

(平成 24 年度 研究実施報告)

# 国際科学技術共同研究推進事業 (戦略的国際共同研究プログラム)

(研究領域「情報通信技術」)

研究課題名「テラヘルツ帯プラズモニック・ナノICTデバイスを利用した無線通信」

平成24年度実施報告書

代表者氏名：尾辻 泰一

(所属・役職： 東北大学電気通信研究所・教授)

## 1. 研究実施内容

### 1-1. 研究実施の概要 公開

本研究は、テラヘルツ(THz)波を利用した超広帯域ユビキタス無線通信を実現するための革新的なプラズモニックナノデバイス技術を日仏共同で開発することを目的とする。従来の電子走行型電子デバイスの速度限界を打破するために、我々は 2D(二次元)プラズモン共鳴という新しい物理現象を動作原理として新たに導入する。それにより、i)周波数可変で室温動作可能なコヒーレント単一波長 THz 光源、ii)データ変調された THz 変調波の高速コヒーレント検波、ならびに iii)サブ THz ならびに THz 搬送信号波への 10-40Gbit/s 級超高速強度変調の実現をめざす。日本側は、主にプラズモン共鳴型 THz 光源デバイス、プラズモン共鳴型 THz 波変調器デバイス、さらにテラヘルツ超高速無線通信用送信系プロトタイプシステムを、フランス側は、主にフォトダイオードによるサブ THz 光源デバイスおよびプラズモン共鳴型 THz 検出器デバイス、さらにはテラヘルツ超高速無線通信用受検系プロトタイプシステムをそれぞれ開発する。これらの新規開発デバイスを導入し、互いにノウハウを提供し、最終的には日仏共同で無線通信実証試験機を開発し、400-900GHz 帯を利用して、世界初の 40 Gbit/s 級超高速無線通信の実現をめざす。

本年度は、本来終了予定であった研究計画開始 3 年次にあたり、プラズモン共鳴型 THz 光源デバイス、検出デバイス、ならびにプラズモン共鳴型 THz 波変調器デバイスの開発を推進するとともに、デバイス評価技術の構築を進めた。並行して、それらのデバイスを搭載して実現する超高速無線通信用送信系プロトタイプシステムの構築による無線伝送実験を推進し、キャリア周波数 300GHz~400GHz において、シングルチャネルで 30Gbit/s、偏波多重方式で 40Gbit/s までの世界最高速の短距離(0.5m)無線伝送に成功した。

プラズモン共鳴型 THz 光源デバイスは、ゲート支配下の二次元構造に閉じ込められたプラズモン共鳴を基にした新しいタイプのテラヘルツ光源の開発である。本タスクの成功は、動作周波数帯域、サブテラヘルツ光源としての周波数帯域、放射電力、スペクトル線幅の各性能によって判定される。600-900GHz の周波数帯域で 100 $\mu$ W を超える電力と 1MHz を下回るスペクトル線幅の実現を本タスクの成果目標とする。基本的なデバイス構造と動作原理は申請者らオリジナルの DGG-HEMT 構造をベースとするプラズモン共鳴型フォトミキサである。本デバイスから単色・コヒーレントなテラヘルツ放射を実現するためには、フォトミキシング動作、すなわち、光混合したレーザー 2 光波の差周波成分にデバイスが自励発振する信号成分を注入同期する方法が、最も実現性が高いと考えられる。その実現には高い Q 値の共振器構造を組み込むことが有効である。我々は、低損失の平坦化絶縁膜を素子上部に堆積し、その上に ITO などの高反射率の THz 帯ミラー膜を積層化する手法を導入した。24年度は、プラズモンの自励発振に不可欠なプラズモン共振器の非対称境界条件を与える非対称二重回折格子ゲート構造を考案し、素子の設計試作を行った。その結果、140K の低温環境下ながら、光注入同期法を用いることなく直流ドレインバイアス印加のみで、単色コヒーレントなテラヘルツ発振・放射に世界で初めて成功した。

