

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400530

研究課題名(和文)複数電子ビームによる平板型自由電子メーザーの実験的研究

研究課題名(英文)Free electron maser with intense electron beams through parallel plates

研究代表者

鎌田 啓一 (Kamada, Keiichi)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：90143875

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：小型で高出力のテラヘルツ光源を目指して、複数の大強度電子ビームを平板型周期磁場中に入射する事を試みた。平行平板中を円柱状ビームが伝搬する際にビーム重心の移動、断面形状の周期的変形、二本のビームでの相互回転に関する現象を実験的に検証した。運動方程式を線状に分割したビームに適用したモデルを用いて、電子ビームの自己電場の非対称性とガイド磁場によるドリフトがこれらの現象の要因である事を示した。40GHz 平行平板型Bragg反射鏡を作成し、動作波長に対する反射鏡長さ等の諸量に関する設計指針を、ベクトルネットワークアナライザーを用いて実験的に検証した。

研究成果の概要(英文)：Planar free electron maser with intense electron beams was proposed. Propagation characteristics of cylindrical beams through parallel plates were studied experimentally. When a cylindrical beam propagated through parallel plates, the shift of the center of the beam profile and periodic deformation of the shape of the beam profile were observed. The rotation of the two beams was also observed. Using a simple model with momentum equations of linear density elements of the beam, it was clear that the asymmetric self electric field of the beam and the axial guide magnetic field caused those phenomena. A 40 GHz planar Bragg reflector was studied using a vector network analyzer. The appropriate length and the depth of its corrugate were studied.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：電子ビーム 自由電子メーザー 大強度電磁波源 ブラッグ共鳴器 テラヘルツ

1. 研究開始当初の背景

電磁波の周波数が 0.1 - 10 THz の帯域は、新たに「テラヘルツ科学」として物性物理学、工学、医療、センサー技術をはじめとして非常に広い分野での応用研究が期待されている。この周波数帯は量子エレクトロニクス(光、レーザー)の周波数の下限、古典的な相対論的電磁気学(電波、電子管)の上限の領域になるため、光源の開発が難しくテラヘルツギャップと呼ばれている。

光源開発では、レーザーや固体素子によるテラヘルツ光源は先んじて開発が進んでおり、実用的な卓上光源も実現している。電子ビームを用いる方式としては、大型加速器を用いる自由電子メーザー方式がほぼ確立された段階にあると言える。本研究では大強度電子ビームを用いた自由電子メーザー (FEM) 方式による、小型で大強度のテラヘルツ光源の開発を目指している。

電子ビームを用いた比較的小型の電磁波源としては、ジャイロトロンの研究が最も進んでいる。しかし、ジャイロトロンの高周波化には、原理的には 20 T を超える実現の難しい強い磁場を必要とする。本研究で採用するウィグラー磁場を用いた FEM は、高周波化のためには磁場強度ではなく、より高エネルギーの電子ビームが要求されるが、必要となれば技術的に解決可能である。

電子ビームを用いた光源に使用される共鳴構造は発振周波数に対応しており、高周波化に伴い構造は微細化する。一般的に FEM で用いられる円筒型構造では、半径の縮小に伴い、エネルギー源であるビーム半径も小さくなり、大強度化が困難になる。更に、円筒形に用いられる周期磁場は、半径方向の強度差が大きく、円筒型のまま複数ビームの使用は不可能である。そこで、ビームを平板化する方法が多く用いられる。平板型では周期磁場に関する問題は解決される。しかし、大強度電子ビームでは、強い自己電場によるビームの発散を防ぐために伝搬方向にガイド磁場が必須である。伝搬に必須のガイド磁場との間に生じるダイオコトロン不安定性によりビームの断面分裂等の現象が起き、平板断面を保ったままのビーム伝搬が困難になる。そこで、本研究では、複数電子ビームによる平板型自由電子メーザーを提案する。

