

修士学位論文要約（令和4年3月）

## 二次元回折格子ゲート型トランジスタにおけるプラズモンポラリトンの モデリングとそのテラヘルツ電磁波検出への応用に関する研究

佐々木 悠真

指導教員：尾辻 泰一， 研究指導教員：佐藤 昭

### Study on Modeling of Plasmon-Polaritons in Two-Dimensional Diffraction Grating-Gate Transistors and Their Application to Terahertz Detection

Yuma SASAKI

Supervisor: Taiichi OTSUJI, Research Advisor: Akira SATOU

To fully utilize the two-dimensional (2D) diffraction grating structure in plasmonic terahertz (THz) detectors for polarization-independent detection and sensitivity improvement, theoretical understanding of 2D plasmon in the structure is required. In this paper, the author developed a simulation model for 2D diffraction grating-gate transistors and analyzed 2D plasmon-polaritons excitation in the channel for the incident THz wave as well as the rectification effects due to the plasmonic hydrodynamic nonlinearities. It was shown that the 2D diffraction grating structure can convert the incident THz waves in the channel width direction into plasmons in the channel length direction. It was also found that the rectified photocurrent is much smaller in the case of the incident THz wave polarization along the channel width direction than in the channel length direction. The author identified that, in the former case, the cancellation of the rectified photocurrent occurs within the unit cell of the structure due to the anti-symmetry of the electric field of the excited 2D plasmons in the channel width direction. This cancellation is expected to be resolved by introducing the asymmetric arrangement of the nanoantennae with respect to the channel width direction.

#### 1. はじめに

テラヘルツ電磁波 (THz 波) は、電波としての超高速周波性から、高速大容量高速無線への応用が期待されている。しかしながら、室温動作・高検出感度・高速応答・オンチップ化可能といった、通信に要求される水準を全て満たす THz 検出素子は未だ開発途上となっている。

このような状況を打破すべく、電子集群の集団振動量子であるプラズモンを動作原理としたプラズモンテラヘルツ検出素子の研究が進んでいる[1]。筆者らのグループは、InP 系高電子移動度トランジスタ (High-Electron-Mobility Transistor; HEMT) をベースとした二次元回折構造集積格子ゲート (2-dimensional-Diffraction-structure-integrated Grating-Gate; 2DGG) HEMT によって偏波依存性を制御し、高感度検出が可能であることを報告している[2]。しかしながら、この結果は定性的な検証実験に留まっており、偏波無依存な検出の実現や、二次元流体的非線形性を活用した検出感度向上のためには、理論解析によるデバイス動作原理の解明と、それに基づくデバイス設計指針の構築が必要である。

そこで本研究では 2DGG HEMT の動作原理の解明を目的に、シミュレーションモデルの構築と

入射 THz 波に対するチャネル内プラズモンポラリトン励起電界のモード解析ならびに流体非線形性による整流効果の解析を行なった。

#### 2. 2DGG HEMT のモデル構築

初めにシミュレーションモデルを構築した。図 1 に示すように、2DGG HEMT の直上から THz 波が入射した場合におけるチャネル内電界を求めめるため、入射 THz 波やチャネル内電界をマクスウェル方程式にて記述し、チャネル内二次元プラズモンにおける電子の運動を流体力学方程式にて表した。これらの方程式の調和振動成分のみを抽出し、入射 THz 波に対する線形応答であるプラズモンポラリトン励起を解析するシミュレータを開発した。また、上述の方程式に非線形性によ

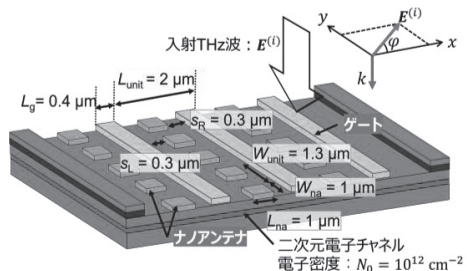


図 1 2DGG HEMT の模式図。

る整流電流の項を追加することで、光整流電流成分をなすプラズモンラチェット電流とプラズモンドラッグ電流のそれぞれの電流密度[3]を計算し、解析を行った。

**3. 2DGG HEMTの周波数特性**

図2に励起したプラズモン電界の周波数特性を示す。チャンネル長、チャンネル幅方向のそれぞれにおいて1.25 THz、1.45 THz、1.9 THzにプラズモン共鳴に対応したピークが確認された。入射 THz 波の偏波がチャンネル幅方向を向いているにもかかわらず、チャンネル長方向にもピークが表れており、電界の互いに直交するチャンネル長成分とチャンネル幅成分が結合していることを示している。また、高次モードである1.9 THzの場合に着目すると、各電界成分が同等の強度になっていることがわかる。これは、入射 THz 波が、二次元回折格子構造を介してチャンネル長方向に振動するプラズモンに変換できることを示している。チャンネル内電場分布を解析した結果、1.9 THzの場合においてチャンネル長方向プラズモンとチャンネル幅方向プラズモンのモード周波数が互いに一致した。これにより、チャンネル幅方向とチャンネル長方向とのモード結合が効率よく生じていることが明らかになった。

