

修士学位論文要約（令和4年3月）

プラズモニック・テラヘルツ電磁波検出の高感度化に向けたデバイスプロセス技術に関する研究

根来 拓海

指導教員：尾辻 泰一， 研究指導教員：佐藤 昭

Study on Device Process Technology towards Enhancement of Responsivity of Plasmonic Terahertz Detection

Takumi NEGORO

Supervisor: Taiichi OTSUJI, Research Advisor: Akira SATOU

As a highly sensitive, high-speed, room-temperature-operating plasmonic THz detector for THz wireless communications, we have developed the so-called asymmetric dual-grating-gate high-electron-mobility transistors (A-DGG HEMTs). In this study the author focuses on enhancement of the external responsivity of the A-DGG HEMT for application to high-speed wireless communications. The external responsivity is expressed as a product of internal responsivity and light coupling efficiency. In consequence, enhancing either or both of them would lead to enhancement of the external responsivity. The author experimentally demonstrated that (1) the gate-readout configuration enables the enhancement of the light coupling efficiency proportional to the active area size and the impedance matching to the 50-Ω high-speed interconnection systems, (2) the 3D rectification effect due to the heterobarrier between the channel and the gate results in the enhancement of the internal responsivity, and (3) combination of those two approaches leads to the drastic enhancement of the external responsivity.

1. はじめに

将来のテラヘルツ帯無線通信に向けて、我々のグループはテラヘルツ波検出素子として非対称二重回折格子ゲート構造高電子移動度トランジスタ (A-DGG HEMT) の研究を行ってきた<sup>1)</sup>。本デバイスは周期的に配置されたゲート電極が回折格子としてフォトン二次元プラズモンの結合を可能にし、プラズモンの流体非線形性によって整流光電流を生成している<sup>2)</sup>。これまで本デバイスは、感度指標として入射テラヘルツ波パワーをアクティブ領域に全て集光できた場合の「内部感度」においては、高い値が報告されてきた<sup>1)</sup>。本研究では通信応用に向けて、入射テラヘルツ波パワーに対してデバイスから実際に出力される光起電圧を表す「実測感度(外部感度)」の向上を目指した。本研究では、ゲート電極からの出力方式が従来のドレイン電極からの出力方式に比べ受光効率向上に有用であることの検証、ならびに三次元整流効果による内部感度向上の検討・検証を行い、最後にそれらを組み合わせることによる実測感度向上を検証した。

2. ゲート電極からの出力信号取り出し方式による受光効率向上

入射テラヘルツ波の集光スポットサイズ(直径1mm程度以上)に比べて、現在のデバイスのアクティブ領域面積(20 × 20 μm<sup>2</sup>)は非常に小さいため、アクティ

ブ領域面積を拡大させることで受光効率向上が達成される。しかし、ドレイン電極を出力ポートとするこれまでの方式(ドレイン出力)では、出力光起電圧はアクティブ領域面積に比例しないため、受光効率向上による出力光起電圧の増大は限定的であった。それに対して、先行研究で提案されたゲート電極を出力ポートとする出力方式(ゲート出力)では、出力光起電圧がアクティブ領域面積に比例して増大することが理論的に示された<sup>3)</sup>。本研究では、理論検討の実験的検証として、異なるアクティブ領域面積を持つデバイスを試作しテラヘルツ検出測定を行い、測定結

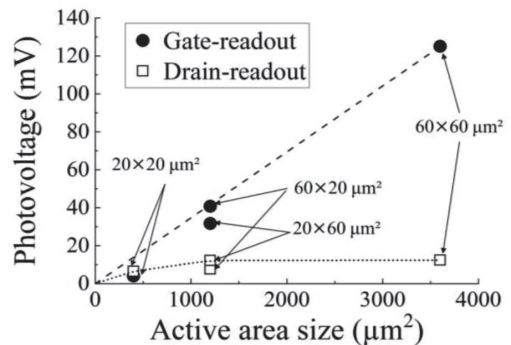


図1 ゲート出力とドレイン出力における出力光起電圧のアクティブ領域面積依存性

果を比較・検討した(図 1)。ドレイン出力では、出力光起電圧がアクティブ領域面積に比例せず、受光効率向上による出力光起電圧の増大はほとんど見られなかった。それに対してゲート出力では、出力光起電圧がアクティブ領域面積に比例し、受光効率向上による出力光起電圧増大を確認した。これより、ゲート出力はドレイン出力に比べ受光効率向上に有効であることが実験的に示された<sup>4)</sup>。また、両方式の出力波形から確認される多重反射信号を比較することにより、ドレイン出力ではインピーダンスの不整合が大きく、ゲート出力ではインピーダンス不整合が小さいことがわかった。これより、ゲート出力はドレイン出力に比べて出力インピーダンスが低く、通信系で多用される 50 Ω 伝送系とのインピーダンス整合が良好という大きなメリットが確認された<sup>4)</sup>。

