョセフソン接合製作に向けた Nb 薄膜の作製、第 72 回応用物理学学会学術講演会、2011 年 8 月 31 日、山形大学(山形県)

L. N. Son, T. Tachiki, T. Uchida, Y.

- Yasuoka, Effects of Substrate Thickness on Receiving Properties of Thin-Film Spiral Antenna, The 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011. 10, Houston, USA
- レー・ゴク・ソン、立木 隆、内田 貴司、安岡 義純、100 GHz 帯薄膜スパイラルアンテナの受信特性、日本赤外線学会第 21 回研究発表会、2011 年 10 月 20 日、アクトシティ研修交流センター（静岡県）
- K. Horiguchi, T. Tachiki, T. Uchida, Fabrication of 20-nm-thick Niobium thin films for novel planer Josephson junctions, The 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics, 2011. 10, Yamagata, Japan
- T. Uchida, K. Hamanaka, K. Oho, T. Tachiki, Characterization of Bi-2212 thin films fabricated by metal-organic decomposition, The 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (招待講演), 2011. 10, Yamagata, Japan
- 堅田 寛、李 夢月、袁 潔、李 軍、羽多野 毅、王 華兵、立木 隆、内田 貴司、Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子の製作、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 3 月 16 日、早稲田大学（東京都）
- H. Katada, T. Tachiki, T. Uchida, Fabrication of THz-Wave Oscillator Using Bi-2212 Intrinsic Josephson Junctions, 11th International Symposium on High Temperature Superconductors in High Frequency Fields, 2012. 5, Miyagi, Japan
- T. Uchida, T. Tachiki, Fabrication of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Intrinsic Josephson Junction Stack by Metal-Organic Decomposition, 11th International Symposium on High Temperature Superconductors in High Frequency Fields (招待講演), 2012. 5, Miyagi, Japan
- レー・ゴク・ソン、立木 隆、内田 貴司、MOD 法による薄膜スパイラルアンテナを結合した VO_x マイクロ波ロメータ検出素子の製作、第 73 回応用物理学学会学術講演会、2012 年 09 月 11 日、愛媛大学（愛媛県）
- 堅田 寛、立木 隆、内田 貴司、Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子の周波数評価、第 73 回応用物理学学会学術講演会、2012 年 09 月 13 日、愛媛大学（愛媛県）
- T. Tachiki, H. Katada, T. Uchida, Frequency Measurement for Terahertz-Wave Oscillators Using Intrinsic Josephson Junctions, the 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2012. 9, Wollongong, Australia
- L. N. Son, T. Tachiki, T. Uchida, Fabrication of VO_x Microbolometer Detector Coupled with Thin-Film Spiral Antenna by Metal-Organic Decomposition, the 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2012. 9, Wollongong, Australia
- 堅田 寛、立木 隆、内田 貴司、Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子のキャピティブモード同定、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2012 年 10 月 25 日、機械振興会館（東京都）
- 堅田 寛、立木 隆、内田 貴司、Bi-2212 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波放射の観測、日本赤外線学会研究発表会、2012 年 11 月 01 日、関西大学（大阪府）
- 内田 貴司、レー・ゴク・ソン、立木 隆、薄膜スパイラルアンテナ結合 VO_x ボロメータ素子による電磁波検出、日本赤外線学会研究発表会、2012 年 11 月 02 日、関西大学（大阪府）
- 立木 隆、堅田 寛、内田 貴司、Bi-2212 固有ジョセフソン接合から放射されたテラヘルツ波の周波数評価、レーザー学会第 440 回研究会、2013 年 02 月 19 日、グランドヒル市ヶ谷（東京都）
- 松下 亮仁、レー・ゴク・ソン、立木 隆、内田 貴司、 Si_3N_4 メンブレン上への 200GHz 帯薄膜スパイラルアンテナの製作、第 60 回応用物理学学会春季学術講演会、2013 年 03 月 27 日、神奈川工科大学（神奈川県）
- 堅田 寛、立木 隆、内田 貴司、Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子のモード同定、第 60 回応用物理学学会春季学術講演会、2013 年 03 月 27 日、神奈川工科大学（神奈川県）
- 堀口 顕司、立木 隆、内田 貴司、Nb 薄膜を用いたナノブリッジジョセフソン素子の製作、第 60 回応用物理学学会春季学術講演会、2013 年 03 月 28 日、神奈川工科大学（神奈川県）
- A. Matsushita, L. N. Son, T. Tachiki, T. Uchida, Receiving Properties of Thin-Film Spiral Antenna on Si_3N_4 Membrane at 200 GHz Band, Proc. of the 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013. 9, Mainz, Germany
- 21 T. Tachiki, H. Katada, T. Uchida, Evaluation of Cavity Modes in Terahertz-Wave Oscillators using Bi-2212 Intrinsic Josephson Junctions, 11th European Conference on Applied Superconductivity, 2013. 9, Genova,

Italy

22 T. Uchida, H. Katada, T. Tachiki,
Evaluation of Bi-2212 Intrinsic
Josephson Device for Antenna-Coupled
Oscillator, 2013 The 7th East Asia
Symposium on Superconductor
Electronics (招待講演), 2013. 10, Taipei,
Taiwan

23 立木 隆、堅田 寛、内田 貴司、Bi-2212
固有ジョセフソン接合テラヘルツ波発振
素子の発振周波数の温度依存性、電子情報
通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、
平成 26 年 1 月 24 日、機械振興会館(東京
都)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

立木 隆 (TACHIHI, Takashi)
防衛大学校・電気情報学群・准教授
研究者番号：60531796

(2)研究分担者

内田 貴司 (UCHIDA, Takashi)
防衛大学校・電気情報学群・教授
研究者番号：50531802