2. 研究の目的

本研究遂行過程で、装置の老朽化に伴う絶縁破壊等の事故が再頻発した。時間と費用の面から絶縁破壊の完璧な修復は期間内に不可能と判断した。最終目的であった平板型自由電子メーザーの実験に向けて、印加電圧を下げ、複数電子ビームの矩形導波管中の伝搬特性の実験及び平板型 Bragg 共鳴器の周波数特性の検証に目的を絞った。

(1) 平板型伝搬路中での複数電子ビームの伝搬特性の検証

平板型の伝搬路中では、ビーム自身が作る

自己電場の対称性が崩れる。この非対称な電場 E と軸方向ガイド磁場 B による E×B ドリフトにより、ビーム重心の移動、断面形状の変形、複数ビームの相互回転等が起ると考えられる。ビームの伝搬に伴うこれらの現象を検証し、簡単なモデルにより、伝搬時のビームの挙動を把握する事を目的とする。

(2) 平板型 Bragg 共鳴器の動作特性の検証

従来の FEM の欠点は高周波化に伴い発生周波数モード選択性が崩れていく事にある。そこで、Bragg 反射鏡を通常のレーザーに使用される反射鏡と同様に用い、周波数選択性を増す試みが行われている。新たに提案されたアドバンスト・Bragg 反射鏡と共に平板型の反射鏡の周波数特性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

電子ビーム源としては米国 Physics International 社製 Pulserad 220G を用いた。

図 1 に装置の概略図を示す。電子ビーム源の出力に陰極をつなぎ、穴の空いた陽極に向かって電子を引き出す。陰極の先端及び陽極の穴の直径は 3,5,8 mm の 3 種類を用いた。両極の間隔は 20 mm、材質は炭素である。陽極下流の伝搬路には、図 2 に示すように、円筒容器中に矩形の伝搬路を挿入した。断面の大きさは、14.5 (高さ) × 25 (巾) mm と 10.5 × 76 mm、長さは約 1 m である。

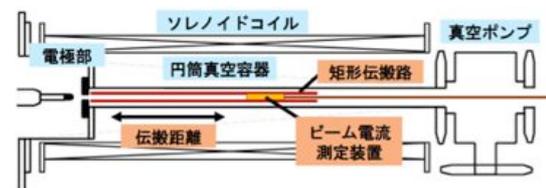


図 1 装置図



図 2 円筒容器中に挿入された矩形伝搬路

10.5 (高さ) × 76 (巾) mm

陽極の穴を出た電子はソレノイドコイルによる軸方向磁場中を伝搬する。図 3 に典型的な陰極印加電圧波形とビーム電流波形を示す。電圧は約 600 kV、約 150 ns にわたって平坦な波形が得られる。ビーム電流は、金属塊にあたった電子を、高速応答性を考慮して配置した約 0.1 Ω の抵抗を通して接地側に流し、抵抗の両端電圧より測定した。二次電子への配慮はしていない。電流は約 350 A、時

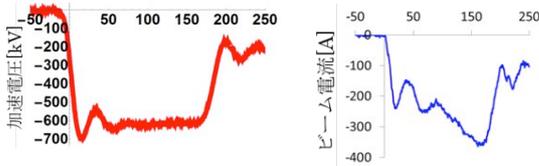


図3 典型的な波形 電圧(左), ビーム電流(右)
横軸は時間[ns]

間と共に増大する波形を示す。以後、電流値は最大電流値で表す。各実験条件下において、ビーム電流値は軸方向位置によらず、ほぼ一定の値を示した。また陰極半径のちがいににより、ビーム電流は概ね 100-500 A の値である。

二本のビームを用いた実験では、陽極は炭素板に二つの穴をあけたものを用い、陰極はその二つの穴にまたがる円形または棒状のものを用いた。二本のビームを合わせて測定したビーム電流値は、陽極の片方の穴を塞いだ場合の電流の二倍の値が得られたので、ほぼ同じ電流の二本のビームが得られたと判定した。

ビーム断面形状は、伝搬路内に置かれた真鍮板にビームを衝突させそのダメージパターン(以下 DP)により測定するので時間積分になる。真鍮板を軸方向に移動し、伝搬に伴う断面形状の変化を観測した(図4)

