

「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22年度実施報告書

研究代表者 尾辻 泰一

東北大学電気通信研究所・教授

1. 研究実施の概要

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、研究計画開始年度にあたり、プラズモン共鳴型 THz 光源デバイス、プラズモン共鳴型 THz 波変調器デバイスの2つのデバイス開発に着手するとともに、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モデル化・設計に着手した。次年度は、目標性能の実現をめざして上記テストデバイスの試作評価を実施するとともに、層神経プロトタイプシステムの構築を進める。

2. 研究実施体制

グループ名	研究代表者又は 主たる共同研究者氏名	所属機関・部署・役職名	研究題目
尾辻グループ	尾辻 泰一	東北大学・電気通信研究所ブロードバンド工学研究部門・教授	超高速テラヘルツ無線通信のためのプラズモニック光源・変調デバイスの開発
永妻グループ	永妻 忠夫	大阪大学・大学院基礎工学研究科システム創成専攻・教授	プラズモニック・ナノ ICT デバイスを利用した超高速テラヘルツ無線システムの開発
大谷グループ	大谷 知行	理化学研究所・基幹研究所先端光科学研究領域・チームリーダー	超高速テラヘルツ無線通信のためのプラズモニック・ナノ ICT デバイス評価技術の開発

3. 研究実施内容

本研究は、テラヘルツ (THz) 波を利用した超広帯域コヒレント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、研究計画開始年度にあたり、プラズモン共鳴型 THz 光源デバイス、プラズモン共鳴型 THz 波変調器デバイスの2つのデバイス開発に着手するとともに、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モデル化・設計に着手した。次年度は、目標性能の実現をめざして上記テストデバイスの試作評価を実施するとともに、層神経プロトタイプシステムの構築を進める。

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り、600-900GHz の周波数帯域で 100 μ 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。今年度は、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におけるフォトミキシン

グ動作の理論とデバイスモデリングを構築し、InAlAs/InGaAs/InP ヘテロ接合材料系を用いたテストデバイスの設計を完了した。

また、我々がこれまで開発を進めてきたプラズモン共鳴型テラヘルツ光源デバイスの課題であり、本開発の鍵となる光注入同期発振による単色・コヒーレント放射の実現に重要な高Q縦型共振器構造が放射スペクトルに与える狭窄効果の定量評価を進めた。まず、光源素子の基本構造となる高電子移動度トランジスタ (HEMT: High Electron Mobility Transistor) 素子本体のテラヘルツ放射成分にプラズモン不安定性に起因する自励発振成分が含まれていることの実験検証を行った。図 1 は、熱励起プラズモンによるインコヒーレント放射成分をマスクするために、フェムト秒レーザー励起で生成されるコヒーレントプラズモン共鳴成分のみを時間分解計測した結果である。ゲートバイアスの変化とともにプラズモン共鳴周波数に対応した放射スペクトルピークの推移が室温下で観測できた。次に、既開発の GaAs 系ヘテロ接合材料による二重回折格子型ゲート HEMT 素子に高Q縦型共振器を追加し、テラヘルツ放射特性の変化を観測した。素子構造と評価結果を図 2 に示す。二重回折格子型ゲートが占めるアクティブエリア上部に高透過性の PW1500 レジストで平坦化し、ITO をミラーとして成膜し、基板裏面は金ミラーを蒸着した。測定された共振器のフィネスは 40~60 程度であり、HEMT 単体に比して 1桁程度のフィネス (Q 値) 向上が得られた。本素子からの放射スペクトルを共振器構造導入前後で比較すると、高Q共振器の導入によって縦型ファブリ・ペローモードに対応する放射スペクトルの多数のモードの急峻性が増した。特に基本共鳴周波数に対応する 2.2 THz の急峻性が顕著であり、光注入同期の実現が期待できる。次年度の本試作では、光通信用レーザー波長 1550 nm 帯で注入効率の高い InP 系 HEMT 材料を用いて試作を進める。

