

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289101

研究課題名(和文) MEMS技術を用いた300GHz帯FW-TWTの開発

研究課題名(英文) Development of 300GHz FW-TWT using MEMS technology

研究代表者

三村 秀典(Mimura, Hidenori)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：90144055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：帯域280～300GHz、出力1W、利得20dB以上の性能を有するFolded WaveGuide-Travelling Wave Tube (FWG-TWT:進行波管)を開発するため、FWGの設計を行った。このFWGを用いたFWG-TWTを試作し、設計手法は正しいことを確認した。しかし、矩形型の電子ビーム孔では大きなRF損失を招いた。そこで、円形状のビーム孔を持つFWGを設計した。このFWGを用いたFWG-TWTは、目標性能を満足することを解析から確認した。さらに、将来の小型・高効率FWG-TWTの開発のため、火山型ダブルゲートスピント電子源、またGaAsおよびSiの光電子源の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：To develop the Folded WaveGuide-Travelling Wave Tube (FWG-TWT) which has the output power greater than 1 W and gain larger than 20 dB over the bandwidth from 280 GHz to 300 GHz, we have designed the FWG which is fabricated by micro electro mechanical systems (MEMS). We have fabricated a FWG-TWT using our designed FWG, and we have confirmed that our design methods correctly designs the FWG. However, the first fabrication of the FWG-TWT showed that the FWG with a rectangular shaped beam hole caused the large RF loss. Therefore, we have designed the FWG with a circular shaped beam hole. We have confirmed from the calculation that the FWG-TWT with a circular shaped beam hole satisfies the required performances of the FWG-TWT. In addition to these results, we have developed the volcano-structured double gated Spindt field emitter, and semiconductor photocathodes such as GaAs and Si, aiming at the development a compact FWG-TWT with high efficiency in the future.

研究分野：工学

キーワード：進行波管 300GHz Folded Waveguide 遅波回路 MEMS

### 1. 研究開始当初の背景

高周波数及び高出力分野では現在でも電子管が主要デバイスである。諸外国(米国、欧州、中国、インド、ロシア等)は活発に THz 電子管の開発を行っている。米国では 0.67THz でパルス出力 92mW の Folded WaveGuide-Travelling Wave Tube (FWG-TWT : 進行波管)の開発、特に 220GHz を用いた 100Gbps の無線通信バックボーンの開発に力を入れている。( [http://www.darpa.mil/Our\\_Work/STO/Programs/100\\_Gbs\\_RF\\_Backbone\\_\(100G\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/STO/Programs/100_Gbs_RF_Backbone_(100G).aspx) )。一方、欧州では周波数帯 0.3 THz ~ 3THz、出力 10 ~ 100mW を目標にした Optically Driven Terahertz Amplifiers の開発がある。しかし、しかし日本では THz 帯電子管の開発は全く行われていない。我が国は後れをとり戻すため、情報通信研究機構を中心に 275GHz 以上の周波数帯を無線用途に利用するための基盤技術の性急な整備が提案されている。このような中、国内で唯一 TWT の開発・実用化を行っている NEC ネットワーク・センサ(株)(30GHz までの TWT を実用化している)と Micro Electro Mechanical System (MEMS) 技術、電子管、電子源に知見のある本研究者らは、300GHz の FWG-TWT の開発を検討してきた。

### 2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究の目的は、MEMS 技術で作製した FWG 遅波回路を用いた 300GHz 帯 FWG-TWT (進行波管)を設計し開発に協力すること。また、より小型の 300GHz 帯 FWG-TWT を目指して、熱カソードの代わりとなる、MEMS 技術を用いた新しい静電レンズ一体型微小電子源を開発すること。また、より小型・高効率な 300GHz 帯 FWG-TWT を目指して、電子源から直接バンチ電子ビームを発生できる新しい光カソードを開発すること。これらの研究を世界に先駆けて行うことにより、275GHz 以上の周波数帯を無線用途に利用するための基盤技術の整備に貢献することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1)FWG-TWT の仕様を決めて、MEMS 技術(LIGA 技術)で作製する FWG 遅波回路を設計する。最初に概略的な全体設計(小信号解析)を行い、その後、大信号解析、数値シミュレーション(Particle-in-Cell)で動作を確認する。また、設計に基づいて製作した FWG を搭載した FWG-TWT の特性評価を FWG 設計にフィードバックし、仕様を満足する FWG-TWT が実現できる FWG 遅波回路を設計する。

