

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04617

研究課題名(和文) 後進波発振・進行波増幅を連結した高出力定常ミリ波帯電子管の開発

研究課題名(英文) Development of a high-power millimeter vacuum electron device using the connection of a backward wave oscillator and a traveling wave tube

研究代表者

曽我 之泰 (Soga, Yukihiro)

金沢大学・数物科学系・助教

研究者番号：90525148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： テラヘルツ帯小型電子管の高出力化を目標として、K帯(18-26 GHz)、Ka帯(26-40 GHz)のスタaggerド・ダブルグレーティング遅波回路を持つ後進波発振管をそれぞれ開発した。K帯では周波数24.2 GHzで最高出力26 W、平均出力17 W、Ka帯では37 GHzで最高出力9.2 W、平均出力7.3 Wを観測した。

K帯とKa帯の観測結果を元に、出力が周波数の2乗則に従うと仮定して1 THzでの平均出力を見積もると10 mWとなる。これは現在実用化されているものの3倍程度である。スタaggerド・ダブルグレーティング遅波構造が高出力テラヘルツ電子管の有力な候補であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、高出力・高周波・小型で周波数可変の定常発振が可能なテラヘルツ光源は存在しない。そのため、その新規開発が求められている。本研究では、2枚のグレーティングを半周期ずらして配置したスタaggerド・ダブルグレーティングを遅波回路とする後進波発振管が、テラヘルツ光源として有望であることを実験的に検証した。この研究がさらに進展し、テラヘルツ帯での高出力化が達成されれば、テラヘルツ科学の進展に大いに寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)： With the goal of achieving high power in terahertz electron tubes, backward wave oscillators (BWO) with staggered double-grating slow-wave structures were developed for the K-band (18-26 GHz) and Ka-band (26-40 GHz) frequencies. In the K-band, a maximum output of 26 W and an average output of 17 W were achieved at a frequency of 24.2 GHz. In the Ka-band, a maximum output of 9.2 W and an average output of 7.3 W were observed at 37 GHz.

Based on the results obtained from the K-band and Ka-band, assuming that the output follows the square-law dependence on frequency, the estimated average output at 1 THz is 10 mW. This is approximately three times higher than the currently available practical devices. These results demonstrate that the staggered double-grating slow-wave structure is a promising candidate for high-power terahertz electron tubes.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：後進波発振管 電子ビーム THz波

1. 研究開始当初の背景

我々が発振を目指すテラヘルツ光とは、周波数がおよそ 300 GHz—3 THz の電磁波を指し、水には吸収されるが紙や布などは透過するなど、物質ごとに固有の吸収特性を持つという性質がある。この特長を活かし、分子分光・非破壊検査・郵便物の中身確認や空港での危険物検査、更には高速大容量通信など、幅広い分野への応用が期待されている。しかし、テラヘルツ帯は光と電波の中間に位置するため制御して発生させることが難しく、高出力で定常発振が可能な小型のテラヘルツ光源は未だ実現されていない。テラヘルツ科学は未開拓の領域である。図 1 に電子ビームを種とするテラヘルツ光源の出力を示す[1]。領域 1 は小型の電子管を示しており、1 THz 付近で出力が極端に低下していることがわかる。現在、小型で定常発振する唯一のテラヘルツ光源は、電子ビームを遅波回路と呼ばれる金属の周期構造に沿って走らせ、ビームと逆向きに遅波回路を伝播する後進波を発振する後進波発振管(BWO)である。しかし、その出力は 1 THz で 1 mW に過ぎず、幅広い応用を実現するためにはさらなる高出力化が必要である。

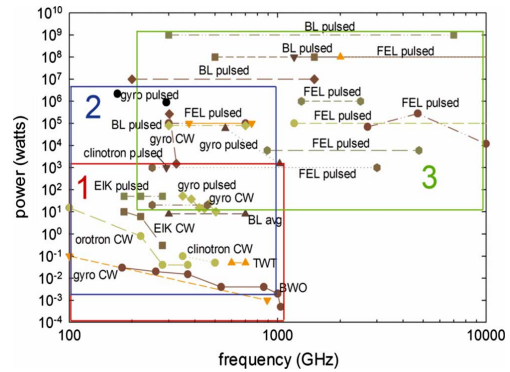


図 1. テラヘルツ帯真空電子デバイスの出力。1 で囲まれた領域は電子管を示す。John H. Booske et al., IEEE Trans. THz Sci. Technol., 1, 54 (2011).