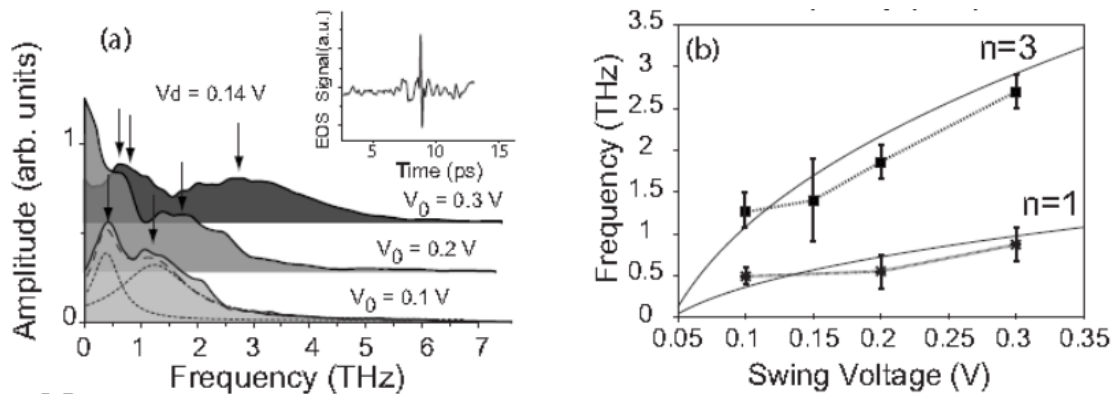


図 1. フェムト秒レーザー励起に同期したプラズモン共鳴によるテラヘルツ放射波の時間・周波数応答 (左) と放射スペクトルピーク (基本波、第 3 次高調波) のゲートバイアス依存性 (右).