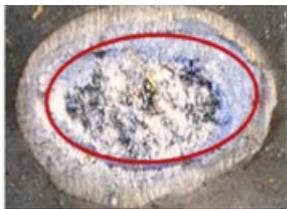


図4 ダメージパターンと最適楕円

画像解析により濃度差から求めた最外縁と目視で判断したものは良い一致を示した。そこで、断面の最外縁を目視で判定し、その形状より最適楕円を計算する。

(2) 電子ビームの伝搬モデル

薄い矩形導波管路を伝搬する複数の電子ビームの伝搬特性をできるだけ簡単なモデルで予想する事を試みた。

断面内のビーム密度は一様とし、断面を分割し、各分割の重心に線電荷が分布するモデルを用いた。線電荷の長さは無限とした。断面上で、各線電荷がどのように移動するかを考える。各線電荷の運動方程式は以下の単純な形を考える。

$$\frac{d}{dt} \gamma m \vec{v} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

m, q は線電荷の単位長さあたり質量、電荷、 γ は相対論的係数、 v は速度である。ここで、

電場 E は自分自身の鏡像電荷と、他の線状電荷とその鏡像電荷が作る電場との和であり、磁場 B は、軸方向ガイド磁場と他の線状電荷が作る磁場の和である。

ビーム断面初期位置は、実験で得られた陽極直後の DP をもとに断面の最適楕円を決定し、軸方向伝搬距離に伴う各線電荷の断面上での移動を算出した。計算は 4 次のルンゲ・クッタ法を用いた。ビーム分割数は、60 分割以上でほぼ同等な結果を得たので、念のため 80 分割とした。時間刻み幅、計算精度、鏡像電荷の採用数に関しても同様な検討の結果決定した。

(3) 平板型 Bragg 反射鏡の周波数特性

Bragg 反射鏡は既存の反射型回折格子の測定範囲に合わせて、40 GHz に設計した。以下に主なパラメータを示す。実験では反射鏡の長さ、コルゲート部の高さを変えてその特性を測定した。

材質	銅
巾, 高さ (mm)	10, 80
長さ(mm)	97,150,247
コルゲート間隔 (mm)	3.74
コルゲート高さ(mm)	0.1, 0.3, 0.5

表1 Bragg 反射鏡諸元

測定には福井大学遠赤外開発研究センターとの共同研究でベクトルネットワークアナライザ(ABmm MVNA 8-350GHz MILLIMETER VECTOR NETWORK ANALYZER)を用いた。測定系概念図を図5に示す。図左から入射した電磁波を図右で受けその透過率を測定した。

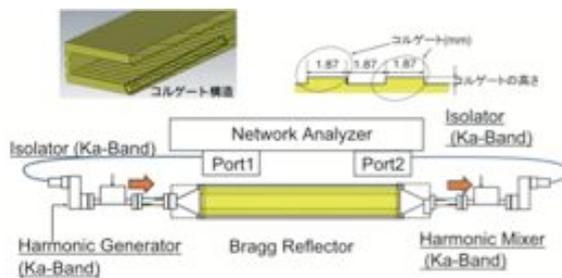


図5 Bragg 反射鏡周波数特性測定系

4. 研究成果

(1) ビーム重心の移動

初めは1本のビームを用いた。入射位置が矩形伝搬路の高さ方向の中心であった場合と、中心から上又は下に外れた場合に関して、1000 mm 伝搬後の重心の位置を観測した。

図6が実際の DP の写真である。この時、高さ 14.5 mm の伝搬路を用いている。高さ方向中心から入射された場合重心の移動は無いが、中心から下にずれた場合は重心が左に、上では右にずれている。

