

修士学位論文要約（令和2年3月）

二次元プラズモンを用いたテラヘルツ帯
光—無線周波数下方変換の理論的研究

眞鍋 颯也

指導教員：尾辻 泰一， 研究指導教員：佐藤 昭

Theoretical Study of THz Optical-Wireless Frequency Down-Conversion
Utilizing Two-Dimensional Plasmons

Soya MANABE

Supervisor: Taiichi OTSUJI, Research Advisor: Akira SATOU

The seamless convergence of fiber networks and wireless networks is required for future high-capacity communication networks, together with the use of higher wireless carrier frequencies in the millimeter-wave (MMW)/terahertz (THz) bands. In this paper, the author investigated theoretically the utilization of two-dimensional (2D) plasmons in an InGaAs-HEMT channel for the THz double-mixing. The author showed that the hydrodynamic nonlinearities of the 2D plasmons result in the generation of the double-mixed THz-IF signal and calculated the double-mixing conversion gain by modifying boundary conditions at the drain side suggesting that the plasmonic THz double-mixing can achieve sufficient gain for the use in the next-generation networks.

1. はじめに

モバイルデータ通信の普及は非常に目覚ましく、近年ではスマートフォン等の急速な普及とともに、音楽・動画配信サービスのような、サービスコンテンツの大容量化が進んでいる。今後さらなる発展が期待されるブロードバンドワイヤレスサービスを支えるためには、より大容量で低遅延なネットワークが求められる。そのような要求を満たすためには、光通信が有する超大容量で高速のスループットを落とすことなく無線通信と融合するフルコヒーレントネットワークの構築が必要である[1]。この実現に向けて、光—無線間でキャリア周波数をミリ波・テラヘルツ波へと直接下方変換可能なキャリアコンバータが必要となる。この周波数下方変換処理は高電子移動度トランジスタ (High-Electron-Mobility Transistor; HEMT) を用いることで実現することができる。赤外二光波を吸収させ、フォトミキシングによってその差周波の RF 信号を生成する。さらに、ゲートに入力した RF-LO 信号と、フォトミキシング信号とを RF ミキシングすることにより、それらの差周波を持つ IF 信号がドレイン端から出力される (光ダブルミキシング)。しかし、電子の走行速度限界などの律速から、テラヘルツ帯で動作可能なダブルミキシングによるキャリアコンバータは未踏領域となっている。

そこで本研究は、流体力学的性質を有する二次元プラズモンをデバイス動作原理としたテラヘルツ帯プラズモニック・ダブルミキシングの有用性を提唱す

ることを目的とする。第一に、二次元プラズモンが有する流体非線形性によってテラヘルツ帯ダブルミキシング信号が生成されること、さらにプラズモン共鳴効果と、直流電流駆動による共鳴狭窄化効果[2]で信号強度が増大することを理論的に示した。第二に、プラズモニック・ダブルミキシングにおける変換利得の理論的検証を行い、光—テラヘルツ波周波数下方変換ミキサとして有用であることを明らかにした。

2. HEMT によるプラズモニック・ダブルミキシングのモデル

既存の二次元流体モデル[3]を拡張し、フォトミキシングにより生成された周波数 $\Delta\Omega$ の光電流と、ゲート入力した周波数 ω_{RF} の RF-LO 信号によるミキシングのモデルを構築した。図1にプラズモニック・ダブルミキシングの概要を示す。フォトミキシングは UTC-PD 積層 HEMT 構造[4]の光吸収層にて行われているものとする。デバイスのパラメータには InGaAs-HEMT を適用し、ゲート長 $L = 200$ nm、ゲート幅 $W = 80$ μ m、実効ゲー