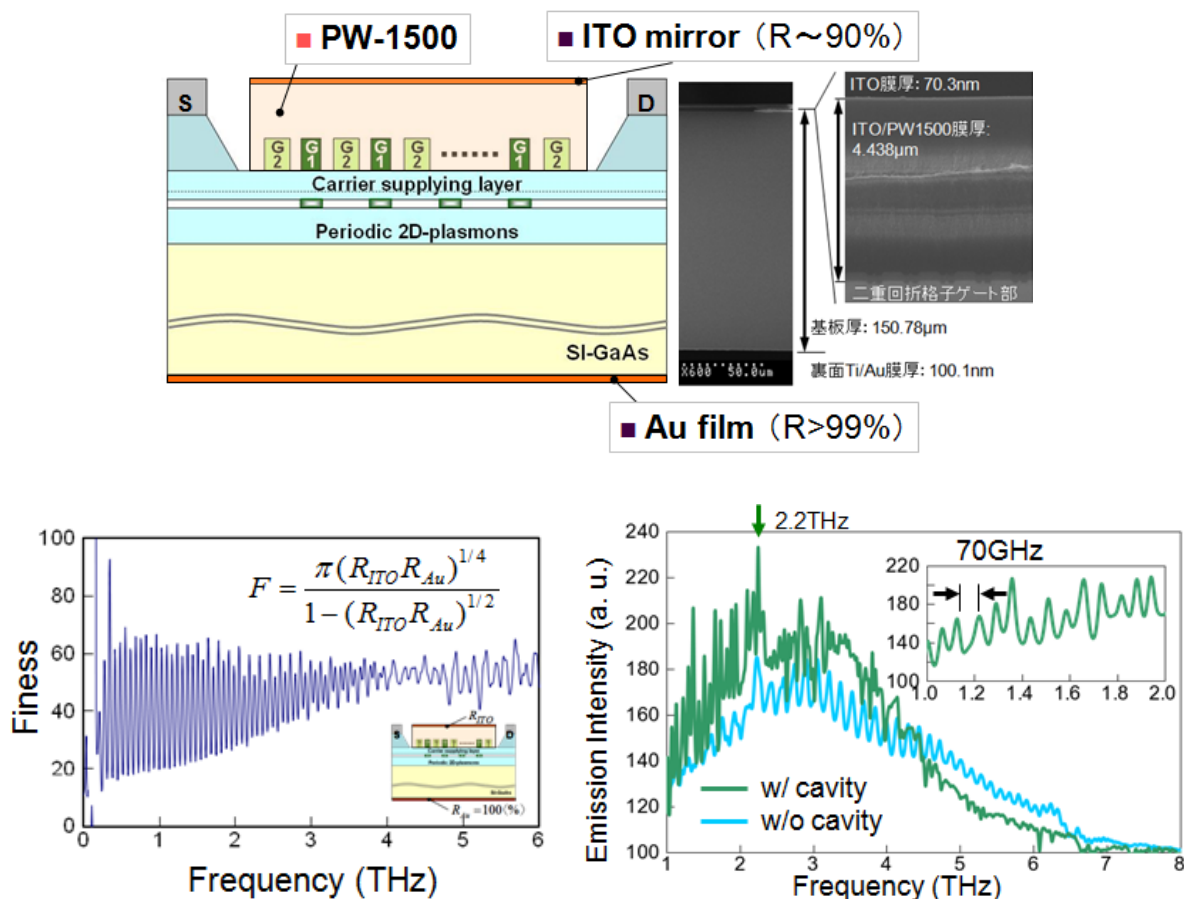


図 2. 二重回折格子ゲート HEMT 素子への高 Q 縦型共振器導入とその放射スペクトル狭窄効果. 上 : 断面構造図と TEM 写真、左下 : 縦型共振器のフィネス測定値、右下 : 放射スペクトル.

平行して、試作デバイス特性評価のための試験評価システムの構築を進めた。別途導入したテラヘルツ帯パワーメータと既存の連続波光源を用いて 500GHz, 600GHz 帯のパワー計測を行い、強度測定法を確立した。また、既存光源の強度較正に用いた較正済ポロメータと比較を行い、強度較正について確認した。並行して、強度較正に用いる非線形光学結晶光源の設計と構築を行うとともに、スペクトル線幅の評価技術の確立のために、既存の 600GHz ヘテロダイシステムの評価を行い、検出可能な最小線幅の評価を行った。

表 1. パワーメータ (Erickson 製 PM4)、焦電検出器 DLATGS、焦電検出器 Molelectron の応答の比較.

Detector →	PM4	DLATGS ₂	Molelectron
Conditions ↓	(no chopper)	(with chopper)	(with chopper)
No attenuator	107.40 μW	[saturated]	130.7 μV
2 mm attenuator	38.60 μW	551.6 mV	[not recorded]
6 mm attenuator	8.68 μW	142.5 mV	8.3 μV

* パワーメータは入力電力、焦電検出器は出力電圧を示す。使用した光源周波数は 505 GHz、2mm と 6mm のアテネータの減衰度はそれぞれ 12.2%および 48.7%。chopper の周波数は 316.2 Hz とした。DLATGS と Molectron で得られた感度はそれぞれ、14,290 V/W、および、1.22 V/W である（なお、これらの値は内蔵のアンプを通した後の値であることに注意されたい）。

次年度は、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する。試作デバイスは、東北大、理研、阪大、(ならびに US、UM) において各々評価を実施し、目標性能の実現を目指す。

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り、透過波の変調度：30%以上、変調速度：40GHz の達成を目標とする。今年度は、THz 波強度変調動作の理論とデバイスモデリングを構築し、InAlAs/InGaAs/InP ヘテロ接合材料系を用いたテストデバイスの設計を完了するとともに、試作デバイス特性評価のための試験評価システムの構築を進め、評価システムの技術的見通しを得た。

強度変調デバイスの設計では、設計・評価の効率化を念頭に置いて光源デバイスの設計とパラメータをできるだけ共有した。設計時の変調特性に関する数値解析結果を図 3 に示す。キャリア周波数 900 GHz を中心として、消光比 0.6 以上をめざす。

