

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.8 テラヘルツ全般

2024年9月20日(金) 9:00 ~ 12:00 皿 A34 (朱鷺メッセ3F)

[20a-A34-1~11] 3.8 テラヘルツ全般

有川 敬(京大)、唐 超(東北大)

◆ 奨励賞エントリー

9:00 ~ 9:15

[20a-A34-1]

AIN 基板を用いた片面金属導波路 GaN 系 THz-QCL の導波路解析

○(M1)金子 瑛^{1,2}、藤川 紗千恵^{1,2}、矢口 裕之¹、平山 秀樹²(1.埼玉大学、2.理研)

◆ 奨励賞エントリー

9:15 ~ 9:30

[20a-A34-2]

GaN系10THz帯量子カスケードレーザー光利得のドーピング濃度依存性

○(M1)高橋 瞳瑠^{1,2}、王 利¹、藤川 紗千恵^{1,2}、矢口 裕之²、平山 秀樹¹(1.理研、2.埼玉大院理工)

9:30 ~ 9:45

[20a-A34-3]

エピタキシャルグラフェンFETによるTHz検出のキャリアダイナミクス

○田村 紘一^{1,2,3}、工藤 大佳^{1,2}、内ヶ崎 新之介^{1,2}、唐 超^{1,4}、佐藤 昭¹、吹留 博一¹、瀧田 佑馬⁵、南出 泰壘⁵、尾辻 泰一¹(1.東北大通研、2.東北大院工学研究科、3.学振特別研究員、4.東北大学際研、5.理研光量子工学研究センター)

9:45 ~ 10:00

[20a-A34-4]

エピタキシャルグラフェンFETのゲート読み出しに基づく新たな検出メカニズム

○工藤 大佳^{1,2}、田村 紘一^{1,2,3}、関 宏信^{1,2}、内ヶ崎 新之介^{1,2}、唐 超^{1,4}、吹留 博一¹、瀧田 佑馬⁵、南出 泰壘⁵、佐藤 昭¹、尾辻 泰一¹(1.東北大通研、2.東北大院工学研究科、3.学振特別研究員、4.東北大学際研、5.理化学研究所)

10:00 ~ 10:15

[20a-A34-5]

単ゲートグラフェンチャンネル電界効果トランジスタを用いた1THz帯の光ダブルミキシング

○内ヶ崎 新之介^{1,2}、田村 紘一^{1,2,3}、唐 超^{1,4}、佐藤 昭¹、吹留 博一¹、瀧田 佑馬⁵、南出 泰壘⁵、尾辻 泰一¹(1.東北大通研、2.東北大学院工、3.学振特別研究員、4.東北大学際研、5.理研RAP)

10:30 ~ 10:45

[20a-A34-6]

P型変調ドーピングGaAs/AlGaAsヘテロ構造を用いたMEMS共振器の特性改善に関する検討

○高橋 和宏¹、中西 篤司¹、里園 浩¹、長井 奈緒美²、張 壘³、平川 一彦²(1.浜ホト中研、2.東大生研・ナノ量子機構、3.東京農工大)

10:45 ~ 11:00

[20a-A34-7]

超伝導ジョセフソンプラズマエミッタからの広帯域テラヘルツ周波数変調放射

小林 亮太¹、宮本 将志¹、柳生 望光¹、辻本 学²、○掛谷 一弘¹(1.京大院工、2.産総研)

11:00 ~ 11:15

[20a-A34-8]

オフセットリングスロットアンテナ集積共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器からの2THzを超える高調波の発生

○吉田 裕二¹、佐藤 太一¹、浅田 雅洋¹、鈴木 左文¹ (1.東工大)

11:15 ~ 11:30

[20a-A34-9]

共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ波増幅の数値解析

○猪瀬 裕太¹、富士田 誠之¹ (1.阪大基礎工)

11:30 ~ 11:45

[20a-A34-10]

導波管キャビティを用いた共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器の広帯域化

辻村 凜太¹、西田 陽亮²、鶴田 一魁²、伊藤 弘³、○有川 敬^{1,4} (1.兵庫県立大工、2.ローム株式会社、3.東大理、4.JSTさきがけ)

11:45 ~ 12:00

[20a-A34-11]

マルチモード発振状態の共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器における周波数安定化

○(M1C)田淵 啓士朗¹、伊藤 弘²、鈴木 左文³、有川 敬^{1,4} (1.兵庫県立大工、2.東大理、3.東工大、4.JSTさきがけ)

AIN 基板を用いた片面金属導波路 GaN 系 THz-QCL の導波路解析

Design of single metal plasmon waveguide GaN-based THz-QCL used AIN substrate

理研¹, 埼玉大院理工² ○(M1)金子 瑛^{1,2}, 藤川 紗千恵^{1,2}, 矢口 裕之¹, 平山 秀樹¹

RIKEN¹, Saitama Univ.² ○Akira Kaneko^{1,2}, Sachie Fujikwa^{1,2}, Hiroyuki Yaguchi², Hideki Hirayama¹

E-mail: akira.kaneko.ka@a.riken.jp

GaN 系テラヘルツ量子カスケードレーザ(terahertz quantum-cascade laser (THz-QCL))は、これまでの光利得解析から、1.5~15.5 THz の広い周波数範囲での室温発振が予測されている[1]。我々は2014年に、サファイア基板上に片面金属導波路 GaN/AlGaIn THz-QCL を作製し誘導放出発光を確認したが発振には至らなかった。その原因は、サファイア基板は 3THz よりも高周波側で光吸収があり、また、サファイアの THz における屈折率は GaN の屈折率よりも大きいため片面金属導波路では光閉じ込めができないためであった[2]。今回、THz において透明で屈折率も GaN より低い AIN 基板を用いた片面金属導波路 GaN 系 THz-QCL の導波路解析を行ったので報告する。

解析は、複素屈折率を有する導波路の解析ソフトを用いて行い、金属、及びドーピングした半導体層の複素屈折率はドルーデモデルを用いて算出した。3THz における GaN および AIN の屈折率はそれぞれ 3.25、及び 3.06 であるため、片面金属導波路における光閉じ込めが可能である。構造は、AIN 基板の上の n+GaN プラズモン層、GaN 系 QCL 活性層コア、n+GaN コンタクト層、及び金属層として Au を仮定した。両面金属 GaN 系 QCL の解析はすでに行われ[3]、ほぼ 100% の光閉じ込め係数が得られている[3]。今回、QCL コア層ドーピング濃度、プラズモン層の層厚とドーピング濃度に対する導波路ロスと光閉じ込め係数をそれぞれ求めた。その結果、QCL コア層の平均ドーピング濃度は $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以下、プラズモン層のドーピング濃度と膜厚はそれぞれ $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以下、及び 300nm 以下の時に導波路損失が小さく、QCL の発振に適していることが分かった。詳細は当日報告する。参考文献：[1]平山、王利他、オプトロニクス 2023 年 5 月号、[2]平山他、レーザー研究、44 (2016)、[3]K. Wang et al, JJAP, 57 081001(2018)