(2)熱カソードの代わりとなる、MEMS 技術を用いた新しい静電レンズ一体型微小電子源の開発を目指して、火山構造(volcano)構造ダブルゲートスピント型電子源を開発し、その集束特性を測定し、火山構造ダブルゲートスピント型電子源の最適化を行う。

(3)電子源から直接バンチ電子ビームを発生

できる新しい光カソードとして、GaAs 表面をセシウム処理した負性親和力 GaAs 光カソードの光パルス応答を測定する。また、微小ゲート孔の火山構造 Si 電界放射陰極の光パルス応答を測定し、300GHz 帯 FWG-TWT の電子源への応用の可能性を検討する。

### 4. 研究成果

(1)表 1 に FWG-TWT の設計目標と主要動作パラメータを示す。設計目標として、周波数は 280-300GHz、出力は 1W 以上、利得は 20dB 以上とした。主要動作パラメータとして、ビーム効率  $\eta_b$  の推定、ビーム電圧  $E_b$  とカソード電流  $I_k$  の決定、コレクタ電圧  $E_c$  の決定を以下の指針に従って行った。

TWT の出力  $P_o$  は直流入力  $P_{dc}$  とビーム効率  $\eta_b$  の積で与えられる。ここで、通常のマイクロ波帯 TWT のビーム効率は 10 ~ 30%程度だが、今回の 300GHz 帯 TWT では設計上の大きな制約があるため、過去の実績や経験及び海外での類似品の開発例から、かなり低い 1 ~ 2%程度と推定した。

ビーム効率を 1%とすると出力 1W を得るための直流入力、100W となる。直流入力  $P_{dc}$  はビーム電圧  $E_b$  とカソード電流  $I_k$  の積で与えられるので、パービアンス  $P = I_k / (E_b)^{1.5}$  を決めることによって、ビーム電圧  $E_b$  とカソード電流  $I_k$  をそれぞれ確定する。パービアンスは電子ビーム系設計及び高周波回路設計が大きく影響を受ける重要な設計パラメータである。通常、パービアンスが大きいと周期永久磁石(PPM)や電子銃等の電子ビーム系の設計が難しくなる。今回の 300GHz 帯 TWT においては、電子ビーム系設計を優先して低パービアンス設計(0.00631  $\mu P$ )とし、従来の実績と経験も考慮して、ビーム電圧  $E_b = 12kV$ 、カソード電流  $I_k = 8.3mA$  と設定した。

今回の 300GHz 帯 TWT は、ビーム効率 1 ~ 2% と設定したが、電子ビームが電磁波との相互作用を終了した時点(出力端)で、殆どの電子のエネルギーは残存している。よってコレクタは一段の電位低下コレクタとし、ビーム電圧  $E_b$  に比して 80 ~ 90%以上の深い電位低下(CPD)が可能であるため、コレクタ電圧は 1.2-2.4kV とした。

表 1 FWG-TWT の設計目標と主要動作パラメータ

項目	値
周波数帯域	280-300GHz
出力 $P_o$	> 1W
利得 $Gain$	> 20dB
ビーム電圧 $E_b$	12kV
カソード電流 $I_k$	8.3mA
コレクタ電圧 $E_c$	< 1.2-2.4kV

図1にFWGの構造を示す。図において、 $a$ はFWGの横幅、 $b$ は高さである。 $p$ はピッチ、 $L$ は一周期の間の導波管路の全長、 $l$ はストレート部の長さの半分、 $r_d$ はドリフト管(ビームホール)半径である。主な発表論文[雑誌論文1]に示す設計式に従い、FWGの寸法を表2のように決定した。

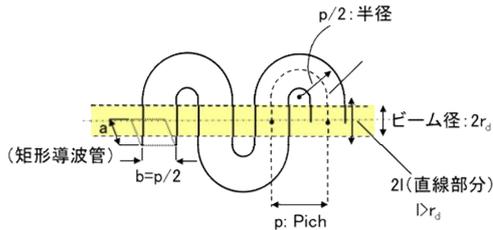


図1 FWGの構造と電子ビーム

表2 300GHz帯FWGの寸法

寸法の名称	記号	設計寸法 [mm]
FWGの横幅	$a$	0.651
FWGの高さ	$b$	0.091
ピッチ	$p$	0.182
ビームホール半径	$r_d$	0.123
ストレート部の長さ	$l$	0.137
1ピッチの管路長	$L$	0.560