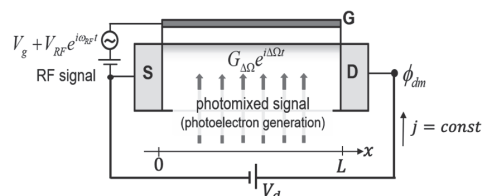


図1 プラズモニック・ダブルミキシングの概要図。

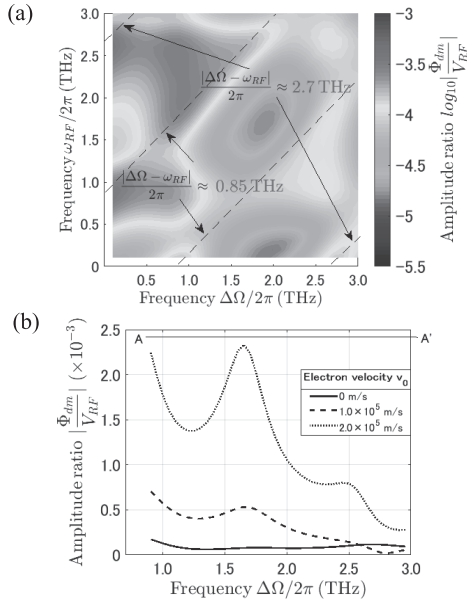


図 2 ダブルミキシング成分の(a)周波数特性と、(b)差周波数 0.85 THz における直流電流注入によるプラズマ共鳴狭窄効果。

トバイアス $V_g - V_{th} = 0.2$ V、RF-LO の振幅を $V_{RF} = 0.01$ V、光電流生成密度を $G_{\Delta\Omega} = 8.0 \times 10^4$ $s^{-1}cm^{-2}$ とした。図 2(a)に、ドレイン端におけるチャンネル内ポテンシャルのダブルミキシング成分の周波数特性を示す。ここではソース・ドレイン間を無印加としている。この結果から、テラヘルツ帯においてプラズモン非線形性を用いて周波数下方変換信号が得られること、入出力周波数とプラズマ周波数を近づけることでプラズモンの共鳴効果により出力強度が増大することが確認された。また、図 2(b)は差周波数がプラズマ周波数と一致する領域における出力強度の、電子ドリフト速度依存性を示している。電子ドリフト速度の増加（直流電流注入）に伴い共鳴周波数におけるピークの線幅が狭窄化していることが確認された。

3. プラズモニック・ダブルミキシングの変換利得

次に、非対称境界条件を修正してドレイン端に 50Ω 負荷抵抗を接続した系を考え、負荷抵抗に出力される信号強度と光入力強度の比であるダブルミキシング変換利得を求めた。図 3(a)に二光波合計 3 dBm 入力時のダブルミキシング変換利得の周波数特性を示す。 $\Delta\Omega > \omega_{RF}$ の領域に着目すると、-40 dB を超える変換利得を差周波 0.1 THz のダブルミキシング ($\Delta\Omega / 2\pi = 0.85$ THz, $\omega_{RF} / 2\pi = 0.75$ THz) にて得ることができた。また、図 3(b)は変換利得の電子ドリフト速度依存性を示しており、InGaAs チャンネルで実現可能な電子ドリフ

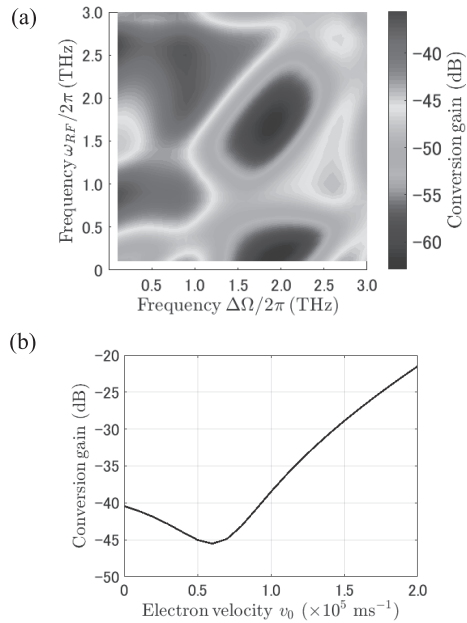


図 3 ダブルミキシング変換利得の(a)周波数特性と、(b) $\Delta\Omega / 2\pi = 0.85$ THz, $\omega_{RF} / 2\pi = 0.75$ THz における変換利得の電子ドリフト速度依存性。

ト速度の範囲内で、-25 dB を超える変換利得が確認された。この変換利得の向上は直流電流注入による狭窄化効果に由来していることから、二次元プラズモンの共鳴効果と狭窄化効果を合わせることで変換利得の増大を実現できることを示している。

4. まとめ

二次元プラズモンを動作原理としたテラヘルツ帯プラズモニック・ダブルミキシングの理論モデルを構築し、光-無線周波数下方変換ミキサとしての有用性を理論的に検証した。流体力学モデルを用いた解析の結果、二次元プラズモンの流体非線形性によってテラヘルツ帯でダブルミキシング出力が生成されること、プラズモン共鳴効果並びに直流電流注入による狭窄化効果で出力強度が増大することを明らかにし、さらに周波数下方変換ミキサとして十分な変換利得を得られることを示した。

文献

- [1] K. Iwatsuki *et al.*, *Proc. SPIE* **93870J**, pp. 93870J-1-8 (2015).
- [2] D. Veksler *et al.*, *Phys. Rev. B* **73**, pp. 125328-1-10 (2006).
- [3] M. Dyakonov and M. Shur, *IEEE Trans. Electron Devices* **43**, pp. 380-387 (1996).
- [4] Y. Omori *et al.*, in *OFC 2019, OSA Tech. Digest*, paper Th3B.5 (2019).