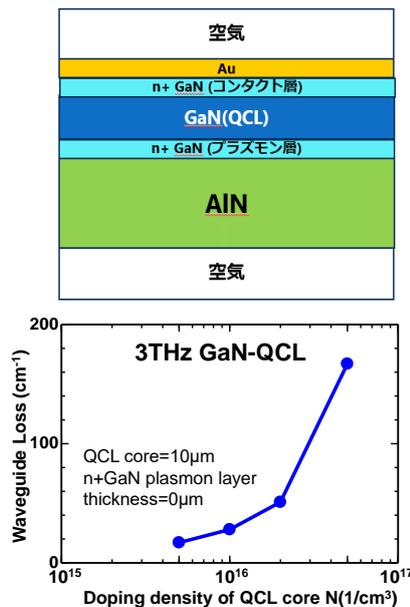


図 1 片面金属導波路 GaN-QCL の構造モデルと導波路損失の QCL 層ドーピング依存性

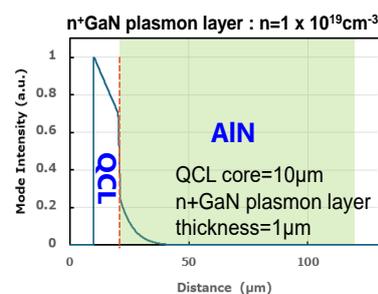
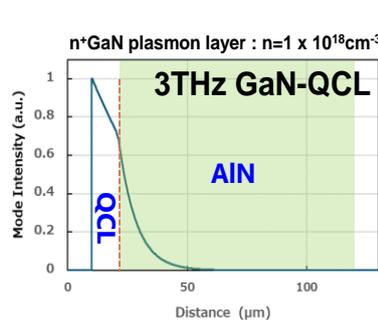


図 2 プラズモン層のドーピング濃度による光閉じ込め効果の変化

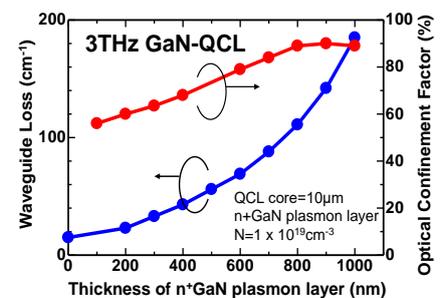
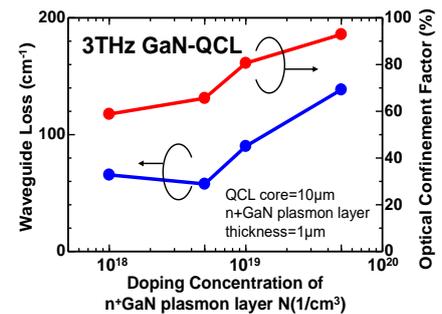


図 3 プラズモン層の膜厚 (上) とドーピング濃度 (下) に対する導波路損失と光閉じ込め係数

GaN 系 10THz 帯量子カスケードレーザー光利得のドーピング濃度依存性

Doping concentration dependence of optical gain of 10 THz-band GaN-based QCL

理研¹, 埼玉大院理工²

(M1)高橋 瞳瑠^{1, 2}, 王 利¹, 藤川 紗千恵^{1, 2}, 矢口 裕之², 平山 秀樹¹

RIKEN¹, Saitama Univ.²

°Airu Takahashi^{1,2}, Li Wang¹, Sachie Fujikawa², Hiroyuki Yaguchi², Hideki Hirayama¹

E-mail: airu.takahashi@riken.jp

テラヘルツ量子カスケードレーザー(THz-QCL)は、超小型、高効率・高出力、狭線幅、長寿命、連続発振、安価、高耐久などの優れた THz 光源として注目されさまざまな応用が期待されている。GaAs 系半導体は、電子-LO フォノン散乱のエネルギー (E_{LO}) が 36meV と室温の kT の値に近くまた 5-12THz 帯に光吸収帯があるため、室温発振が難しく、動作周波数領域は 1.2~5.4 THz に限られている。これに対し、GaN 系半導体の E_{LO} は 92meV と大きいため、1.5~15.5 THz の広い領域で室温発振が予測されている[1]。今回我々は、GaN/AlGaIn 系 THz-QCL の光利得における注入層ドーピング濃度依存性を解析したので報告する。

構造は、GaN/Al_{0.13}Ga_{0.87}N 共鳴トンネル注入機構・3量子井戸3準位構造（注入準位、発振上位準位、発振下位準位）を仮定し（図1）、発振周波数は 10THz となるように設計した。ドーピングは注入層のみに仮定した。解析は、非平衡グリーン関数 (NEGF) 法を用い、電子-電子散乱、電子 LO フォノン散乱、不純物散乱、界面ラフネス散乱などを含み、高速散乱過程による量子準位のレベルブロードニングの効果をとり込んだ解析を行った。まず、10K から 320K まで動作温度を変化し、利得が最大となるようにバイアスを最適化して最大光利得を求めた。その結果、300K において 30cm⁻¹ の光利得を確認した。次に、温度を 10K に固定しドーピング濃度を変化させて光利得を求めたところ 2×10^{17} cm⁻³ の時に最大光利得が得られた。高い光利得を得るためにはドーピングを増やして電子濃度を増加させることが有効である。一方で、不純物散乱、光吸収も増え、そのため最適濃度があると考えられる。また今回、バンドベンディングによる準位のディチューニングを含めていないため、それを解析すればもっと高い最適ドーピング濃度が予測される。詳細は当日報告する。参考文献:

[1]平山、王利他、オプトロニクス 2023 年 5 月号

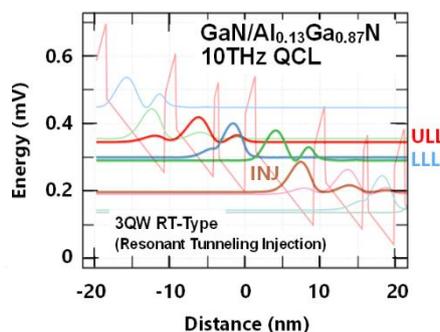


図1 共鳴トンネル注入型 GaN/AlGaIn THz-QCL のバンド図

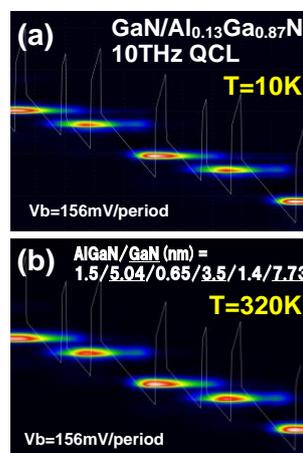


図2 動作温度 20K と 320K における電流密度マッピング

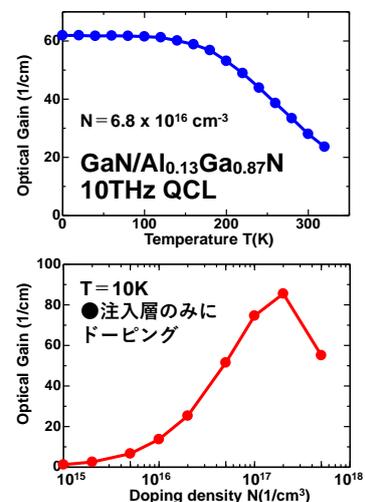


図3 光利得の動作温度、及びドーピング濃度依存性

エピタキシャルグラフェン FET による THz 検出のキャリアダイナミクス

THz Detection by Epitaxial Graphene FET and Carrier Dynamics

○田村 紘一^{1,2,3}, 工藤 大佳^{1,2}, 内ヶ崎 新之介^{1,2}, 唐超^{1,4},

佐藤 昭¹, 吹留 博一¹, 瀧田 佑馬⁵, 南出 泰亜⁵, 尾辻 泰一¹

1. 東北大学電気通信研究所, 2. 東北大学大学院工学研究科, 3. 日本学術振興会特別研究員

4. 東北大学学際科学フロンティア研究所, 5. 理化学研究所光量子工学研究センター

K. Tamura^{1,2,3}, H. Kudo^{1,2}, S. Uchigasaki^{1,2}, C. Tang^{1,4},

A. Satou¹, H. Fukidome¹, Y. Takida⁵, H. Minamide⁵ and T. Otsuji¹

1 RIEC, Tohoku University, 2 Graduate School of Engineering, Tohoku University,

3 FRIS, Tohoku University, 4 JSPS Research Fellow, 5 RAP, RIKEN

E-mail: koichi.tamura.t8@dc.tohoku.ac.jp

我々は、二次元材料グラフェンの優れた光電子およびプラズモニック物性に着目し、グラフェンをチャネルとする電界効果型トランジスタ (GFET) によるテラヘルツ (THz) 検出器の創出を推進している。グラフェン成膜には量産化が期待され高品質かつ大面積な成長が可能な熱分解法 [1] を採用している。これまで、独自の非対称二重格子ゲート (ADGG) 構造を採用した検出器による、プラズモン・光熱電効果 (PTE) を原理とした高速高感度 THz 検出 [2] や、ゲートスタックプロセスの新規評価手法の提案と実験実証 [3] など、量産型 THz 検出器としての可能性を拓いてきた。本発表では、新たに試作した GFET を対象として光注入型 THz 波パラメトリック光源 (is-TPG) [4] を用いて THz 検出実験を行い、特定のバイアス条件において特異な光応答波形を観測した。その結果と考察について報告する。

Fig.1(a) に観測した時間応答波形を示す。ゲート電圧を $V_{GS} = +10\text{ V}$ に固定した状態で、ドレイン電圧を $V_{DS} = +1 \sim +3\text{ V}$ に変化させたところ、ピークが 2 つ存在する二峰性の波形が観測された。Fig.1(a) の挿入図に示すデバイスの電流電圧特性より、チャネル内ゲート電極下には電子が、アンゲート領域にはホールが存在していることが分かり、それぞれの成分の重ね合わせが出力として観測されたと考えられる。そこで、2 つの Gaussian 関数の和 $y = y_1 + y_2$ でフィッティングを行った。Fig.1(b) に示す通り、フィッティングした各成分 y_1 , y_2 の半値全幅 (FWHM) には差異が生じている。これは、チャネル内に存在する電子とホールの総量が異なることで THz 光照射による昇温の度合いに差異が生じ、高温になったキャリアの冷却に時間を要し、その結果、パルスに広がりが生じたものと推察される。考察の詳細や関連する分析結果については当日報告する。

本研究は JSPS 科研費 #21H01380, #21H04546, #23KJ0213, NICT-B5G 委託研究 #JPJ012368C01301 の助成を受けた。本デバイス試作の一部はナノ・スピン実験施設にて行われた。

参考文献 [1] H. Fukidome *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 041605 (2012). [2] K. Tamura *et al.*, APL Photonics **7**, 126101 (2022). [3] H. Seki *et al.*, The 70th JSAP Spring Meeting 2023, 17a-B309-7 (2023). [4] Y. Takida *et al.*, Opt Express **30**, 11217 (2022).

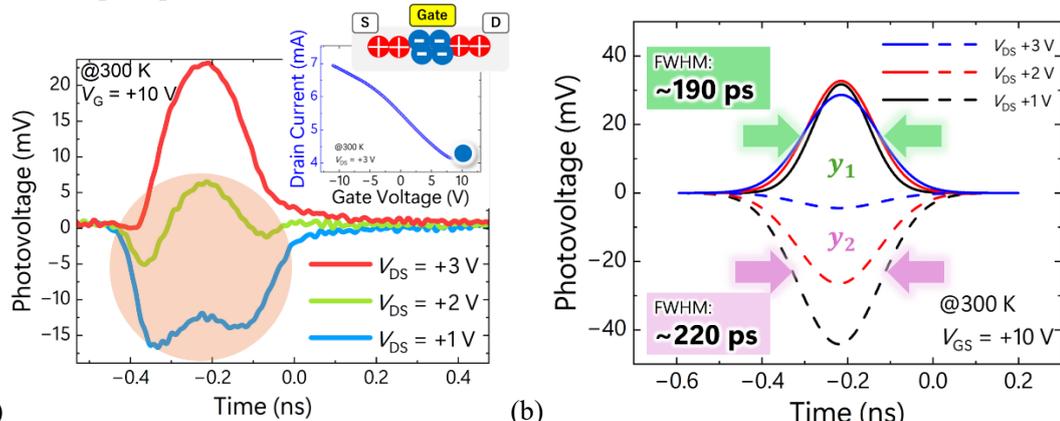


Fig.1 (a) Measured temporal THz photoresponse with a fixed gate bias $V_{GS} = +10\text{ V}$, inset shows the measured transfer characteristic. (b) Fitting results for y_1 and y_2 .

