

機関番号：13301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21740394

研究課題名（和文） 定常テラヘルツ帯電子管のプラズマ科学的基礎研究

研究課題名（英文） Study on CW THz band electron tube in terms of plasma physics

研究代表者

曾我 之泰 (SOGA YUKIHIRO)

金沢大学・数物科学系・助教

研究者番号：90525148

研究成果の概要（和文）：2つの櫛を合わせた形状であるインターデジタル型の遅波回路を備えた発振周波数100GHzのBWOを設計し、荷電粒子シミュレーションを行った結果、周波数100GHz、出力700mWの電磁波発振を得た。これは、従来の同帯域BWOより5倍程度強い。これらのシミュレーション結果を踏まえ、40GHz帯と100GHz帯のプロトタイプBWOの製作に着手した。熱陰極方式の電子源を設計・製作し、電子ビームがネオジウム永久磁石による一様磁場中を発振に必要な電流密度で精度良く走ることを確認した。

研究成果の概要（英文）：Simulation studies were carried out on newly designed compact 100 GHz range backward-wave oscillator (BWO) with an interdigital slow-wave circuit: teeth of two combs are facing each other. A steady radiation at a frequency 100 GHz with output power of 700 mW was observed. The output power is about five times larger than the present BWO with a same range. We have started the construction of proto-type BWO with 40 GHz and 100 GHz range. We designed and constructed the thermionic electron gun that produces an electron-beam running in a homogeneous magnetic field formed by Nd magnets with sufficient energy and emission current for the radiation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：プラズマ物理学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：後進波発振管，非中性プラズマ，テラヘルツ波，電子ビーム

## 1. 研究開始当初の背景

電磁波の周波数が0.1 THz -10 THzの帯域は、量子力学に基づいた光デバイス（光、レーザー）の周波数の下限、古典電磁気学に基づいた電子デバイス（電波、電子管）の動作上限の領域である。現状では良質の信号源

や光源が少なく、この帯域はテラヘルツギャップと呼ばれている。この帯域は、超伝導エネルギーギャップ、半導体電子のナノ共鳴構造、クラスター状態での分子間振動等々の物理的興味だけではなく、生体分子、医療、センサー技術を初めとして非常に広い分野での応用が期待される。

テラヘルツ光源としては、レーザー、固体素子、電子ビームを用いた方式等が挙げられる。中でも前二者の研究が先んじて行われており、フェムト秒パルスレーザーによる時間分解分光装置や、パルスレーザーと非線形結晶によるパラメトリック差周波発生法による光源が開発されている。これらの光源はピーク出力は高いものもあるが、パルス出力で定常運転は難しい。一方で、電子ビームを用いた方式では、大型加速器を用いた自由電子レーザー方式やジャイロトロンはほぼ確立された段階にあるが、利便性の面で制限が厳しい。本研究の対象とする後進波発振(Backward Wave Oscillator: BWO)は連続発振が可能であり、装置も比較的小型である。BWOの構造は電子銃と遅波回路からなっている。遅波回路とはらせん構造やコルゲート構造などの周期構造を持つ導波路のことで、各周波数で異なる位相速度を持つ空間高調波を作る性質を持つ。BWOは遅波回路の後進波(電子ビームと逆向きに伝播する波)である第一空間高調波とビームを相互作用させることで電磁波の発振を得る。BWOの発振帯域は周期構造に依存しており、周期構造が細かいほど高周波となる。

BWOは従来マイクロ波領域の発振管であり、この領域では高い性能を発揮している。テラヘルツ帯BWOは0.1THz～1.3THzのものが実用化しているものの、その出力は100GHz帯で数十mWにとどまっている。高出力の後進波発振管が実現すれば、高輝度、高コヒーレンシー、広帯域波長可変特性、狭発振線幅などの特徴を有する利便性の高いテラヘルツ光源の開発に繋がる。大学や企業が容易に入手し利用できる小型テラヘルツ光源が開発されれば、光通信、テラヘルツ無線などの情報通信技術革新、生体分析、医療、非破壊検査、宇宙観測などの分析技術の創製といったテラヘルツ科学の広い応用分野での飛躍的な進展が期待される。

## 2. 研究の目的

BWOが低い出力となる原因は、高周波化に伴い遅波回路の構造が微細になることにより、電子ビームと電磁波の相互作用領域が減少するためと考えられる。高周波かつ高出力を実現するためには以下の3つのいずれかが必要である。