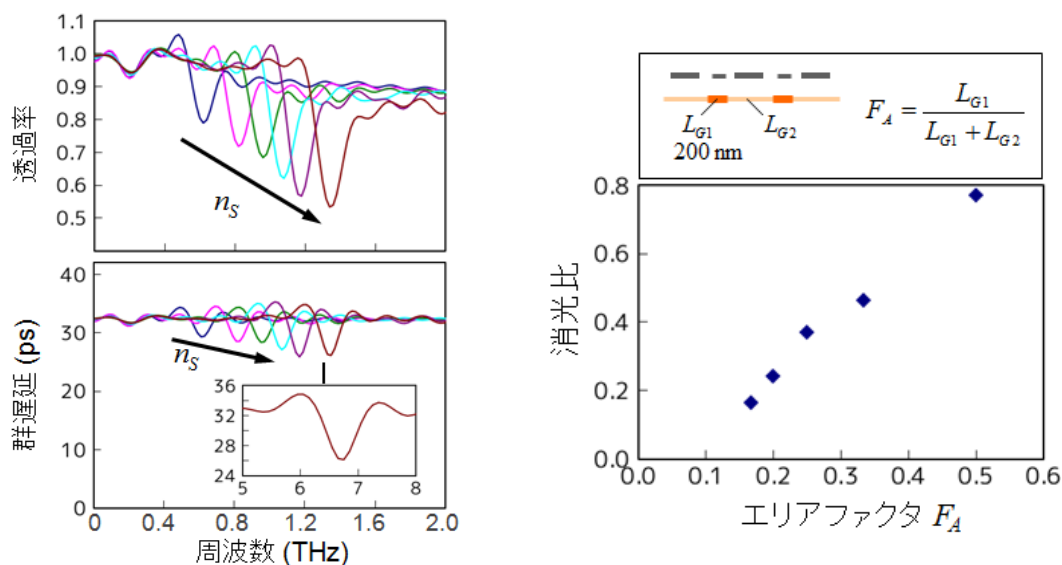


図 3. プラズモン共鳴型強度変調素子設計時の動作特性数値解析結果。

評価システムの構築では、変調速度の評価のために帯域幅 30GHz のスペクトラムアナライザを導入し、30GHz までの帯域について評価システムの技術的な見通しを得た。一方、30GHz を超える変調速度の評価では、広帯域分光機器であるフーリエ変換分光器 (FT-IR) とメタルメッシュについて周波数の最小分解能を評価した結果、おおよその評価は可能なものの、より精密な変調速度の評価のためには非線形光学結晶光源もしくは THz-TDS の利用が必要であることがわかった。図 4 に示すように、非線形光学結晶光源についてはすでに強度較正用に設計・構築を行っており、来年度、これに加えて変調速度評価が可能な改良を進めて評価法を確立する予定である。

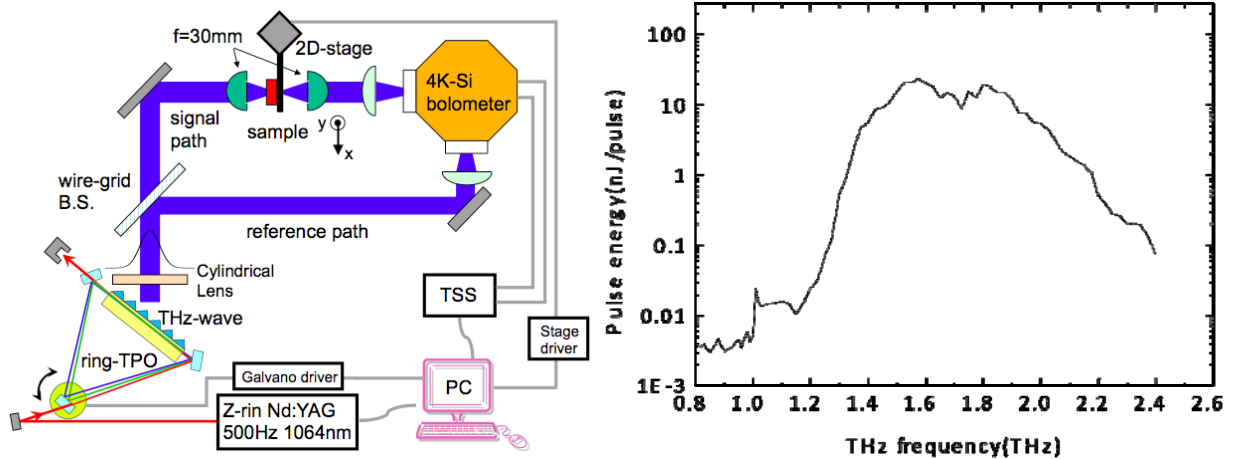


図 4. 強度較正のための非線形光学結晶光源実験系の模式図 (左) と光源出力強度 (右).

次年度は、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する。試作デバイスは、東北大、理研、阪大、(ならびに US、UM) において各々評価を実施し、目標性能の実現を目指す。

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による 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う。キャリア周波数 600GHz–900GHz において、伝送速度 40 Gbits/s、通信距離として 10m 以上を目標とする。今年度は、UTC-PD 光源、光変調器による送信システムとショットキーバリアダイオード検出器による受信システムのモデル化と設計に着手し、開発するプロトタイプシステムの技術的見通しを得た。今年度得られた成果は以下のとおりである。