エピタキシャルグラフェン FET のゲート読み出しに基づく新たな検出メカニズム

Novel THz Detection Method Based on Gate Readout of Epitaxial Graphene FET

東北大学電気通信研究所¹, 東北大学大学院工学研究科², 日本学術振興会特別研究員³,

東北大学学際科学フロンティア研究所⁴, 理化学研究所光量子工学研究センター⁵

○工藤大佳^{1,2}, 田村紘一^{1,2,3}, 関宏信^{1,2}, 内ヶ崎新之介^{1,2}, 唐超^{1,4}, 吹留博一¹,

瀧田佑馬⁵, 南出泰亜⁵, 佐藤昭¹, 尾辻泰一¹

RIEC, Tohoku Univ.¹, Tohoku Univ. Graduate School of Eng², JSPS Research Fellow³

FRIS, Tohoku University⁴, RIKEN RAP⁵

○H.Kudo^{1,2}, K.Tamura^{1,2,3}, H.Seki^{1,2}, S.Uchigasaki^{1,2}, C.tang^{1,4}, H.fukidome¹,

Y.takida⁵, H.Minamide⁵, A.Sato¹ and T.Otsuji¹

e-mail: kudo.hiroyoshi.s1@dc.tohoku.ac.jp

我々は、B5G 高速テラヘルツ (THz) 無線通信システムを実現するため、エピタキシャルグラフェンチャネル電界効果型トランジスタ (EG-FET) をベースとした高速・高感度 THz 検出器の研究を行っている。我々は先行研究において、独自の非対称二重格子ゲート (ADGG) 構造を特徴とした ADGG-EG-FET を従来のドレイン読み出しで動作させて高速かつ高感度な THz 検出を実証した[1]。一方で、化合物半導体ヘテロ接合による高電子移動度トランジスタ (HEMT) において「三次元整流効果」と称する新しい超高感度 THz 波検出機構を発見した[2]。今回、金属/絶縁体/グラフェンによるトンネルダイオード構造 (レクテナ)[3,4]に着想を得て、EG-FET のゲート-チャネル間にレクテナ構造を実装して三次元整流効果を発現させる手段を着想し、デバイスを試作・評価した。本研究では、レクテナ構造を実装した EG-FET に対する THz 波検出応答測定実験の結果と、その考察について報告する。

光注入型 THz 波パラメトリック発生器[5]を準連続パルス光源として、THz パルス検出測定を行った。中心周波数を 0.95THz に設定し、ゲート電極から出力される光起電圧パルス波形を高速オシロスコープで測定した。ドレインソース電圧 $V_{DS} = 0 V$ に固定し、ゲート電圧を $0 \sim +3 V$ まで変化させ、光起電圧の時間応答波形を測定した (Fig.1 (a))。出力光起電圧はゲート電圧の上昇と正の相関を示した。次に、ゲートバイアスに対する THz 検出波形の応答速度依存性を調べた (Fig.1(b))。ゲート電圧の上昇と共に半値全幅 (FWHM) が減少し応答速度が速くなっており、 $V_G \approx +3 V$ 付近では約 180 ps の応答速度を示した。また、ゲート電圧の印加により立ち下がり側の半値半幅 (HWHM) の減少が立ち上がり側に比して強く、FWHM の減少に寄与していることが分かった。分析結果の詳細は当日報告する。

本研究は JSPS 科研費 #21H01380, #21H04546, #23KJ0213, NICT-B5G 委託研究 JPJ012368C01301 の助成を受けた。

参考文献 [1] K. Tamura *et al.*, *APL Photon.* **7**, 126101 (2022). [2] A. Satou *et al.*, *Nanophotonics* **12**, 4283 (2023). [3] A. Hemmetter *et al.*, *ACS Appl. Electron. Mater.* **3**, 3747 (2021). [4] K. Shiga *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, SIID03 (2020). [5] Y. Takida *et al.*, *Opt. Exp.* **30**, 11217 (2022).

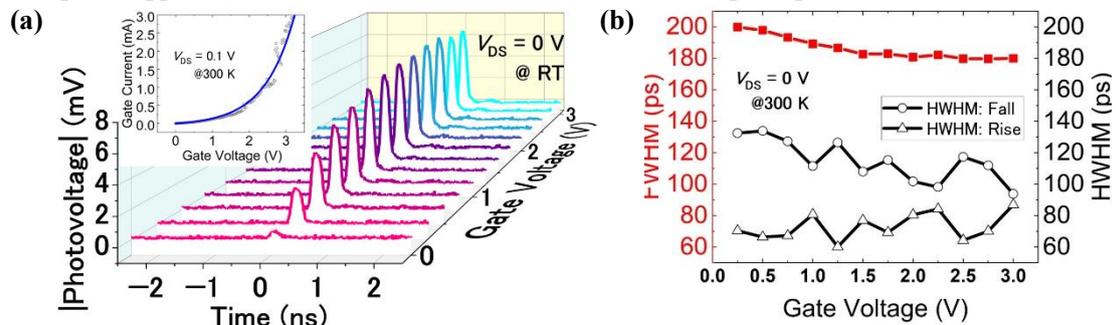


Figure1(a) The temporal output waveform dependencies on gate voltage under $V_{DS} = 0 V$. (b)The FWHM and HWHM dependencies on gate voltage.

単ゲートグラフェンチャネル電界効果トランジスタを用いた 1THz 帯の光ダブルミキシング

Photonic Double Mixing in the 1-THz Range by a Single-Gate Graphene-Channel Field-Effect Transistor

¹ 東北大通研, ² 東北大学院工, ³ 日本学術振興会特別研究員, ⁴ 東北大学際研,
⁵ 理研RAP ○内ヶ崎 新之介^{1,2}, 田村 紘一^{1,2,3}, 唐 超^{1,4}, 佐藤 昭¹, 吹留 博一¹,
瀧田 佑馬⁵, 南出 泰亜⁵, 尾辻 泰一¹

¹ RIEC, Tohoku Univ., ² Tohoku Univ. Graduate School of Eng., ³ JSPS Research Fellow, ⁴ FRIS,
Tohoku Univ., ⁵ RIKEN RAP ○Shinnosuke Uchigasaki^{1,2}, Koichi Tamura^{1,2,3}, Chao Tang^{1,4},
Akira Satou¹, Hirokazu Fukidome¹, Yuma Takida⁵, Hiroaki Minamide⁵, and Taiichi Otsuji¹

E-mail: shinnosuke.uchigasaki.s6@dc.tohoku.ac.jp

我々は、テラヘルツ(THz)帯無線通信の実現に向けてフルコヒーレント超広帯域光周波数変換の研究を行っている[1]。近年UTC-PD集積HEMTによる300 GHz帯でのダブルミキシングが実証された[2]。しかしUTC-PD集積HEMTでは、7Gクラスの無線通信に対応する1 THzクラスのキャリア周波数領域への到達には大きな困難が予測される。その解決策として、キャリア輸送特性に優れるグラフェンチャネルとするFET: Graphene FET (GFET) の導入が検討されている。我々は過去にGFETを用いて100 GHz帯でのダブルミキシング実証に成功している[3]。今回、1 THz帯でのダブルミキシング実証に初めて成功したので報告する。