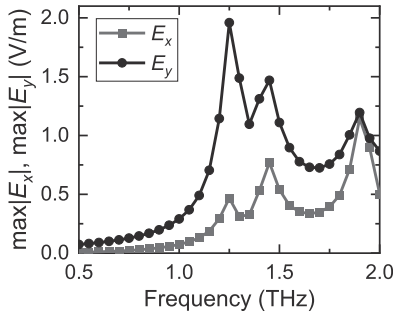


図2 励起した振動電界の周波数特性。

**4. 2DGG HEMTにおける非線形性による整流効果**

図3(a), (b)に、それぞれ入射 THz 波偏波がチャンネル長方向の場合とチャンネル幅方向の場合におけるプラズモンラチェット電流密度の周波数特性を示す。ゲートの位置をチャンネル長方向にずらすことでゲート・ナノアンテナの配置を非対称にし、解析を行った。図3(a)より、ゲートを非対称配置にすることで、周波数1.7 THzにおいてプラズモンラチェット電流密度が増大することがわかった。また、図3(b)より、入射 THz 波の偏波方向が90°のとき、プラズモンラチェット電流密度が極めて低下することも判明した。これは、プラズモンドラッグ電流密度と同様に、[2]の実験結果と矛盾する結果となった。電界分布を解析した結果、励起した振動電界がチャンネル幅方向に対して反対称であるため、空間的な平均としての光整流電流が打ち消し合っ

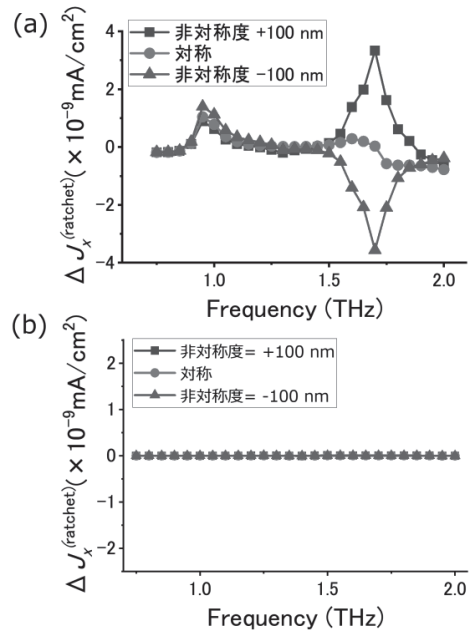


図3 プラズモンラチェット電流密度の周波数特性：(a)入射 THz 波偏波がチャンネル長方向、(b)チャンネル幅方向の場合。

た。このことから、電界の反対称性による相殺を解消するためには、ナノアンテナの配置あるいは形状をチャンネル幅方向に対しても非対称にする必要があることがわかった。

**5. まとめ**

本研究では、2DGG HEMTの直上から THz 波が入射した際のプラズモンの非線形応答をモデル化し、数値解析を行った。入射 THz 波がチャンネル幅方向に添う直線偏波の場合、入射波成分の一部が直交するチャンネル長方向の振動電界へ変換され、特にチャンネル長方向とチャンネル幅方向のモードが一致する場合に変換率は最大となり、直交するプラズモンが同程度の強度で励起できることを示した。また、プラズモンラチェット・ドラッグ電流密度は、入射 THz 波の偏波軸がチャンネル幅方向に添う場合には両電流密度とも極めて低下することが判明した。この原因として、励起電界がチャンネル長方向に反対称であることが考えられる。これを解消するためには、チャンネル幅方向に対するナノアンテナの非対称配置が有効であると考えられる。

**文献**

[1] M. Dyakonov and M. Shur, Phys. Rev. Lett., 71 (1993) 2465.  
 [2] M. Suzuki et al., IRMMW-THz 2018, Tu-A2-1a-2 (2018).  
 [3] V. V. Popov, Appl. Phys. Lett., 102 (2013) 253504.