プラズモン共鳴型 THz 波検出器デバイスの開発に関しては、尾辻グループがデバイス設計・試作を担当し、素子特性評価は、主課題主担当の仏・モンペリエ大 Knap グループ、ならびに理研・大谷グループとの共同により、実施した。本 WITH プロジェクト成果の共同発明による非対称二重回折ゲート格子構造を導入した InP 系 HEMT(高電子移動度トランジスタ)素子において、無線利用周波数帯に相当する 300 GHz 領域の電磁波検出感度を評価した結果、低温環境下において明瞭な共鳴型検出応答を確認できた。これは、提案する A-DGG 構造の優れたプラズモン整流能力を裏付けている。また、室温下では、23 kV/W という世界最高の超高感度

特性を達成した。さらに、1 THz 以上の周波数帯域では、昨年度のドレイン無バイアス条件での 2.2 kV/W at 1 THz 感度特性に続いて、ドレインバイアス印加条件下で 6.4 kV/W at 1.5 THz という世界最高感度を達成した。

プラズモン共鳴型 THz 波変調器デバイスは、THz ビームの強度変調を行うための変調器の開発である。電気信号を印加することにより透過特性を制御する機能を有する。本タスクの成功は、変調効率と速度の2つのパラメータによって決まり、透過波の変調度は 30%以上、変調速度として 40GHz の達成を目標とする。24年度は、東北大(TU)附属実験施設を使用して、テストデバイスを試作し、強度変調特性の評価実験に着手した。また、試作デバイス特性評価については、非線形光学結晶光源について高速変調評価を可能とする 600GHz 帯の実験系を確立し、実際のデバイス評価への適用を進めた。

超高速無線通信用送信系プロトタイプシステムの開発では、プラズマ波(PW)デバイスおよび仏側開発による UTC-PD を用いたフォトミキシングのよる THz 信号源と変調器とで構成した無線通信用送信系プロトタイプシステムの構築を行い、キャリア周波数 600GHz-900GHz において、伝送速度 30~40 Gbits/s 、通信距離として 10m 以上を目標とする。24年度は、アルタナティブ開発の UTC-PD フォトミキサをキャリア発生源とし、従来技術で定評のあるショットキバリアダイオードとベースバンド増幅器で変調器を構成し、キャリア周波数 300GHz~400GHz において、シングルチャネルで 30Gbit/s、偏波多重方式で 40Gbit/s までの世界最高速の短距離(0.5m)無線伝送に成功した。また、新たに周波数マルチプライヤを用いた 300GHz 帯オール電気システムを開発し、10Gbit/s までのエラーフリー伝送に成功した。本課題最終年度の来年次:25 年度は、開発した上記プラズモン共鳴型各種デバイスを超高速無線通信用送信系プロトタイプシステムへ導入し、600 GHz 帯における 40 Gbit/s 無線伝送実験を実施する予定である。

## 2. 研究実施体制 公開

(下記の記載例にならって日本側および相手側の研究代表者・主な共同研究者を表として記入してください。  
代表者・主な共同研究者以外の研究参画者を記載する必要はありません。)