図1(a)に示すように、ゲート長 $L_G = 500$ nmの単ゲート構造を持つGFETを作製した。グラフェンはエピタキシャル成長法により成膜した[4]。今回の光ダブルミキシング実験では、高強度準連続波THzパルスを発生させるinjection-seeded terahertz-wave parametric generator (is-TPG) [5] をRFデータ信号とし、2つの半導体レーザー(LD)が発生する差周波成分を光混合で発生させてRF局部発振 (RF-LO) 信号として用いた。それらをデバイスに照射し、中間周波数 (IF) 信号が両者の差周波数: 8.4 GHzとなるように、is-TPGの中心周波数を950 GHz、2つのLDの差周波を941.64 GHzに、それぞれ設定した。生成されるIF信号はオシロスコープにて測定した。

オシロスコープによる測定波形を図(b)に示す。RF-LO信号が未入力状態のバックグラウンド応答を黒線で、RF-LO信号入力時の実応答を赤線で、それぞれ示す。青線は両者の差分である。この差分信号成分を高速フーリエ変換し、Gaussian フィッティングをかけて得られたスペクトルを図(c)に示す。得られたIF信号成分のピーク周波数は予想される差周波数: 8.4 GHzに一致した。以上より、GFETによる1 THz帯での光ダブルミキシング実証に初めて成功した。

本研究はJSPS科研費#16H06361, #18H05331, #20K20349, #21H01380, #23KJ0213, NICT-B5G委託研究JPJ012368C01301の助成を受けた。

参考文献

- [1] A. Satou et al., *J. Lightwave Technol.* **39**, 3341 (2021).
- [2] S. Horiuchi et al., *Teratech 2024 Abstract Booklet*, 61-62, Buffalo, NY, USA, June 13, 2024.
- [3] K. Sugawara et al., *J. Lightwave Technol.* **34**, 2011 (2016).
- [4] H. Fukidome et al., *Appl. Phys. Lett.* **101**, 041605 (2012).
- [5] Y. Takida et al., *Opt. Exp.* **30**, 11217 (2022).

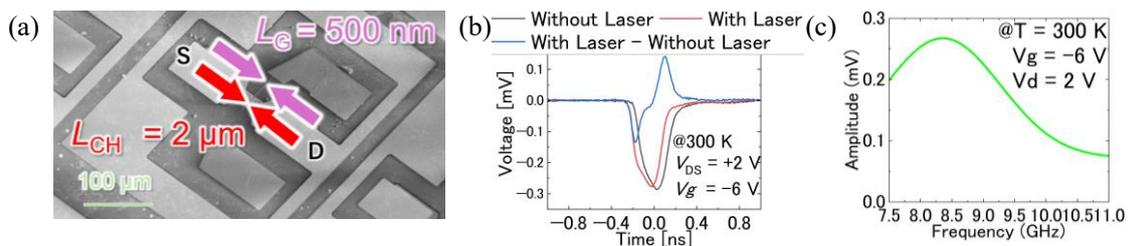


図 1.(a) 試作デバイスの電子顕微写真, (b) オシロスコープによる光応答測定波形とその差分信号成分, (c) (b)の差分信号成分のフーリエスペクトル。

P 型変調ドーパ GaAs/AlGaAs ヘテロ構造を用いた MEMS 共振器の 特性改善に関する検討

Study on improving characteristics of MEMS resonators using p-type modulation doped GaAs/AlGaAs heterostructures

浜松ホトニクス(株)¹, 東大生研・ナノ量子機構², 東京農工大³ ○(B)高橋 和宏^{1,2}, 中西篤司¹, 里園 浩¹, 長井奈緒美², 張 亜³, 平川 一彦²

Hamamatsu Photonics K.K.¹, IIS/INQIE, Univ. of Tokyo², TUAT³, °Kazuhiro Takahashi^{1,2}, Atsushi Nakanishi², Naomi Nagai², Hiroshi Satozono¹, Ya Zhang³, Kazuhiko Hirakawa²

E-mail: kazuhiro.takahashi@hpk.co.jp

新たなテラヘルツ波検出器として、両持ち梁 MEMS 共振器構造を用いたボロメータの開発が進められている。本ボロメータは室温動作・高速応答といった特徴を有している[1]。近年、p 型変調ドーパ GaAs/AlGaAs ヘテロ構造によって生じる二次元正孔ガス(2DHG)層とピエゾ抵抗検出を組み合わせた MEMS 共振器を作製し、mV レベルの共振信号が得られたことが報告された[2]。しかし、上記 MEMS 共振器は n 型ヘテロ構造と同程度のキャリア密度を生成するために、駆動・検出を担うメサ部に Al 濃度の高い Be ドープ $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ 層を採用していた。その結果、フッ酸エッチングで犠牲層を取り除く際、メサ部 $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ 層もエッチングされ、MEMS 共振器が動作不能となるなどの問題があった。この問題はフォトレジスト(PR)でメサ部を保護することで解決可能であるが、PR 存在下でフッ酸エッチングすると、エッチング後の洗浄工程が複雑となる、表面に PR の残渣が発生するなど別の問題が発生した。今回我々は、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造を改良し上記問題が解決可能か検証した。

図 1a に従来ウエハ構造を、図 1b に新規ウエハ構造を示す。フッ酸エッチングのエッチング速度は Al 濃度に依存する[3]。我々はメサ部 AlGaAs 層の Al 濃度を 0.3 に下げ、エッチング速度を数桁小さくすることで、上記問題の解決に取り組んだ。図 2 に図 1b のウエハで作製した MEMS 共振器の共振スペクトルを示す。作製した MEMS 共振器も mV オーダーの共振信号が得られたことから、ボロメータ応用へ展開が可能な特性を有していることが示唆された。