- (1) 電子ビームと電磁波の相互作用領域を増やす。
- (2) 電子ビームと電磁波の結合を強める。
- (3) 電子ビームの高エネルギーかつ電流密度を増やす。

本研究では、インターデジタル型遅波回路と高電流密度電子銃を開発し、(2)、(3)の条件を達成することにより、小型かつワット級出

力のBWOの実現を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) インターデジタル型遅波回路の設計・製作

インターデジタル型遅波回路は2つのくしがかみ合った構造を有する(図1)。らせん形や楕円形など一般的な遅波回路は基本波が前進波、第一空間高調波が後進波であるのに対し、インターデジタル型遅波回路は基本波が後進波であるという特徴を持っている。基本波が後進波であると、電子ビームとの結合が強くなるのが期待される。また、発振周波数の位相速度が速くなり、他の遅波回路と比較し電子ビームのエネルギーを大きくすることができると考えられる。今回はインターデジタル型のパターンを誘電体基板上に製作し、それを遅波回路として用いる。実験ではその基板に沿って電子ビームを入射し、遅波回路と相互作用させる。

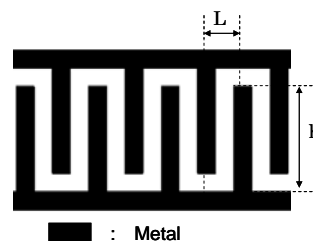


図1 インターデジタル構造

### (2) 荷電粒子シミュレーション

設計した遅波回路について荷電粒子シミュレーションを行う。シミュレーションソフトはCST STUDIO SUITE 2011のCST PARTICLE STUDIOで、高エネルギー加速器研究機構の吉田光宏助教の協力の下に使用する。これは三次元の電磁場中での粒子の軌道を解析するためのParticle-in-Cell(PIC)を使用したソフトウェアでマイクロ波管や加速器の解析に有効である。

### (3) 熱陰極電子銃の設計・製作

粒子シミュレーションにより見積もられた、発振に必要な電流密度、エネルギーをもつ直線軌道の電子ビームを射出する電子源を設計・製作する。アノード-カソード間の空間電荷制限、軌道が歪む原因である電場、磁場による影響を考慮する必要がある。これらのパラメータについて、シミュレーションを用い最適化を行う。

#### 4. 研究成果

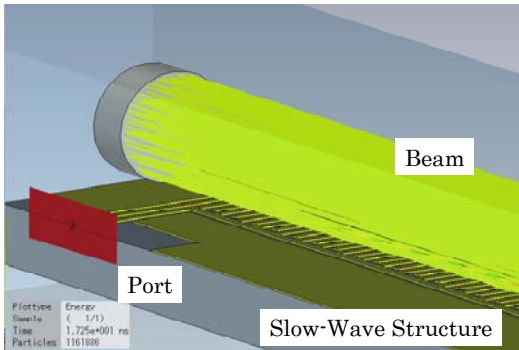


図2 遅波回路、電子ビームの位置関係

インタディジタル型の遅波回路を備えた発振周波数 100GHz の BWO を設計し、荷電粒子シミュレーションを行った。遅波回路と電子ビームの位置関係を図 2 に示す。電子ビームを基板上の遅波回路の表面に沿って伝播させる。電子ビームは直径 1mm の円柱形であり、電子ビームの下端と遅波回路間の距離は 0.1mm とした。電子ビームのエネルギーは 10keV、電流値は 50mA から 100mA(電流密度にすると約  $5 \text{ A/cm}^2$  から  $10 \text{ A/cm}^2$ ) とした。電子ビームの発散を防ぐためのガイド磁場は、内径 15mm、外径 30mm、高さ 40mm のドーナツ型ネオジウムマグネットにより生成する。シミュレーションの結果、周波数 100GHz、出力 700mW の電磁波発振を得た。これは、従来の同帯域 BWO より 5 倍程度強い。発振に必要な最低電流密度は、 $6 \text{ A/cm}^2$  であった。また、遅波回路と電子ビームを多層構造にした場合、発振効率が向上することが判明した。

これらのシミュレーション結果を踏まえ、40GHz 帯と 100GHz 帯のプロトタイプ BWO の製作を行った。遅波回路と電磁波伝送線路はテフロン基盤上にエッチングでパターンを刻んだ。ネットワークアナライザによる電磁波伝送テストを行った結果、コネクタと基盤の接続部でロスが大きいことが判明した。