2. 研究の目的

(1) テラヘルツ帯 BWO の遅波回路として提唱されているスタッガード・ダブルグレーティング (SDG) 構造 (図 2) [2,3,4,5,6]について、回路の製作と電磁波の検出が容易なマイクロ波・ミリ波帯での BWO を製作し出力・周波数特性に関する実験検証を行う。本構造は先行研究において高出力発振のシミュレーション結果、および増幅器としての優れた性能は示されているが、単独発振に関する実験検証はおこなわれていない。

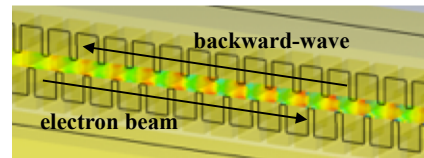


図 2. スタッガード・ダブルグレーティング遅波構造

(2) SDG 構造 BWO で高出力が得られなかった場合、その出力を進行波管 (TWT) で増幅して高出力を得ることを目指す。図 3 にシングルグレーティング BWO と TWT を連結した構造を示す。シミュレーションでは BWO 単体の出力を増幅できることが分かっている。これを実験的に検証する。

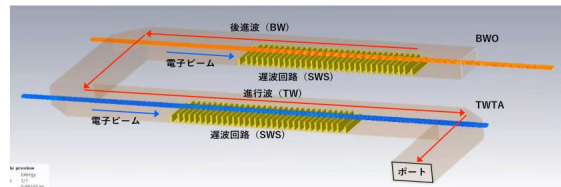


図 3. BWO-TWT 連結方式のプロトタイプを示す。

3. 研究の方法

SDG 遅波構造の設計は 3 次元電磁波解析ソフト CST Studio の固有モードソルバを用いておこなう。実機の製作は金沢大技術支援センターで無酸素銅板をワイヤー放電加工によりおこなう。福井大遠赤外領域開発センター所有のテラヘルツ・ベクトルネットワークアナライザにより製作した SDG 遅波構造の電磁波伝搬特性を測定する。良好な伝搬特性が得られたら、電磁波発振実験に移行する。

図 4 に、金沢大学で開発した電磁波発振実験専用装置を示す。この装置では高輝度熱電子源を遅波回路部とゲートで区切ることができ、電子源を劣化させずに遅波回路だけを容易に取り替えることができる。また外部に設置したコイルにより発振実験中に電子ビームのアラインメント調整をすることが可能である。

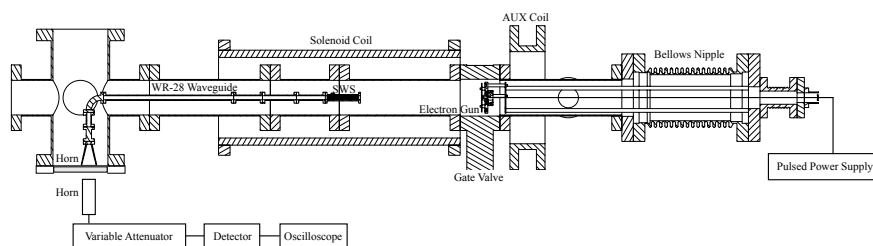


図 4. 遅波回路検査専用開発した実験装置の概略図

4. 研究成果

(1) DSG の製作と電磁波伝搬特性

DSG 遅波回路はグレーティングが金属に囲まれた構造であり、一体物で製作することが不可能である。我々はグレーティング 2 枚と側壁 2 枚の 4 分割パーツを組み立てる方式を採用した。図 5 の左上は、組み立てた DSG から側壁 1 枚を取り除いたときの写真である。K 帯 (18-26 GHz)、Ka 帯 (26-40 GHz) の DSG は減衰が数 dB 未満の良好な透過特性を得ることができた。発振モードを維持するためには、グレーティングの櫛の側面と側壁の電気的な接触を確保することが重要であるため、導電性接着剤を使用した。一方、W 帯 (75-110 GHz) では発振に必要な透過率を得ることができなかった。

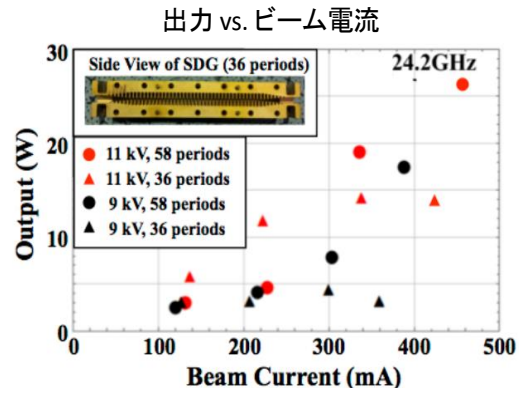


図 5. K 帯 SDG の発振パワー

(2) 発振実験

電磁波伝搬特性の試験をパスした K 帯と Ka 帯の DSG を対象として、我々が開発した専用装置で発振実験をおこなった。図 5 と図 6 は、測定された出力を電子ビームの電流値に対してプロットしたものを、それぞれの帯域について示している。いずれの帯域においても、高出力発振を確認した。K 帯では周波数 24.2 GHz で最高出力 26 W、平均出力 17 W、Ka 帯では 37 GHz で最高出力 9.2 W、平均出力 7.3 W を観測した。