このようなパラメータから最終設計(案)として図2に示すように、FWGの位相定数( )と周波数の分散関係と電子ビームの動作点(直線と曲線が交わった点)および電子ビーム電圧、帯域、利得、効率を計算した。

以上に結果より、外部機関にてLIGAプロセスによりFWGを製作して、FWG-TWTの試作を行った。図3にLIGAプロセスにより製作したFWGの写真を示す。FWGの特性評価は、ネットワークアナライザにより、cold評価(電子ビームを通さない評価)で行った。その結果、次の重要な結果が得られた。1. FWG遅波回路の設計手法は正しい。2. 製作の容易さから矩形型のビームホールを採用したが、これによりRF損失が大きい。また、設計したビームホールが大きすぎて、電磁波と電子ビームの相互作用が弱い。さらに遅波回路と出力導波管の間のインピーダンス不整合を生じている。これらのことより円形型のビームホールを用いて、また可能な限りビームホールを小さくした、FWGの2次設計を行った。表3に1次設計と2次設計の比較を示す。第2次試作の結果を見て、さらに3次設計を行うかどうかを決定する。

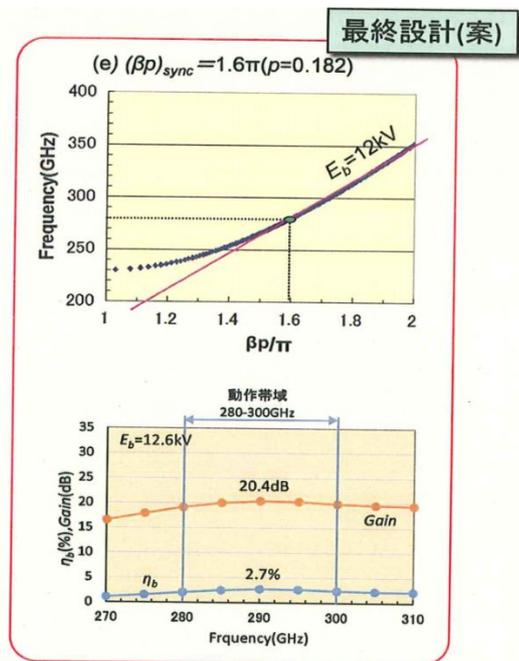


図2 動作点に対するFWGの分散関係(上)と利得、ビーム効率、周波数特性の計算結果(下)

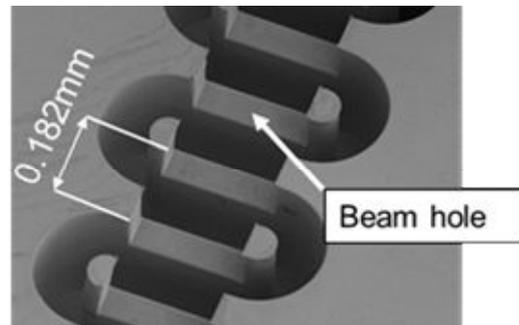


図3 LIGAプロセスにより製作したFWG

表3 FWGの2次設計の結果

寸法の名称	記号	単位	二次設計案		
			( $\beta p$ ) <sub>sync</sub> =1.6 $\pi$	( $\beta p$ ) <sub>sync</sub> =1.53 $\pi$	( $\beta p$ ) <sub>sync</sub> =1.45 $\pi$
FWGの横幅	$a$	mm	0.651	0.651	0.651
FWGの高さ	$b$	mm	0.091	0.087	0.0835
ピッチ	$p$	mm	0.182	0.174	0.167
ビームホール半径	$r_{bh}$	mm	0.123	0.123 or 0.1	0.123 or 0.1
ストレート部半分の長さ	$l$	mm	0.137	0.137	0.137
1ピッチの管路長	$L$	mm	0.56	0.547	0.536
Gap数		個	147	153	159
回路長	$L_{eff}$	mm	26.845	26.709	26.636