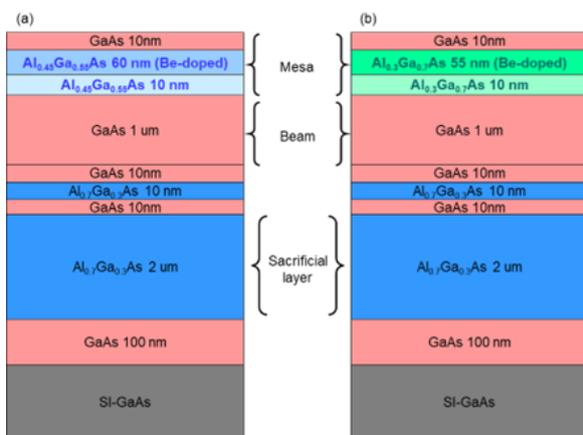


Fig. 1 The structures of (a) conventional wafer and (b) new wafer

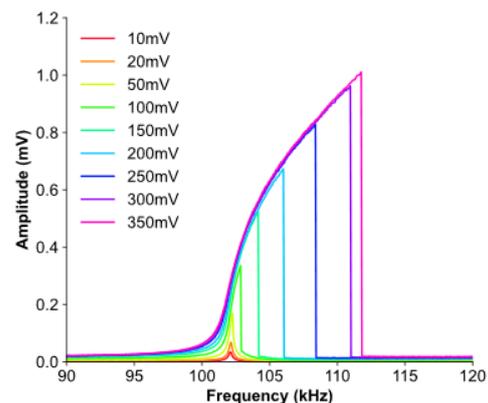


Fig. 2 The resonance spectrum of MEMS resonator fabricated by new wafer

謝辞 本研究開発の一部は総務省 SCOPE(受付番号 JP225006001)の委託を受けたものです。

参考文献 [1] Y. Zhang, et.al., J. Appl. Phys. 125, 151602 (2019). [2] B. Qiu, et.al., The 82nd JSAP Autumn Meeting 2021, 13p-N105-13 (2021). [3] P. Kumar, et.al., Appl. Phys. A 88, 711–714 (2007).

超伝導ジョセフソンプラズマエミッタからの 広帯域テラヘルツ周波数変調放射

Wide-band frequency modulated terahertz radiations from
superconducting Josephson plasma emitters

京大院工¹、産総研²

宮本 将志¹、小林 亮太¹、柳生 望光¹、辻本 学²、[○]掛谷 一弘¹

Kyoto Univ,¹, AIST²

M. Miyamoto¹, R. Kobayashi¹, N. Yagyu¹, M. Tsujimoto², [○]I. Kakeya¹

E-mail: kakeya@kuee.kyoto-u.ac.jp

高温超伝導体固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ発振[1]、ジョセフソンプラズマエミッタ (JPE) は、ジョセフソン接合に加えた電圧に比例して周波数が大幅に変化すること [2]が他のテラヘルツ源には持ち得ない超伝導ジョセフソン接合特有の現象である。一方、サインゴルドン方程式で記述されるジョセフソン接合の本当の面白さは、線形近似を超えた非調和振動の発現にある。テラヘルツ発振実証当初も高次高調波発生が一時報告されたが、その後の検討により否定されており、周波数変換などを含めた非線形現象の観測は学術的な拡がりを与えるだけでなく、デバイス応用にも重要な機能である。

最近、我々は JPE のバイアス電圧に 3 GHz までの高周波変調を加え、830 - 900 GHz において最大 40 GHz の変調幅の周波数変調テラヘルツ波放射を実現した[3]。Fig. 1 は得られた典型的なスペクトルであり、櫛の歯の間隔が変調周波数に一致するという FM スペクトルの特徴を有している。また、変調周波数 10 kHz でのスペクトルと比較すると、3 GHz では発振領域の拡大が観測された。この現象はジョセフソン接合の同期コヒーレンス時間と変調周期の関連から説明できる。また、10 kHz の三角波変調スペクトルからは正弦波の 1 次、3 次周波数の成分が観測された。これらの事実は、JPE がテラヘルツ FM 通信に使えるデバイスであることを意味している。

本講演では、結果の詳細と周波数変調のメカニズムについて、異なるデバイスから得られた最新の実験結果の報告と併せて議論を行う。

[1] L. Ozyuzer et al., *Science*, **318** 1291 (2007).

[2] M. Tsujimoto et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 107006 (2012).

[3] M. Miyamoto, R. Kobayashi, G. Kuwano, M. Tsujimoto, I.K., *Nature Photonics*, **18** 267 (2024)

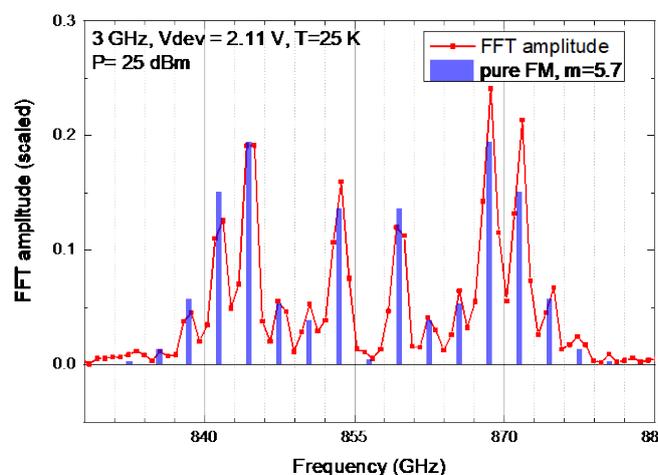


Fig. 1: Frequency-modulated spectrum from 3GHz-modulated bias JPE.

オフセットリングスロットアンテナ集積共鳴トンネルダイオード テラヘルツ発振器からの 2THz を超える高調波の発生

東工大 ◦(M1)吉田 裕二, (M2)佐藤 太一, 浅田 雅洋, 鈴木 左文

Tokyo Tech. ◦Yuji Yoshida, Taichi Sato, Masahiro Asada, Safumi Suzuki

E-mail: yoshida.y.be@m.titech.ac.jp

共鳴トンネルダイオード (RTD) は THz 信号源の有力な候補であり[1], 我々は, スロットアンテナ集積型のデバイスにより 1.98 THz の基本波発振を達成した[2]. さらに高周波化には, RTD の非線形性により発生する高調波を用いるのが効果的である. 今回, 2 次高調波の出力が大きくなるようなデバイス構造を考案し, 2 THz を超える 2 次高調波を得たので報告する.

Fig. 1 にデバイスの構造を示す. このデバイスは, 2 つの RTD と 2 つの安定化抵抗がリングスロットアンテナに集積されている. RTD はリングスロットの中心から θ オフセットされた場所に位置し, これにより 2 つの異なる長さのスロットが形成される. 発振は RTD の微分負性コンダクタンス(NDC)がアンテナの損失を打ち消すことによって可能となり, 基本波発振の周波数は主に短いスロット部分のインダクタンスと RTD のキャパシタンスによって決定される. 長いスロットは放射器として機能し, 半波長共振する周波数で放射が強くなるため, 2 THz 付近の 2 次高調波が共振するような長さに調整した. Fig. 2 にリング半径 $R = 10 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, RTD 面積 $0.67 \mu\text{m}^2$ のデバイスにおける電流電圧特性, および, 測定した基本波と高調波強度のバイアス電圧依存性を示す. RTD はピーク電流密度 $26.4 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$, ピークバレー比 1.85, 負性抵抗領域電圧幅 0.4 V のものを用いた. 基本波は 1.11 THz で得られ, その出力は NDC 領域の中心で大きくなるが, 2.22 THz の 2 次高調波出力は NDC 領域の中心付近では減少している. NDC 領域の中心では RTD の 2 次非線形性が弱くなり 2 次高調波出力は弱くなると考えられるが, 実験で得られた出力のバイアス依存性の概形は理論と一致しており, 確かに 2 次高調波が発生していることが分かった. 残念ながら, 3 次高調波の信号は弱く明瞭なバイアス依存性は観測できなかった. 今後は 3 次高調波について出力が大きくなるようなデバイスを作製し, より高周波な信号の発生に挑戦する.