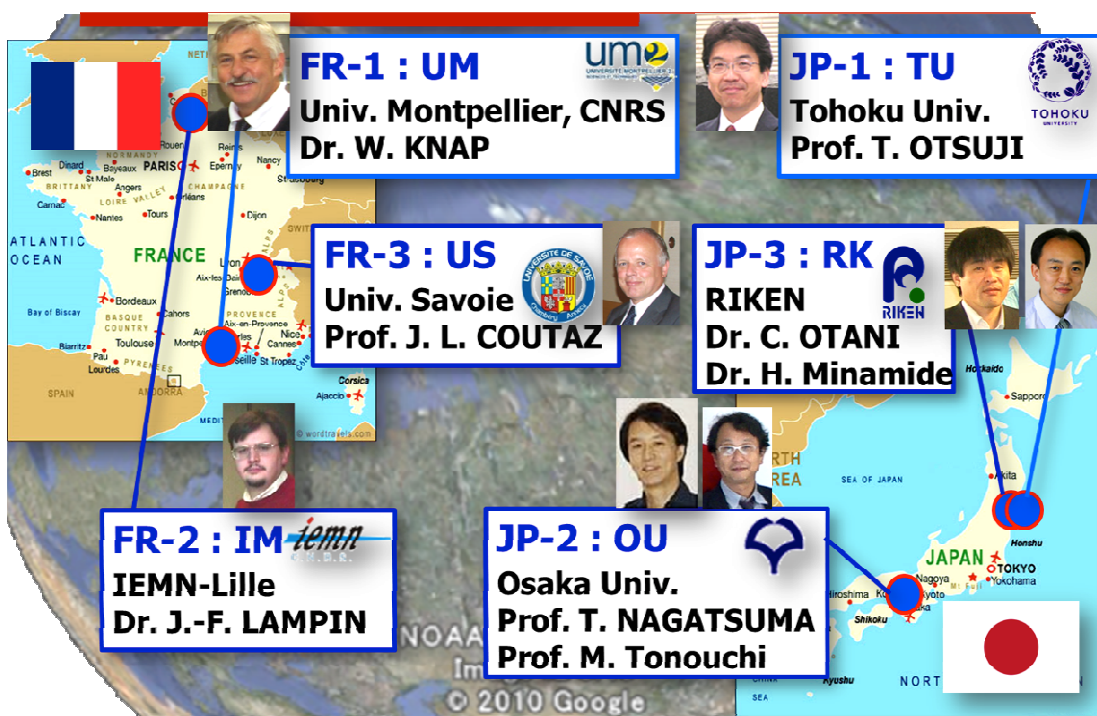
### 2-1. 日本側の研究実施体制

研究代表者/ 主な共同研究者	氏名	所属	所属部署	役職
研究代表者	尾辻 泰一	東北大学	電気通信研究所	教授
主な共同研究者	永妻 忠夫	大阪大学	基礎工学研究科	准教授
主な共同研究者	大谷 知行	理化学研究所	基幹研究所	チームリーダー

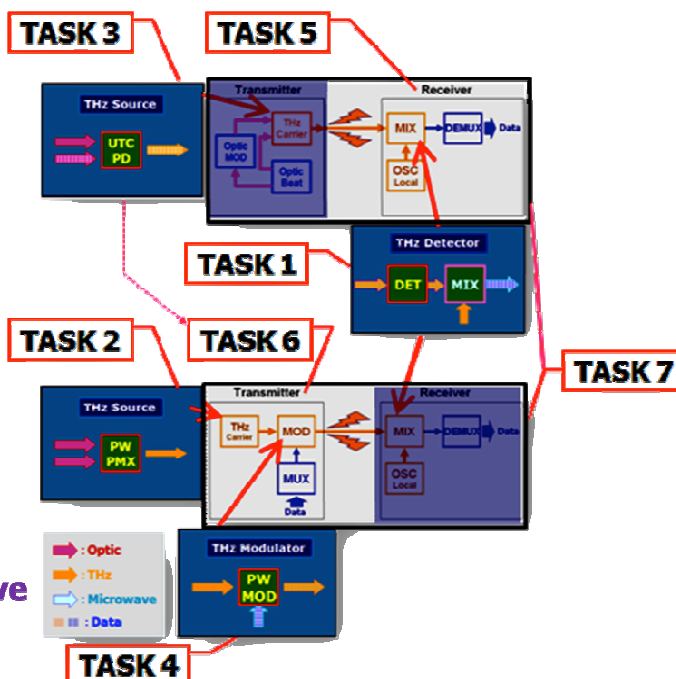
### 2-2. 相手側の研究実施体制

研究代表者/ 主な共同研究者	氏名	所属	所属部署	役職
研究代表者	クナツプ ウォイチェク	仏国立研究センター・モンペリエ第二大学	L2C研究所	研究部長
主な共同研究者	コータズ ジャンルイ	仏国立研究センター・サヴォア大学	IMEP-LAHC UMR5130	教授
主な共同研究者	ランパン ジャンフランソア	仏リール大学	IEMN	准教授

2-3. 両国の研究実施体制



- **TASK 1** FR-initiative PW detectors (UM, US)
- **TASK 2** JP-initiative PW sources (TU, RK)
- **TASK 3** FR-initiative UTC-PD sources (IM, US)
- **TASK 4** JP-initiative PW modulators (TU, RK)
- **TASK 5** FR-initiative RX test bed (IM, UM)
- **TASK 6** JP-initiative TX test bed (OU, RK)
- **TASK 7** JP-FR co-initiative fastest 40-Gbit/s class wireless Comm. (OU, IM)