(2) 小型の300GHz帯FWG-TWTを目指して、熱カソードの代わりとなる、MEMS技術を用いた新しい静電レンズ一体型微小電子源を開発した。このような電子源として、火山構造ダブルゲートスピント型微小電子源の製作を行い、電子放出特性と集束特性から構造の最適化を行った。図4に示すように、エミッタチップ(tip)は引き出し電極から低く、また先端の角度は小さい方が、放出電流量の減少を抑えながら電子ビームをより集束できることがわかった。2 $\mu$ mピッチで120個の

エミッタチップの集積した  $20\mu\text{m}^2$  のアレイ電子源で、集束時の電子ビームサイズ  $50\mu\text{m}$ 、アノード電流  $1.2\mu\text{A}$  を実現しこれにより火山構造ダブルゲートスピント型微小電子源を  $300\text{GHz}$  帯 FWG-TWT 用の電子源として応用できることがわかった。

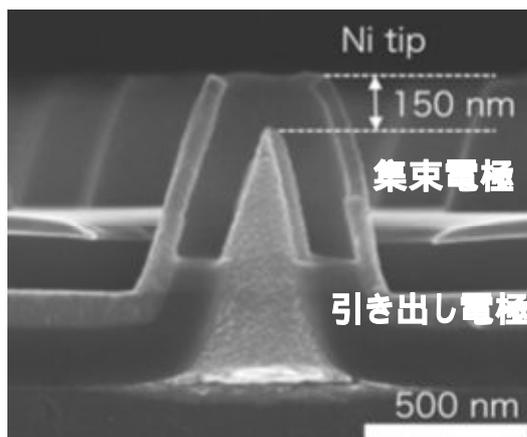


図 4 最適化された火山構造ダブルゲートスピント型微小電子源の断面 SEM 図

(3) 小型・高効率な  $300\text{GHz}$  帯 FWG-TWT を目指して、電子源から直接バンチ電子ビームを発生できる新しい光カソードの開発を行った。まず、GaAs 表面をセシウム処理した負性電子親和力 GaAs 光カソードの光パルス応答性を測定した。その結果、負性電子親和力 GaAs 光カソードの光パルス応答は数 nsec より高速であることがわかった。また、図 5 に示す、 $480\text{nm}$  径の微小ゲート孔の火山構造 Si 電界放射陰極の光パルス応答を測定し、立ち上がり、立ち下がり特性共に約  $1\text{nsec}$  以下を実現した。このことより、半導体電子源とレーザ技術を用いることにより、FWG-TWT に応用可能な光カソードの実現の可能性を示すことができた。

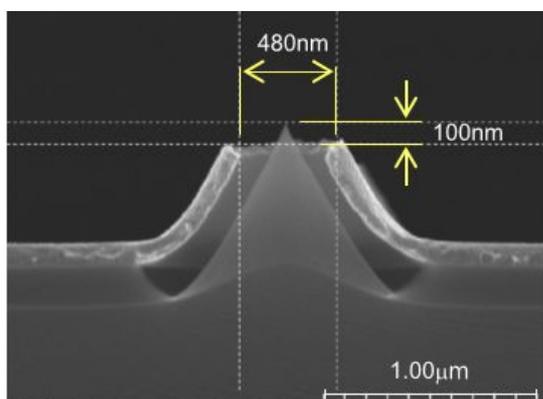


図 5 微小ゲート孔の火山構造 Si 電界放射陰極

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. K. Tsutaki, Y. Neo, H. Mimura, N. Masuda, and M. Yoshida, Design of a  $300\text{GHz}$  Band TWT with a Folded Waveguide Fabricated by Micro electromechanical Systems, J. Infrared Milli, Terahz. Waves, 査読有、Vol.37、2016、1166-1172、DOI 10.1007 / s10762-016-0306-5
2. M. Nagao, Y. Gotoh, Y. Neo, and H. Mimura, Beam profile measurement of volcano - structured double-gate Spindt-type field emitter arrays, J. Vac. Sci. Technol. B, 査読有、Vol.34、2016、02G108-1-6、DOI 10.1116/1.4944453
3. H. Shimawaki, Y. Neo, H. Mimura, M. Nagao, F. Wakaya, and M. Takai, Electron emission properties of gated silicon field emitter array driven by laser pulses, Appl. Phys. Lett., 査読有、Vol.109、2016、183106-1-3、DOI 10.1063/1.4967008