謝辞: 本研究は, 科研費 (24H00031), JST-CREST (JPMJCR21C4), 文科省 X-NICS (JPJ011438), 文科省 ARIM (JPMXP1224IT0018, JPMXP1224IT0019), および, ロームの支援を受けた.

[1] M. Asada, et al., Sensors, 21, 1384, 2021.

[2] R. Izumi, et al., AIP Advances, 9, 85020, 2019.

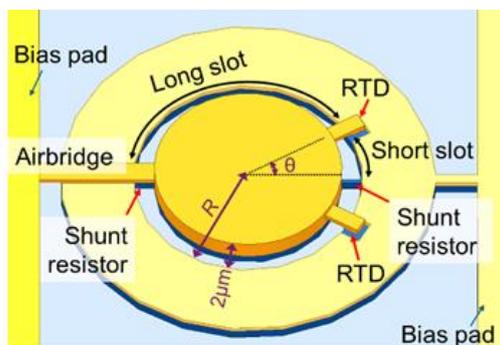


Fig. 1 デバイス構造

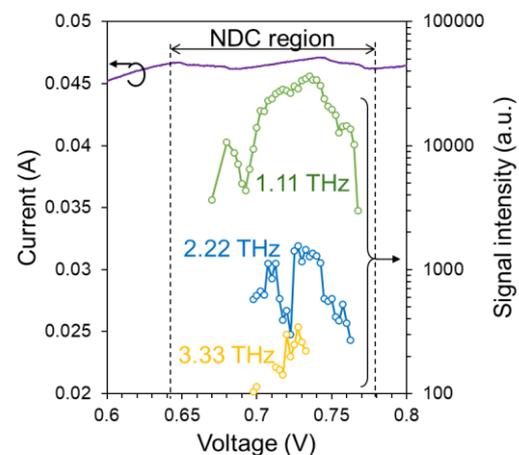


Fig. 2 作製デバイスの電流電圧特性, および, 基本波と高調波のバイアス電圧依存性

共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ波増幅の数値解析

Numerical Analysis of Terahertz Wave Amplification using Resonant Tunneling Diodes

阪大基礎工¹

○猪瀬 裕太¹, 富士田 誠之¹

Graduate School of Engineering Science, Osaka Univ.¹

○Yuta Inose¹, Masayuki Fujita¹

E-mail: inose.yuta.es@osaka-u.ac.jp

共鳴トンネルダイオード (RTD) を組み込んだ小型の電子デバイスは、テラヘルツ波の信号源および検出器として動作することが知られており[1, 2], 増幅機能を有する検波器としても働くことを我々は報告してきた[3]. 一方、マイクロ波帯において、RTD デバイスが増幅器として動作することが報告されている[4]. 今回、我々は RTD が 300 GHz 帯の増幅器として動作することを等価回路シミュレーションによって示したので、報告する。

計算で用いた等価回路を図 1 に示す. 本研究では、RTD 素子をコンダクタンス $G_{\text{RTD}}(V)$ とキャパシタ $C_{\text{RTD}}(V)$ の並列素子とし、伝送線路 CPS と MIM を分布定数回路として取り扱った[1]. ここでは、アンテナのコンダクタンス G_{ant} を RTD 素子の負性微分コンダクタンス G_{RTD} の絶対値よりも僅かに大きくすることによって、全バイアス電圧 V_{DC} において自励発振が生じない状態にした. 3 dB 方向性結合器を通して、周波数 f_0 の連続波を注入し、入力 P_{in} と出力 P_{out} の比率 $P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ から利得 g を算出した. 図 2 に示す利得の周波数依存性から、広い周波数範囲において利得 g が 0 dB を上回る振る舞いが得られた.

本研究の一部は、JSPS 科研費 (22K04217, 24H00031), JST CREST (JPMJCR21C4) の支援を受けた.

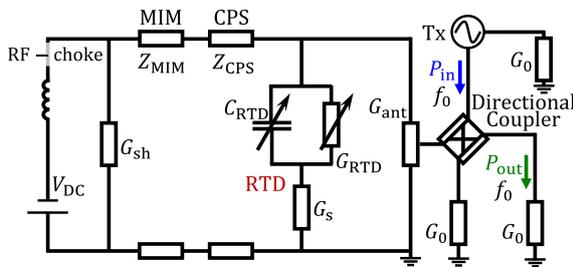


図 1. 計算で用いた等価回路図. 3dB 方向性結合器を通してパワー P_{in} の連続波を RTD に注入し、出力 P_{out} との比率から利得 g を算出する. なお、アンテナのコンダクタンス G_{ant} は周波数に対して一定とし、アンテナと方向性結合器との結合率は 1 とした.

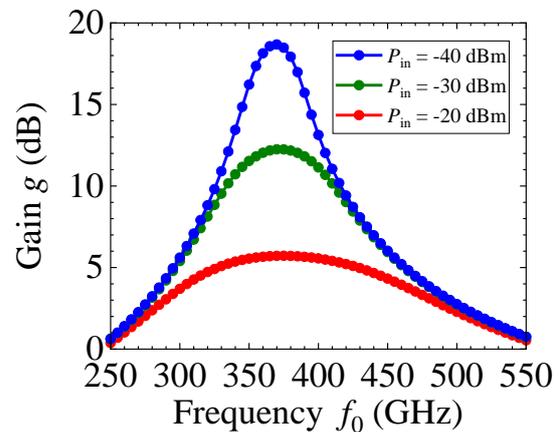


図 2. 利得 g の周波数 f_0 依存性. 広帯域で利得が得られることが分かる.

[1] S. Diebold *et al.*, *Sci. Rep.* **9**, 18125 (2019).

[2] Y. Nishida *et al.*, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **6**, 716 (2016).

[3] A. Oshiro *et al.*, *IEICE Electron. Express* **19**, 20210494 (2022).

[4] J. Lee and K. Yang, *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **27**, 61 (2017).