並行して、電子源の開発を行った。カソードは、酸化バリウム含浸カソードを用いた。設計した電子銃の構造とポテンシャル分布を図 3 に示す。集束電極の設置により、電子軌道に対してほぼ垂直なポテンシャル分布であることがわかる。電子ビームは基本的に軸方向磁場の磁力線に巻き付く様に伝播する。このことより、ガイド磁場は一様であることが望ましい。しかし、今回使用するネオジウムマグネットの作る磁場は図 4 で示すように完全に一様でなく、その影響を大きく受ける。マグネットに対するカソードの位置の最適化を行った後のシミュレーション結果を

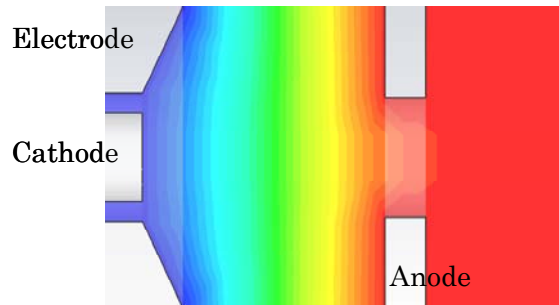


図3 アノード-カソード間のポテンシャル分布

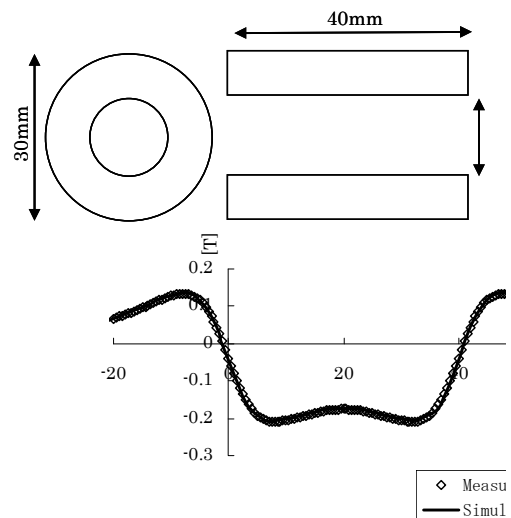


図4 磁場強度分布

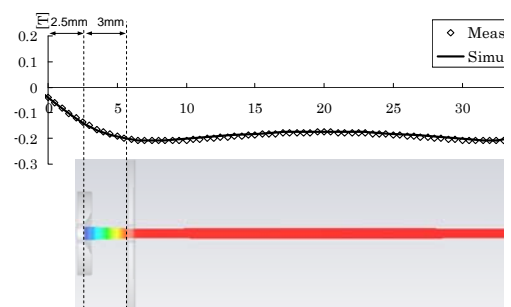


図5 電子軌道シミュレーション

図 5 に示す。このとき、ビーム径の変化は±6%以下に抑えられた。直線的で一様な電子ビームが得られることを確認した。以上のパラメータで電子銃を製作し、発振を得るのに要求される電子ビームを発生することを実験的に確かめた。

## 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)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 加藤真志, 曾我之泰他, 「100GHz 後進波発振管に用いる電子銃の設計と評価」, 電気学会プラズマ研究会, 2011 年 5 月 28 日, 富山大学 (富山県)
- ② 加藤真志, 曾我之泰他, 「100GHz 帯 Interdigital 型 BWO の開発」, 研究会「パルスパワー技術を基礎とするプラズマの物理とその応用」, 2010/12/22, 核融合科学研究所 (岐阜県)
- ③ 加藤真志, 三村徹也, 加藤泰禎, 金古岳史, 曾我之泰, 吉田光宏 「100GHz 帯 Interdigital 型 BWO の設計と製作」, 2010 年日本物理学会秋季大会, 2010/9/24, 大阪府立大学 (大阪府).
- ④ Yukihiro Soga, et al. "Particle Simulation Study of 100 GHz Interdigital BWO", The 3<sup>rd</sup> International Workshop on Far Infrared Technologies 2010, 2010/3/15-17, University of Fukui, (Fukui, Japan)
- ⑤ 曾我之泰他, 「CST Studio Suite を用いた後進波発振管のシミュレーション」, 平成 21 年度核融合科学研究所共同研究形式研究会「パルスパワー技術を用いた粒子ビームと高エネルギー密度プラズマ科学の最前線」, 2009 年 11 月 20 日, 核融合科学研究所 (岐阜県).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

曾我 之泰 (SOGA YUKIHIRO)  
金沢大学・数物科学系・助教  
研究者番号：90525148