入射位置での高さ方向からのずれと 1000 mm 伝搬後の重心の移動距離を示したのが図

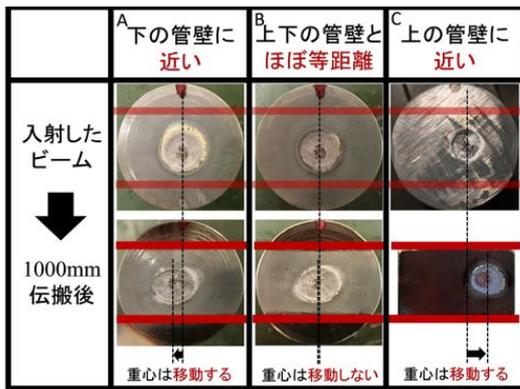


図6 入射したビームと1000mm伝搬後の断面形状の比較。ビーム径8mm,磁場0.65T

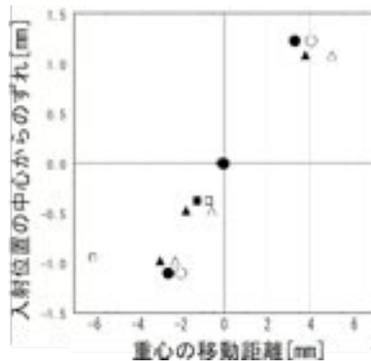


図7 重心の入射位置(縦軸)と移動距離(横軸) ビーム径○:φ5, △:φ8, □:φ10 白抜きは実験結果, 黒塗りは計算結果

7である。ビーム径によらず、入射位置でのずれが大きくなる程伝搬後の重心の移動距離が大きくなる結果を得た。これは、ずれが大きいの程電場の非対称性が強くなる事で説明可能である。図に示したように、この結果は、数値計算結果とも良い一致を示した。

(2)ビーム断面形状の変形

軸方向に伝搬するに伴い、ビーム重心の移動だけでなくビーム断面の形状が変化する。図8に断面形状の軸方向変化の例を示す。高さ14.5mmの矩形伝搬路を用いている。入射直後は円形の断面が、楕円状になり再び円状へと変化している事がわかる。また、この変形の周期はガイド磁場の強さにより異なった。右にある計算結果は実験結果と良い一致を見せている。

この結果を数値化するために、目視による最外縁から適合楕円を導き、これより、長軸の長さ/短軸の長さの比を目安とした。モデルから数値計算により求められた結果と共に図9に高さ14.5mmの伝搬路中での断面形状変化の様子を長短軸の比で表したグラフを示す。計算結果と実験結果はほぼ一致したとみなす。ガイド磁場を強くすると最大変形度に大きな差は無いが、周期が長くなる。この結果も計算結果とほぼ一致した。高さ10.5mmの伝搬路を用いた実験でも、同様な結果