- 1) 光コム信号発生器からの多波長光信号を、光フィルターを用いて 2 波長を選択し、それらを合成する手法において、合成波の位相を安定化する手法を開発し、目標値を上回る 10^{-9} 以下の安定度 (100GHzに対して、100Hz以下) の安定度と、1Hzの設定分解能を達成した。ただし、周波数帯域としては、100-300GHzであることから、次年度、更なる広帯域化を図る。
- 2) レーザー光源の雑音は通信システムに与える影響を、当グループがすでに開発している 100-400GHz 帯通信技術を用いて実験的に調べた。光信号の C/N 比が伝送特性に与える影響について詳細に検討した結果、C/N 比として 43dB 以上あれば、光雑音は伝送特性に影響を及ぼさないことが分かった(図 5 (a))。また、40dB 程度であれば、バンドパス光フィルターによって、自然放出光雑音の影響を回避することができることを明らかにした(図 5 (b))。得られた知見は、今後、光信号を用いたテラヘルツ波キャリア信号システムの設計において重要なものである。

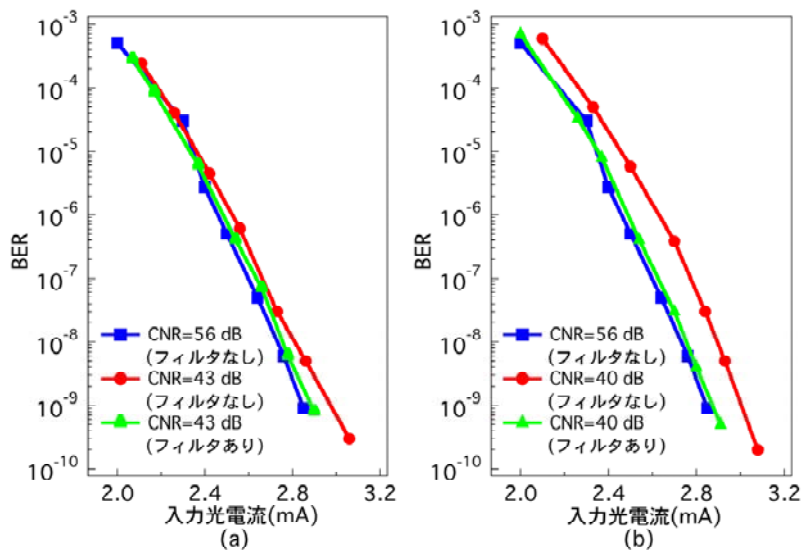


図 5. ビット誤り率(BER と C/N との関係 (1Gbit/s).

- 3) 日本側開発のプラズマ波(PW)デバイスによる変調器の変調指数:30%以上を目標とするシステム設計に反映させるべく、一般的に信号変調度と通信性能との関係を実験的に調べた。まず、2波長光信号源の変調度についての検討を行った。すなわち、2波長信号の強度比が伝送特性に与える影響について調べた。2波長の光の強度差が 10dB の場合、光変調度は約 50%となるが、送信出力を 2 倍にすれば同じ伝送特性 (例えばエラーフリー) にできることを理論・実験の両面から明らかにした(図 6)。これより、光の変調度が 30%の場合には、3 倍を超える送信出力が必要となる。従って、伝送レートが上がってくるにつれ、送信出力が限界に近づくため、変調度を可能な限り 100%に近づける努力が必要であるなど、今後のデバイスならびにシステム開発の上で有用な結果が得られた。