〔学会発表〕(計 13 件)

1. 吉武亮、光野圭吾、増澤智昭、畑中義式、細田誠、根尾陽一郎、三村秀典、NEA-GaAs ホトカソードからのパルスビーム診断、電子情報通信学会技術研究報告、2016 年 10 月 25 日、三重大学 (三重県・津市)
2. 嶋脇秀隆、長尾昌善、根尾陽一郎、三村秀典、若家富士夫、高井幹夫、シリコンフィールドエミッタの光応答特性の評価 (その 2)、電子情報通信学会技術研究報告、2016 年 10 月 25 日、三重大学 (三重県・津市)
3. R. Yoshitake, Y. Neo, Y. Hatanaka, M. Hosoda, and H. Mimura, Fast pulse electron beam generated from NEA-GaAs photocathode, 15<sup>th</sup> International Conference Global Research and Education, September 26、2016、Warsaw University of Technology, Warsaw (Poland)
4. T. Matsuzawa, K. Mitsuno, Y. Hatanaka, Y. Neo, and H. Mimura, Characterization of GaAs photocathode utilizing negative electron affinity, 15<sup>th</sup> International Conference Global Research and Education, September 26、2016、Warsaw University of Technology, Warsaw (Poland)
5. 光野圭吾、増澤智昭、畑中義式、根尾陽一郎、三村秀典、GaAs 負性親和力カソードの応答特性、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016 年 9 月 15 日、朱鷺メッセ (新潟県・新潟市)
6. K. Tsutaki, Y. Neo, H. Mimura, Y. Fujisita, M. Yoshida and J. Matsuoka, Design of a  $300\text{GHz}$  band TWT with a folded waveguide fabricated by micro electro mechanical systems, 2nd International Symposium on Frontiers in Thz Technology 2015, September 1、2016、Congress Center in ACT CITY (静岡県・浜松市)

7. H. Shimawaki, Y. Neo, H. Mimura, M. Nagao, F. Wakaya, and M. Takai、Field emission from gated silicon field emitter array induced by sub-nanosecond laser puls、29th International Vacuum Nanoelectronics Conference、July 12、2016、University of British Columbia、Vancouver (Canada)

8. 光野圭悟、増澤智昭、畑中義式、根尾陽一郎、三村秀典、GaAs 負性電子親和力カソードの応答速度について、第 63 回応用物理学関係連合講演会、2016 年 3 月 21 日、東京工業大学 (東京都・目黒区)

9. M. Nagao, Y. Goto, T. Matsuzawa, Y. Neo and H. Mimura、Revised Fabrication of Volcano-Structured Double-Gate Spindt-Type FEA、22<sup>th</sup> International Display Workshop、December 11、2015、Otsu Prince Hotel (滋賀県・大津市)

10. 蔦木邦夫、根尾陽一郎、三村秀典、吉田満、増田則夫、松岡順一、300GHz 帯 MEMS-FWGG-TWT の設計検討 (その 2)、電子情報通信学会技術報告、2015 年 10 月 22 日、名城大学名古屋駅サテライト (愛知県・名古屋市)

11. 長尾昌善、後藤康仁、増澤智昭、根尾陽一郎、三村秀典、ボルケーノ構造ダブルゲートスピント型フィールドエミッタアレイのビーム集束特性、第 76 回応用物理学学会学術講演会、2015 年 9 月 15 日、名古屋国際会議場 (愛知県・名古屋市)

12. M. Nagao, Y. Gotoh, Y. Neo and H. Mimura、Beam profile measurement of volcano - structured double-gated Spindt-type field emitter arrays、28th International Vacuum Nanoelectronics Conference、July 14、2015、Yingbin Hotel、Guangzhou (China)

13. 吉田満、松岡順一、蔦木邦夫、根尾陽一郎、三村秀典、電子情報通信学会技術報告、2014 年 10 月 22 日、北海道大学 (北海道・札幌市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：

種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

三村 秀典 (MIMURA, Hidenori)  
静岡大学・電子工学研究所・教授  
研究者番号：90144055

##### (2) 研究分担者

根尾 陽一郎 (NEO, Yoichiro)  
静岡大学・電子工学研究所・准教授  
研究者番号：50312674

長尾 正善 (NAGAO, Masayoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・研究グループ長  
研究者番号：80357607

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

( )