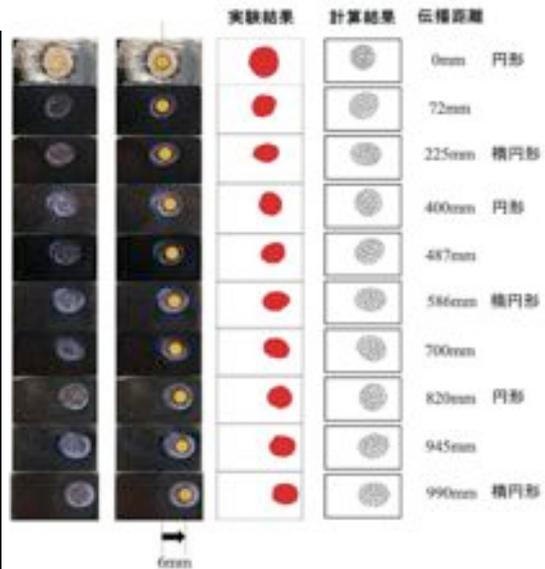


図8 伝搬に伴うビーム断面形状の変化 左二つがDP, 中央が目視による最外縁。右は計算結果, 1.03T, φ8, 350A, 矩形高さ14.5mm

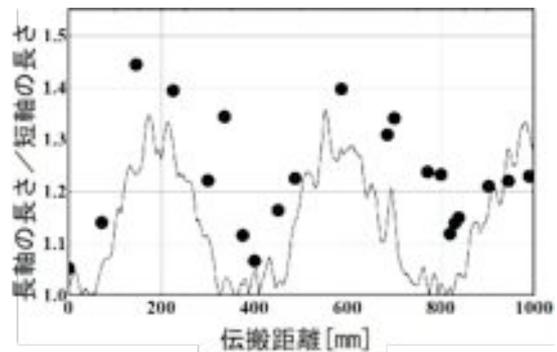


図9 長軸/短軸比の伝搬距離による変化 点が実験結果, 実線が計算結果 ビーム径φ8, 350A, 0.65T, 矩形高さ14.5mm

が得られた。

ここまでの結果から、矩形伝搬路中の軸方向伝搬に伴い、重心の移動、断面形状の周期的変形が起こる事が実験的に確かめられた。更にここで用いた、単純な数値計算モデルとの対比の結果は、移動、変形の主たる要素は電場の非対称性によるE×Bドリフトである事を示している。

(3)二本のビームの伝搬に伴う回転

一本のビームでの重心の移動、断面形状の変形に加えて、二本のビームを入射した時には、ビームの回転が起きた。図10に示すように、水平方向に離して入射された二本のビームは、相互に回転を始め、各々の断面形状も変化し、お互いの間隔を狭めつつ伝搬している。

この結果を解析するに当たり、回転角度を定義する。図11に示すように、DPから各ビームの重心を求め、直線で結ぶ。その直線と水平とのなす角を回転角と定義する。



図 10 中心間隔 8.5mm で入射されたビームの DP, 0.65T, ϕ 5, 250A, 矩形高さ 10.5mm

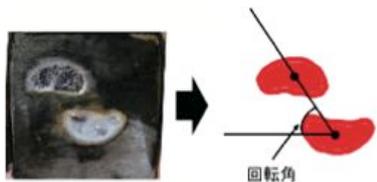


図 11 回転角の定義

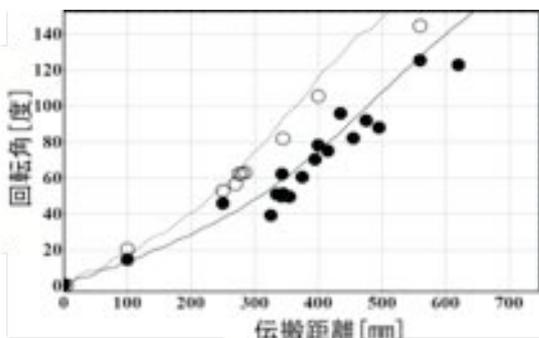


図 12 伝搬距離に伴う回転角の変化 中心間隔 8.5mm, 黒丸 (実験), 実線 (計算) は 1.03T, 白丸 (実験) 破線 (計算) は 0.8T, ϕ 8, 矩形高さ 14.5mm

軸方向距離に伴う回転角の変化は図 12 に示す様に実験と計算結果は良い一致を示した。ガイド磁場が強い方が回転角度の増加が少ない事は、この回転も $E \times B$ の力で生じている事を表している。ビーム中心間距離についても計算結果は実験結果を良く表した。

ビーム間距離を広げて行くと、回転角は減少し、十分広げると互いの相互作用はなくなりビームの回転は見られない。

矩形伝搬路中での円形ビームの伝搬に際しては、ビーム重心の移動、ビーム断面形状の周期的変形、二本のビームを伝搬させる際の回転が観測された。簡単なモデルを用いた計算結果は実験結果を良く表し、電場の非対称性と $E \times B$ ドリフトが主たる要因である事が示された。今後、複数ビーム伝搬を試みる場合、このモデルを適用して、適切なビーム電流、半径、間隔を見積もる事が可能である。