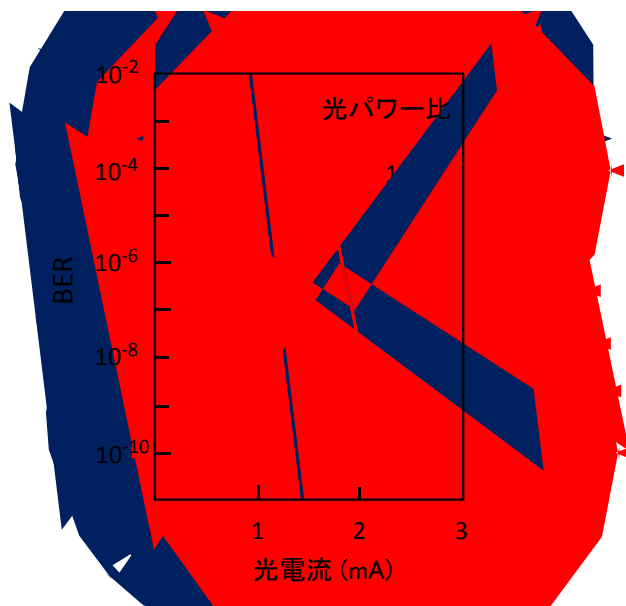


図 6. 2 波長のパワー比が伝送特性 BER に及ぼす影響。

- 4) フランス側開発のプラズマ波(PW)デバイスによる検出器を、保有の 100-400GHz 帯無線システムに適用して感度性能を実験的に調べるため、アンテナとPWデバイスとを接続した検出器により、100GHz 帯での受信器としての感度評価を行うための準備を進めた。平面アンテナの設計を終え、またハイブリッド接続のための実装技術を構築した。
- 5) その他、当初計画以外の成果として、12.5Gbit/s の信号発生器 2ch と MUX 回路により、25Gbit/s までの信号伝送の評価系を構築した。次年度に先行して、受信システム用復調回路の広帯域化のために、ショットキーバリア検出器と増幅器とを集積した検出器を試作し、帯域 15GHz で 20Gbit/s までの動作を確認した。

次年度は、送信システムプロトタイプの構築と進めるとともに、本プロジェクトの中間目標である 25-30Gbit/s のシステム性能を実証する。

4. 原著論文発表

- [1] T. Otsuji, H. Karasawa, T. Watanabe, T. Suemitsu, M. Suemitsu, E. Sano, W. Knap, and V. Ryzhii, "Emission of terahertz radiation from two-dimensional electron systems in semiconductor nano-heterostructures," *Comptes Rendus Physique*, Vol. 11, Iss. 7-8, pp. 421-432, 2010. doi: 10.1016/j.crhy.2010.04.002 [日仏共著]
- [2] A. El Moutaouakil, T. Komori, K. Horiike, T. Suemitsu, and T. Otsuji, "Room Temperature Intense Terahertz Emission from a Dual Grating Gate Plasmon-Resonant Emitter using InAlAs/InGaAs/InP Material Systems," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E93C, No. 8, pp. 1286-1289, 2010.
- *[3] S.A. Boubanga-Tombet, F. Tepe, A. El Moutaouakil, D. Coquillat, N. Dyakonova, C. Consejo, P. Arcade, N. H. Marinchio, T. Laurent, C. Palermo, A. Penarier, T. Otsuji, L. Varani, and W. Knap, "Room temperature coherent and voltage tunable terahertz emission from nanometer-sized field effect transistors," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 97, Iss. 26, 262108 (3 pages), 2010. [日仏共著]
*プラズモン共鳴光源素子の基本構造であるHEMT素子本体のテラヘルツ放射成分にプラズモン不安定性に起因する自励発振成分が含まれていることを日仏共同で実験検証したもので、本研究の中心課題の一つであるフォトミキシングによるテラヘルツ波発生の可能性を確認できた。
- [4] T. Nagatsuma, "Challenges for Ultrahigh-Speed Wireless Communications Using Terahertz Waves," *J. Terahertz Science and Technology*, Vol. 3, No.2, pp.55-65, 2010.
- [5] T. Kleine-Ostmann and T. Nagatsuma, "A Review on Terahertz Communications Research," *J. Infrared Milli. Terhz. Waves*, Vol. 32, No. 2, pp. 143-171, 2011. doi: 10.1007/s10762-010-9758-1
- [6] A. El Moutaouakil, T. Suemitsu, T. Otsuji, H. Videlier, S.e-A.n Boubanga-Tombet, D. Coquillat, and W. Knap, "Device loading effect on nonresonant detection of terahertz radiation in dual grating gate plasmon-resonant structure using InGaP/InGaAs/GaAs material systems," *Phys. Stat. Solidi.*, Vol. 8, No. 2, pp. 346-348, 2011. doi: 10.1002/pssc.201000569 [日仏共著]

- [7] T. Otsuji, T. Watanabe, A. El Moutaouakil, H. Karasawa, T. Komori, A. Satou, T. Suemitsu, M. Suemitsu, E. Sano, W. Knap, and V. Ryzhii, "Emission of terahertz radiation from two-dimensional electron systems in semiconductor nano- and hetero-structures," J. Infrared Milli. Terhz. Waves, online, in press, 2010. doi: 10.1007/s10762-010-9714-0 [日仏共著]

5. 主催したワークショップ等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
22/07/9 - 10	WITH キックオフ ミーティング	仙台市秋保	11名	日本側メンバー による WITH プロ ジェクトキックオ フ
22/10/05	米澤 PO サイトビジ ットミーティング	仙台市青葉区 東北大・通研	5名	米澤 PO によるサ イトビジット
22/09/28 - 29	WITH Kick Off Meeting	パリ国立天文台	25名	日仏共同の WITH プロジェク トキックオフ

以上