導波管キャビティを用いた 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器の広帯域化

Broadening the Emission Bandwidth of a Resonant Tunneling Diode Terahertz Oscillator Using a Waveguide Cavity

兵庫県立大工¹, ローム株式会社², 東大理³, JST さきがけ⁴

辻村 凜太¹, 西田 陽亮², 鶴田 一魁², 伊藤 弘³, ◯有川 敬^{1,4}

Univ. of Hyogo¹, ROHM Co., Ltd.², Univ. of Tokyo³, JST PRESTO⁴

Rinta Tsujimura¹, Yosuke Nishida², Kazuisao Tsuruda², Hiroshi Ito³, ◯Takashi Arikawa^{1,4}

E-mail: arikawa@eng.u-hyogo.ac.jp

共鳴トンネルダイオード (RTD) 発振器は室温でテラヘルツ帯の基本波発振が可能な小型半導体デバイスであり、次世代無線通信やセンシング等での利用が期待されている[1]。最近の研究により、キャビティ構造を形成して RTD 発振器の出力を自分自身に戻すと、マルチモード発振することが明らかになっている[2]。しかし、自由空間キャビティでは戻り光受信効率が低く、発振帯域が数 GHz に制限されているのが現状である。そこで本研究では、導波管を用いてキャビティを構成することによりフィードバック効率を上げ、更なる広帯域化を目指した。

図 1 は導波管結合型の RTD デバイス[3]から放射されたテラヘルツ波のスペクトルをヘテロダイン検波法により測定したものである。約 285~315 GHz の間に 6 つの縦モードが観測され、発振帯域は約 30 GHz となった。縦モード間隔の 5.72 GHz から算出されるキャビティ長は 21.7 mm (300 GHz における WR-3 導波管の群屈折率 1.22 を仮定) であり、導波管デバイス内部でキャビティが構成されていることを示唆している。

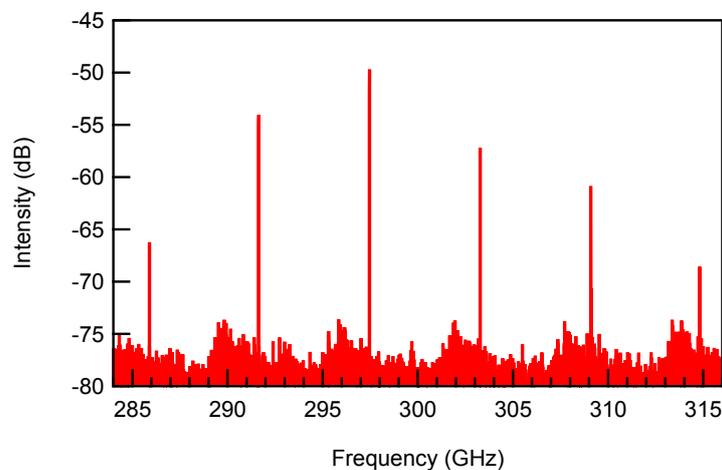


図 1 導波管結合型 RTD 発振器から放射された
テラヘルツ波のスペクトル

[1] M. Asada and S. Suzuki, *Sensors* **21**, 1384 (2021).

[2] T. Hiraoka, Y. Inose, T. Arikawa, H. Ito, K. Tanaka, *Nat. Commun.* **13**, 3740 (2022).

[3] L. Yi et al., *Journal of Lightwave Technology*, **39**, 7850 (2021).

マルチモード発振状態の共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器における周波数安定化



Frequency Stabilization in Resonant Tunneling Diode Terahertz Oscillators in Multimode Oscillation State

兵庫県立大工¹, 東大理², 東工大³, JST さきがけ⁴

(M1C) ◯田淵 啓士朗¹, 伊藤 弘², 鈴木 左文³, 有川 敬^{1,4}

Univ. of Hyogo¹, Univ. of Tokyo², Tokyo Tech³, JST PRESTO⁴

◯Keishiro Tabuchi¹, Hiroshi Ito², Safumi Suzuki³, Takashi Arikawa^{1,4}

E-mail: ei24r013@guh.u-hyogo.ac.jp

共鳴トンネルダイオード (RTD)発振器は、小型で室温での連続動作が可能なテラヘルツ光源であり、様々な分野への応用が期待されている。これまでの研究で RTD 発振器からの出力を戻り光として注入すると、特定の条件下で RTD 発振器がマルチモードで発振し、かつそれがモード同期状態であることが報告されている[1]。本研究では、マルチモード発振状態の RTD に対して位相同期回路を用いた周波数安定化手法[2]を適用し、周波数コム化を試みた結果を報告する。

図1にマルチモード発振スペクトルの一部(二つの縦モード)を示す。青線は安定化前、赤線は低周波数側の縦モードを位相同期回路で安定化した時のスペクトルである。スペクトル幅は4.5MHz から0.3MHzまで狭くなった。また同時に高周波数側のモードの線幅も4.6MHz から0.5MHzまで狭くなった。講演ではこれらの振る舞いを詳しく議論する。

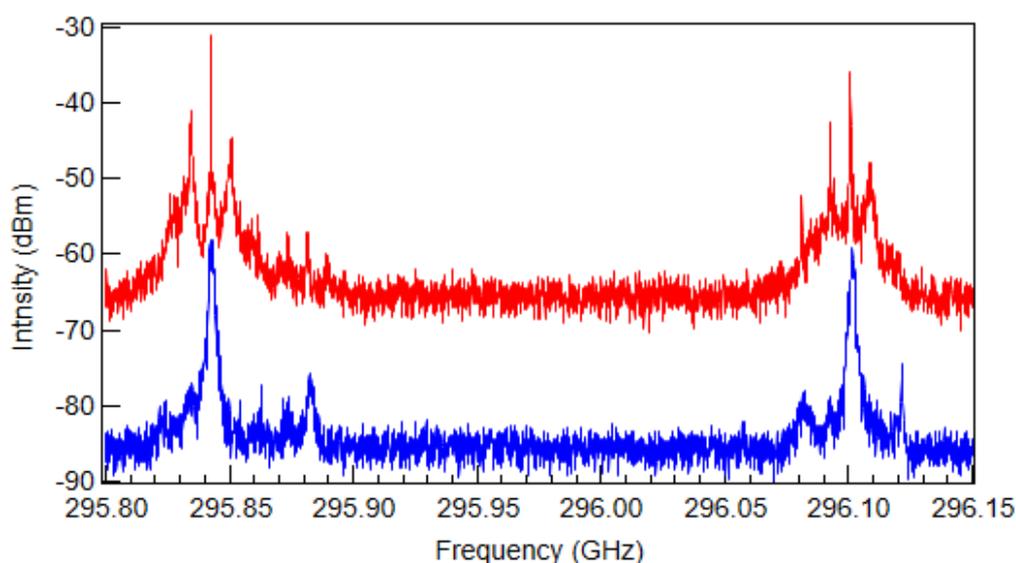


図1 安定化前後のマルチモード発振スペクトル(赤線は+20dBm のオフセットをつけている)

[1] T. Hiraoka, Y. Inose, T. Arikawa, H. Ito, K. Tanaka, *Nat. Commun.* **13**, 3740 (2022).

[2] K. Ogino, S. Suzuki, M. Asada, *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* **38**, 1477–1486 (2017).