### 3. 原著論文発表 公開

(以下の記載要領にしたがって、平成 24 年度の論文実績について記載してください。)

#### 3-1. 原著論文発表

##### ① 発行済論文数

	うち、相手側チームとの共著 (※)
国内誌 1 件	( 1 件)
国際誌 5 件	( 5 件)
計 6 件	( 6 件)

※本共同研究の相手側チーム研究者との共著に限る

#### 尾辻グループ

- \*[1] T. Otsuji, T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, A. Satou, W. Knap, V. Popov, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Emission and detection of terahertz radiation using two-dimensional electrons in III-V semiconductors and graphene," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, Vol. 3, No. 1, pp. 63-72, Jan. 2013. (doi: 10.1109/TTHZ.2012.2235911)
- InP 系高電子移動度トランジスタに独自の非対称二重回折格子ゲート(A-DGG)構造を導入したプラズモン共鳴型テラヘルツ電磁波放射・検出デバイスを試作・評価した。検出デバイスでは、1THz 入射時に 2.2 kV/W の世界最高感度を 15 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$  の低雑音で実現した。放射デバイスでは、内蔵した Fabry-Perot 光共振器と A-DGG 構造の協調動作により、熱プラズモンによるインコヒーレントな広域放射成分をコヒーレントプラズモンモードに注入同期させる超放射現象を誘導し、190K の低温下ながら世界で初めてコヒーレントな単色テラヘルツ放射に成功した。
- [2] T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, Y. Tanimoto, D. Fateev, V. Popov, D. Coquillat, W. Knap, Y. Meziani, Y. Wang, H. Minamide, H. Ito, and T. Otsuji, "InP-and GaAs-based plasmonic high-electron-mobility transistors for room-temperature ultrahigh-sensitive terahertz sensing and imaging," *IEEE Sensors J.*, Vol. 13, No. 1, pp. 89-99, Jan. 2013. (doi: 10.1109/JSEN.2012.2225831)
- [3] A. El Moutaouakil, T. Suemitsu, T. Otsuji, D. Coquillat, and W. Knap, "Nonresonant detection of terahertz radiation in high-electron mobility transistor structure using InAlAs/InGaAs/InP material systems at room temperature," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 12, No. 8, pp. 6737-6740, Aug. 2012. (DOI: 10.1166/jnn.2012.4575)
- [4] T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, Y. Tanimoto, D. Fateev, V. Popov, D. Coquillat, W. Knap, Y. Meziani, Y. Wang, H. Minamide, H. Ito, and T. Otsuji, "Ultrahigh sensitive plasmonic terahertz detector based on an asymmetric dual-grating gate HEMT structure," *Solid State Electron.* Vol. 78, pp. 109-114, June 2012. (doi: 10.1016/j.sse.2012.05.047)

#### 永妻グループ

- [5] Stéphane Blin, Frederic Teppe, Lucie Tohme, Shintaro Hisatake, Kazuki Arakawa, Philippe Nouvel, Dominique Coquillat, Annick Pénarier, Jérémie Torres, Luca Varani, Wojciech Knap, and Tadao Nagatsuma, "Plasma-wave detectors for terahertz wireless communication," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 33, No. 10, pp. 1354-1356, Sept. 2012. (doi: 10.1109/LED.2012.2210022)

#### 大谷グループ

- [6] 林伸一郎, 縄田耕二, 川瀬晃道, 南出泰丞, ”高出力・波長可変テラヘルツパラメトリック光源”, レーザー研究, 第40巻7号, pp486-490, Jul. (2012)

② 未発行論文数

(受理前のものは含めないでください。受理後、掲載巻・号・ページ等が未定の場合は”accepted”、決定しているものは”in press”と付記してください。)

	うち、相手側チームとの共著 (※)
国内誌 0 件	( 0 件)
国際誌 1 件	( 1 件)
計 1 件	( 1 件)

※本共同研究の相手国チーム研究者との共著に限る

永妻グループ

- [7] W Knap, S Rummyantsev, M S Vitiello, D Coquillat, S Blin, N Dyakonova, M Shur, F Teppe, A Tredicucci, and T Nagatsuma, “Nanometer size field effect transistors for terahertz detectors,” Nanotechnology, 2013 (in press)