Ka 帯でビームエネルギーと周波数の関係を測定をおこなった結果、電子ビームエネルギー 4.7-12.0 keV で帯域 31-40 GHz、出力 1 W 以上を観測した。DSG は BWO の遅波構造として優れた周波数選択性があることを実証した。

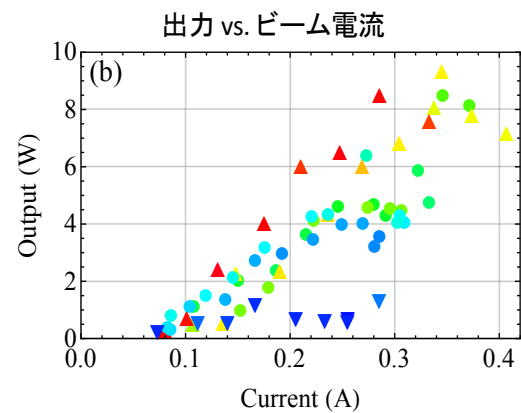


図 6. Ka 帯 SDG の発振パワー

(3) THz 帯への展望

K 帯および Ka 帯での DSG 構造の発振出力から THz 帯での出力を見積もる。パルス発振で確認されている、出力が周波数の 2 乗の逆数に比例すること、および観測された最高出力の 7 割程度の出力が定常的に確保できると仮定すると、1 THz で未踏領域である 10 mW の発振が得られると予測される (表 1)。この見積もりはかなり大雑把であるが、DSG は高出力テラヘルツ BWO の有力な候補であることが実験的に初めて示されたと考えている。現在 100 GHz 帯での開発が進められており、この結果を合わせることで、1 THz での出力予測の精度が向上すると期待される。

表 1. THz 帯の出力予測

周波数 (GHz)	出力 (W)
1000	0.01 (従来の3倍程度)
100	1
37	7.3 (観測最高値9.2)
24	17 (観測最高値26)

<参考文献>

- [1] J.H. Booske, R.J. Dobbs, C.D. Joye, C.L. Kory, G.R. Neil, G.S. Park, J. Park, R.J. Temkin, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology 1(1), 54 (2011). DOI 10.1109/TTHZ.2011.2151610
- [2] Y.M. Shin, L.R. Barnett, Applied Physics Letters 92(9), 091501 (2008). DOI 10.1063/1.2883951. URL <https://doi.org/10.1063/1.2883951>
- [3] Y.M. Shin, L.R. Barnett, N.C. Luhmann, Applied Physics Letters 93(22), 221504 (2008). DOI 10.1063/1.3041646. URL <https://doi.org/10.1063/1.3041646>
- [4] Y.M. Shin, L.R. Barnett, N.C. Luhmann, IEEE Transactions on Electron Devices 56(5), 706 (2009). DOI 10.1109/TED.2009.2015404
- [5] Y.M. Shin, A. Baig, L.R. Barnett, N.C. Luhmann, J. Pasour, P. Larsen, IEEE Transactions on Electron Devices 58(9), 3213 (2011). DOI 10.1109/TED.2011.2159842
- [6] Y.M. Shin, A. Baig, R. Barchfeld, D. Gamzina, L.R. Barnett, N.C. Luhmann, Applied Physics Letters 100(15), 154103 (2012). DOI 10.1063/1.3698362. URL <https://doi.org/10.1063/1.3698362>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Iwabuchi , Y. Soga , Y. Nishikawa , M. Sato , M. Yoshida , Y. Ishikawa , and S. Mitsudo
2. 発表標題 Radiation from K-band Backward-Wave Oscillator with Staggered Double-Grating Slow Wave Structure
3. 学会等名 The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 曾我之泰, 岩淵啓佑
2. 発表標題 スタaggerド・ダブルグレーティング遅波構造を用いたミリ波帯 BWO の実験的研究
3. 学会等名 2020 年度 核融合科学研究所一般共同研究(NIFS20KKGR012) 「ギガヘルツ・テラヘルツ帯における要素開発とその応用」研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩淵啓佑, 曾我之泰, 西川喜裕, 佐藤政行, 吉田光宏, 石川裕也, 光藤誠太郎
2. 発表標題 K 帯スタaggerドダブルグレーティング遅波構造の透過特性の改善
3. 学会等名 2020年度日本物理学会北陸支部 定例学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩淵啓佑, 曾我之泰, 西川喜裕, 佐藤政行, 吉田光宏, 石川裕也, 光藤誠太郎
2. 発表標題 K 帯スタaggerドダブルグレーティング構造を用いた後進波発振実験
3. 学会等名 2020年度日本物理学会北陸支部 定例学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩淵啓佑, 曾我之泰, 西川善裕, 佐藤政行, 吉田光宏, 石川裕也, 光藤誠太郎
2. 発表標題 K帯ダブルグレーティング構造を用いた 後進波管の発振実験
3. 学会等名 日本物理学会2020秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 政行 (Sato Masayuki) (00266925)	金沢大学・数物科学系・教授 (13301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------