

2次元プラズモン共鳴効果を利用した室温動作高効率テラヘルツ帯フォトミキサーの研究開発 (041410001)

Development of room-temperature operating high-efficiency terahertz photomixers employing two-dimensional plasmon resonance

研究代表者

尾辻 泰一 東北大学電気通信研究所
Taiichi OTSUJI RIEC, Tohoku University

研究分担者

末光 哲也[†] 佐野 栄一^{††} 浅野 種正^{†††}
Tetsuya SUEMITSU[†] Eiichi SANO^{††} Tanemasa ASANO^{†††}
[†]東北大学電気通信研究所 ^{††}北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター
^{†††}九州大学大学院システム情報科学研究院
[†]RIEC, Tohoku University ^{††}RCIQE, Hokkaido University ^{†††}ISEE, Kyushu University

研究期間 平成16年度～平成19年度

本研究開発の概要

テラヘルツ帯コヒーレントCW電磁波の発生・制御機能を有する集積化が可能なデバイス技術を開拓することを目的として、半導体2次元電子システムのプラズモン共鳴励振と電磁波結合モード輻射を動作原理とする新規な室温動作高効率テラヘルツ帯フォトミキサーの研究開発を実施した。電磁波放射効率の向上に有効な独自の素子構造を導入し、GaAs系ヘテロ接合半導体集積加工プロセスによる試作の結果、自励発振モードでは、0.5～6.5THz、 μW オーダの室温放射を電力変換効率 10^{-3} で実現した。従来の電子デバイス型素子に比して電力変換効率で1桁程度の向上、周波数帯域で3倍以上の広帯域化を達成した。フォトミキシングによる光注入同期での単色コヒーレントCW電磁波放射には至らなかったが、光注入同期の確かな兆候を確認できた。予想以上の強力かつブロードな自励発振を狭帯域化する超周期回折格子構造を導入した現在進行中のInP系材料による試作評価を経て、10THz、ミリワット級の目標性能が達成できると期待される。

Abstract

This project has been aimed to develop a highly efficient photomixer that can emit terahertz radiation from photoexcited plasmons of two-dimensional electrons in semiconductor. A patent-pending structure was introduced to improve the radiation power/efficiency. GaAs-based fabricated samples demonstrated broadband (0.5-6.5 THz, 3 times higher than ever), intense ($\sim\mu\text{W}$), efficient (10^{-3} , one order higher than ever) emission at room temperature. Although injection-locked coherent monochromatic CW radiation has not yet been obtained, its certain symptom was observed in photomixing operation. Further advancement with a novel super-grating structure and InP material systems will realize the initial performance objective of a mW-order output over 10-THz bandwidth.

1. まえがき

永らく未開拓領域とされたテラヘルツ(THz)帯の研究開発が活発化している。今後情報通信分野への応用には集積型デバイスシステムの実現が不可欠である。本研究開発では、THz帯コヒーレントCW電磁波の発生・制御機能を有する集積化が可能なデバイス技術を開拓することを目的として、半導体2次元電子システムのプラズモン共鳴励振と電磁波結合モード輻射を動作原理とする新規な室温動作高効率THz帯フォトミキサーの開発に挑んだ。本稿では、試作素子による動作検証結果と展望を述べる。

2. 研究内容及び成果

提案するプラズモン共鳴型素子は、2重回折格子型ゲート電極と縦モード共振器を高電子移動度トランジスタ(HEMT)に組込んだ独自構造により、非放射プラズモンから放射モード電磁波への変換効率と放射利得の向上が可能である。ゲート回折格子には放射強度向上が望める半導体2次元電子ガス(2DEG)層を導入し、GaAs系ヘテロ接合集積加工プロセスを利用して試作した(図1)。