**3. ダイオード非線形性を利用した三次元整流効果による内部感度向上**

次に内部感度向上のアプローチとして、本研究で新たに三次元整流効果の発現による内部感度の向上を提案した。三次元整流効果は、InGaAs チャネル層/InAlAs スペーサー層間ヘテロバリア層のダイオード非線形性に着目したもので、プラズモン励起による光電流の調和振動成分とその流体非線形性によって生じた高次高調波成分に対して、ダイオード非線形性を重畳させることで、飛躍的な内部感度向上が期待できる効果である。InP 系 HEMT では、正のゲート電圧印加によって InGaAs チャネル層から InAlAs スペーサー層への電子トンネリングが生じ、ダイオード非線形性が現れる。これによって順方向ゲート電圧の増大とともに出力光起電圧が指数関数的に増大することが期待できる。

検証実験では、ゲート出力においてゲート電圧を負(逆バイアス)から正(順バイアス)に印加し、各電圧点での出力光起電圧を比較した。実験により、ゲート電圧を正に印加することで、従来の方式に比べて巨大な出力光起電圧が生じることが示された(図 2)<sup>5)</sup>。

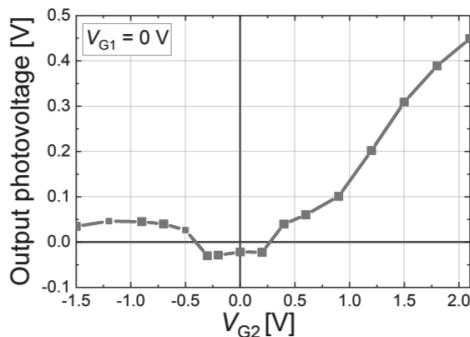


図 2 ゲート出力における出力光起電圧のゲート電圧依存性

さらに、出力光起電圧のゲート電圧依存性における順方向電圧印加時の光起電圧増大は、直流電流-電圧特性における電流増大のカーブと定性的に一致しており、三次元整流効果によって出力光起電圧の増大が起こっていることを強く支持している。

**4. 大面積デバイスと三次元整流効果の組み合わせによる実測感度向上**

最後にゲート出力による受光効率向上と三次元整流効果による出力光起電圧の増大を組み合わせ、実測感度の向上を実験的に検証した。従来に比べ大面積のデバイスを試作するにあたり、ゲートパターン電子描画時に電子散乱の影響が少なく、パターン形成可能な描画条件およびゲート電極長・間隔の条件出しを行った。試作したデバイスを測定した結果、出力端子(ゲート 2)以外を端子開放させる条件にて、アクティブ領域面積に対する出力光起電圧の単調増加を確認した(図 3)。これより大面積デバイスで最大出力光起電圧を記録し、従来方式に比べて約 33 倍の実測感度が達成された。

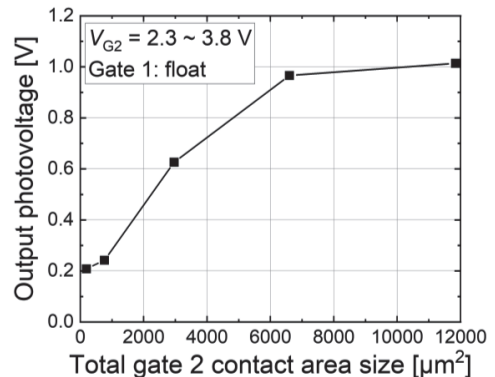


図 3 三次元整流効果による出力光起電圧のゲート 2 総接触面積(アクティブ領域面積に比例)依存性

**5. まとめ**

本研究はテラヘルツ検出素子である A-DGG HEMT の実測感度向上を目的とした。第一に、先行研究にて検討されたゲート出力が受光効率向上に有用であることを実デバイスによる実験で検証した。第二に、内部感度向上のアプローチとして三次元整流効果による出力光起電圧増大を検討・検証した。最後に、それらを組み合わせることによる実測感度向上を検証し、従来に比べて高い実測感度が達成された。

**文献**

- 1) Y. Kurita *et al.*, Appl. Phys. Lett., 104, 251114 (2014).
- 2) V. V. Popov *et al.*, Appl. Phys. Lett., 99, 243504 (2011).
- 3) T. Saito *et al.*, MTSA2019 (2019).
- 4) T. Negoro *et al.*, DRC2020 (2020).
- 5) T. Negoro *et al.*, IRMMW-THz2021 (2021).