(4) 平板型 Bragg 反射鏡の周波数特性
平板型 Bragg 反射鏡の透過率の周波数特性を、

反射鏡の長さ、コルゲートの高さを変えて調べ、その結果を電磁解析プログラムの結果と比較した。

図 13 は反射鏡の長さを変えた時の周波数特性である。透過特性なので、縦軸 0db が反射無し、下側にへこんでいる部分が反射されている事を示す。まず、周波数に対する変化では、設計した 40GHz 付近と 46GHz 付近で反射が起きている。46GHz はモード変換等が起きている可能性があるが今後の検討課題とする。40GHz 付近の特性のみに注目する。長さは、97mm(26 周期)、150mm (40 周期)、247mm(66 周期)である。この中では 150mm, 40 周期の長さから 40GHz の反射鏡として動作している事がわかる。この時コルゲート高さは 0.3mm である。

次に長さ 149.6mm で、コルゲート高さを変えたときの実験結果を図 14 に示す。コルゲートの高さが高くなるにつれ、反射率は増え、反射周波数帯は広がる。この結果からコルゲート高さを 0.3mm と決定した。

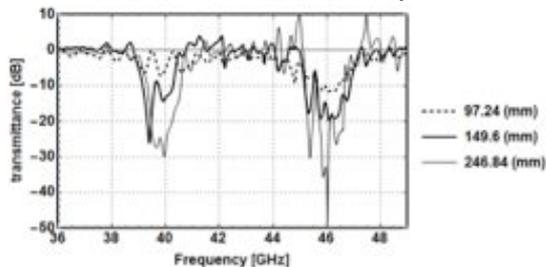


図 13 平板型 Bragg 反射鏡の長さを変えた時の透過周波数特性の変化 (実験)

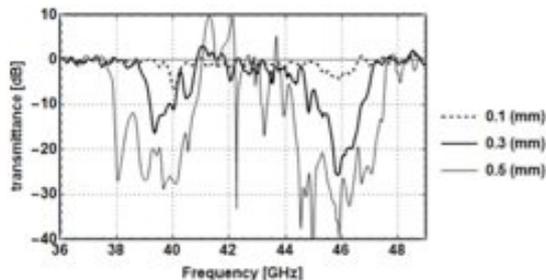


図 14 コルゲートの高さを変えたときの透過周波数特性 (実験)

上記の結果を CST-studio を用いてシミュレーションを行い比較した。図 15 が長さを変えた場合の結果である。反射率の大きな周波数に関して、概ね実験結果と一致した。高さを変えた場合も同等な結果を得たので、このシミュレーションプログラムは実験と良く対応していると判定した、そこで、アドバンスト Bragg 反射鏡について、その長さに関して計算した結果を図 16 に示す。コルゲート高さは 0.3mm である。この結果から、アドバンスト Bragg 反射鏡が図 15 で用いた通常の Bragg 反射鏡に比べ反射周波数帯が狭く、周波数の狭帯域化に有効である事がわかる。長さに関しては 60 周期 (450mm) 又はそれ以上が要求される事も予想できた。

二種類の平板型 Bragg 反射鏡について周波

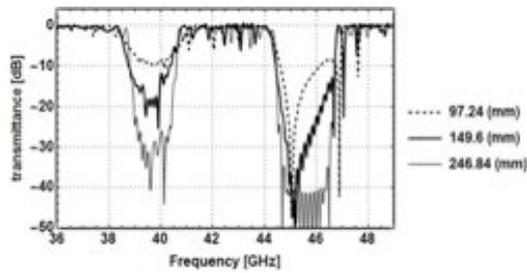


図 15 平板型 Bragg 反射鏡の長さを変えた時の透過周波数特性の変化 (シミュレーション)