試作素子に適切なゲートバイアス V_{G1} 、 V_{G2} 条件下で直

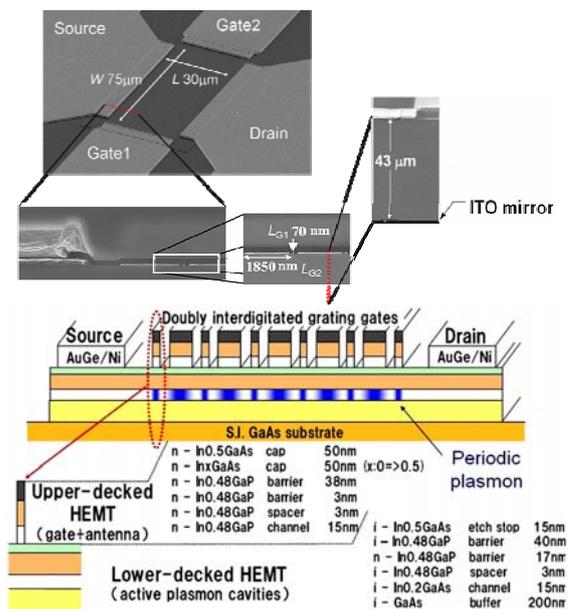


図1 試作素子のSEM写真(上)と断面構造(下)

流ドレインバイアス V_{DS} を印加すると、自励発振による $0.5 \sim 6.5 \text{ THz}$ のブロードな電磁波放射が得られた。2DEG ゲート素子(図 2 右)からは金属ゲート素子(図 2 左)より 1 桁高い μW オダの放射強度が室温下で得られた。ゲート回折格子のプラズモン特性周波数を 2 次元プラズモン回折格子のそれと同調させることで、放射効率を改善できるという理論予測を実証した。この自励発振は、詳細な数値解析の結果、電子ドリフト流がプラズモン不安定性や熱的プラズモン励起を生じせしめた結果であると推定できる。

次に、試作素子の $1.5 \mu\text{m}$ フェムト秒レーザ照射時の電磁波放射過渡応答を測定した。適切なバイアス条件下にて、2 次元プラズモンの分散特性・モードを反映した THz 放射スペクトルの室温観測に初めて成功した。縦型共振機構によるプラズモン再励起効果も確認できた(図 3)。

続いて、本研究の最終目標であるフォトミキシング動作の検証を行った。 $1.5 \mu\text{m}$ CW レーザ 2 光波混合照射に対する放射スペクトルには明瞭な周波数引込みの兆候は認められるものの、光注入同期による単一波長 CW 放射には至らなかった(図 4)。

フォトミキシング動作阻害要因には、(i) $1.5 \mu\text{m}$ 帯光子は GaAs 系材料では励起寿命が極めて長い 2 光子過程でプラズモンを励起するため THz 変調が微弱、(ii) V_{DS} による 2DEG 濃度の単調分布に伴い、プラズモン共鳴周波数が回折格子に沿って空間分散する結果、自励発振スペクトルのブロードニングが生じ、注入同期を阻害、が考えられる。それらの解決のため、スペクトル狭窄化が可能な超周期

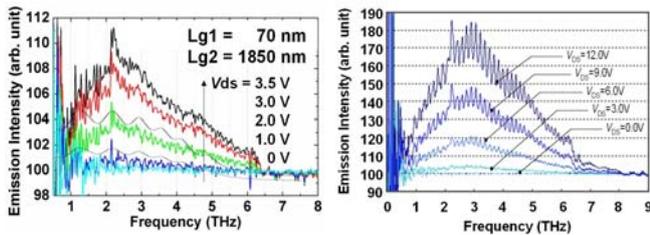


図 2 自励発振放射特性。左: 金属ゲート、右: 2DEG ゲート

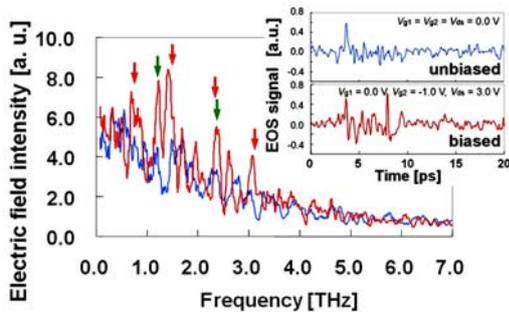


図 3 フェムト秒レーザ照射時の電磁波放射過渡応答

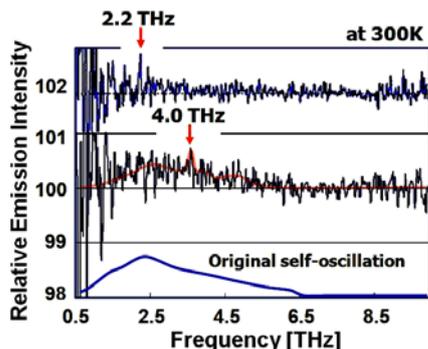


図 4 フォトミキシング時の相対放射強度と周波数引込効果

回折格子ゲート構造を新規考案し、光電子寿命の短い直接遷移可能な InP 系材料に導入して試作を行った。現在評価・検証を進めているところであり、目標性能の実現が期待される。また、放射指向性の向上を図るために、2 重回折格子ゲートと広帯域自己補対アンテナを容量性で密結合した 3 次元左手・右手複合型導波路構造の集積化も試みている。デバイス実用化に向けたこれらの施策が成功した暁には、 $1 \sim 10 \text{ THz}$ を 10 mW 級出力での実現が達成できるものと見込んでいる(図 5)。

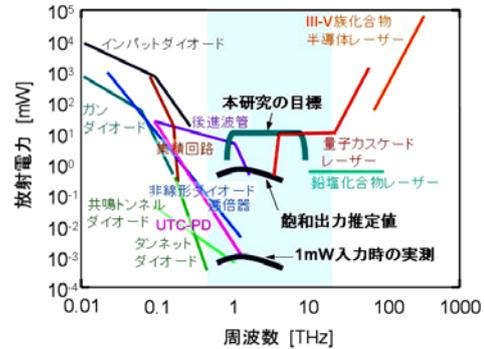


図 5 本研究成果の位置づけと今後の方向

3. むすび

半導体 2 次元プラズモン共鳴は、室温動作コヒーレント THz 電磁波放射のシーズとして十分なポテンシャルと実用性を有していることを実証した。今後は、集積型光源実用化に向けて微力ながら尽くしていく所存である。

【誌上发表リスト】

- [1] T. Otsuji, M. Hanabe, O. Ogawara, "Terahertz plasma wave resonance of two-dimensional electrons in InGaP/InGaAs/GaAs high-electron mobility transistors," Appl. Phys. Lett. Vol.85 No.11 pp. 2119-2121 (2004.9.13.)
- [2] T. Otsuji, M. Hanabe, T. Nishimura, E. Sano, "A grating-bicoupled plasma-wave photomixer with resonant-cavity enhanced structure," Opt. Express Vol. 14 No. 11 pp. 4815-4825 (2006.5.29)
- [3] T.Otsuji, Y.M.Meiziani, M.Hanabe, T.Nishimura, E.Sano, "Emission of terahertz radiation from InGaP/InGaAs/GaAs grating-bicoupled plasmon-resonant emitter," Solid State Electron. Vol.51 Iss.10 pp. 1319-1327 (2007.8.22)

【申請特許リスト】

- [1] 尾辻、佐野、テラヘルツ帯電磁波放射素子及びその製造方法、日本、2004.9.13.
- [2] 尾辻、佐野、テラヘルツ帯電磁波放射素子及びその製造方法、PCT 出願の全指定国、2005.8.23.
- [3] 尾辻、電磁波放射素子、日本、2008.3.17.

【受賞リスト】

- [1] 花辺充広、IGNOIE-COE06&SOIM-COE06 Best Presentation Award, "Room-temperature emission of terahertz radiation from InGaP/InGaAs/GaAs grating-bicoupled two-dimensional plasmon-resonant photomixers", 2007.1.25.

【報道発表リスト】

- [1] "東北大学、新原理半導体電子デバイスで室温動作テラヘルツ帯電磁波放射に成功"、日経プレスリリース、2006.6.28.
- [2] "テラヘルツ波室温で放射成功 東北大などプラズモン共鳴利用"、日刊工業新聞、2006.6.28.
- [3] "東北大が新技術・超高速の無線通信が可能"、宮城放送テレビ OH!パンドス、2006.6.28.

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.otsuji.riec.tohoku.ac.jp>