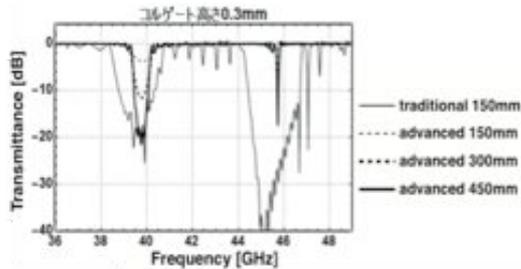


図 16 平板型アドバンスド Bragg 反射鏡の長さを変えた時の透過周波数特性の変化

数特性を検討し、平板型においても Bragg 反射鏡の特徴を十分に実現できる事が確認され、設計に関する基礎的知見を得た。

本研究の成果として、平板型伝搬路中での複数ビームの伝搬特性の実験的検証、その結果をほぼ予想できる簡単なモデルの構築、平板型 Bragg 反射鏡の周波数特性の実験的検証と平板型アドバンスド Bragg 反射鏡の周波数選択に対する狭帯域化の検証が挙げられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Dai Takagi, Kazuto Tanimura, Momoko Katsuoka, Yukihiro Soga, Keiichi Kanada, "Propagation of intense electron beams through a rectangular waveguide" 平成 28 年度核融合科学研究所共同研究「パルスパワー技術とプラズマ応用研究の最新動向」報告書、印刷中、査読無し。
- ② Takahiro Yamaguchi, Takuma Asami, Momoko Katsuoka, Ryusuke Kiyomoto, Dai Takagi, Yukihiro Soga, Keiichi Kanada, "Experimental Study on a narrow band Intense Free Electron Maser using an Intense Relativistic Electron beam with a Bragg Resonator" 平成 26 年度核融合科学研究所共同研究「パルスパワー技術とパルスパワーとその周辺技術の展開」報告書、印刷中、査読無し。

[学会発表] (計 7 件)

- ① 高木大, 谷村和斗, 勝岡桃子, 曾我之泰, 鎌田啓一, 「大強度電子ビームの平行平板中の伝搬」, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017. 3. 17-20, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府)。

- ② 高木大, 勝岡桃子, 曾我之泰, 鎌田啓一, 「矩形導波管中の複数ビームの伝搬」平成 28 年度核融合科学研究所共同研究「パルスパワー技術とプラズマ応用研究の最新動向」, 2017.1.5-6, 核融合科学研究所, 土岐市。
- ③ 高木大, 勝岡桃子, 曾我之泰, 鎌田啓一, 「大強度電子ビームの矩形導波管中の伝搬」2016 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2016. 11. 26, 富山大学五福キャンパス, 富山市。
- ④ 高木大, 勝岡桃子, 曾我之泰, 鎌田啓一, 「平行平板型伝搬路を用いた複数ビームの伝搬実験」, 2016. 9. 13-16, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 金沢市。
- ⑤ 勝岡桃子, 清本竜輔, 高木大, 栢森彩芽, 曾我之泰, 鎌田啓一, 「平行平板型伝搬路を用いたビーム伝搬実験」, 2015 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2015. 11. 28, 金沢大学角間キャンパス, 金沢市。
- ⑥ 清本竜輔, 勝岡桃子, 高木大, 栢森彩芽, 曾我之泰, 鎌田啓一, 「ヘリカルウィグラーを用いた大強度自由電子ビームによる発振実験」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2015. 9. 16-19, 関西大学 千里山キャンパス, 大阪府。
- ⑦ 山口高広, 浅見拓真, 清本竜輔, 勝岡桃子, 高木大, 曾我之泰, 鎌田啓一, 「ブラッグ共鳴器による狭帯域化に向けた自由電子メーザーの実験」平成 26 年度核融合科学研究所共同研究「パルスパワー技術とパルスパワーとその周辺技術の展開」, 2015.1.8-9, 核融合科学研究所。土岐市。

6. 研究組織

(1)研究代表者

鎌田 啓一 (KAMADA Keiichi)
金沢大学・数物科学系・教授
研究者番号：90143875

(2)研究分担者

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

(3)連携研究者

なし。

(4)研究協力者

小川 勇 (OGAWA Isamu)
福井大学・
遠赤外領域開発研究センター ・教授
研究者番号：90214014
光藤 誠太郎 (MITSUDO Seitarou)
福井大学・
遠赤外領域開発研究センター ・教授
研究者番号：60261517
吉田 光宏 (YOSHIDA Mituhiro)
高エネルギー加速器研究機構・
加速器研究施設・准教授
研究者番号：60391710