

平成 22 年 2 月 5 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18340184

研究課題名（和文） 大強度ミリ波光源を目指した  
アドバンスト・ブラッグ共鳴器の原理検証実験研究課題名（英文） Proof of principle experiments on advanced Bragg resonator  
for intense terahertz source.

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

研究成果の概要：大強度相対論的電子ビームをヘリカルウィーグラーマグ場中に入射し、自由電子メーザー機構による電磁波発振を確認した。本研究では新規に提案したアドバンスト・ブラッグ共鳴器を用いた。通常のブラッグ共鳴器に対するアドバンスト・ブラッグ共鳴器の優位性については、いまだ検討の余地が残っているが、実験で、40GHzの自由電子メーザー発振がアドバンスト・ブラッグ共鳴器を用いることで選択的に起こることを確認した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2007 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

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：テラヘルツ，ミリ波，ブラッグ共鳴器，自由電子レーザー，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 の帯域は要求にこたえる光源が少なく、テラヘルツギャップと呼ばれている。一方で、この帯域は非常に広い分野での応用が期待され、「テラヘルツ科学」と総称されつつある。

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が挙げられる。中でも、前二者の研究が先んじており、実用的な卓上光源も開発されている。この方式の光源は基本的にパルス出力で定常運転は難しい。一方、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が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。

本研究で取り扱う電子ビームとは、電子管方式で発生される比較的小型のものを指す。電子管方式によるミリ波光源の特徴は、他の方式では実現できない、長パルスまたは定常運転が可能で、比較的小型で応用に適したミリ波光源が期待できることにある。

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・大強度化には、大強度磁場等の困難な問題が残っている。

電子ビームを用いた他の有力な方式として、ウィーグラーマグ場を用いた自由電子メー

ザー (FEM) がある。従来の FEM 方式の大強度テラヘルツ光源化の現状での問題は、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、ブラッグ共鳴器を用い特定の周波数にフィードバックをかけ、周波数選択性を増す試みが行われているが、高周波化に伴い、接近した他モードとの分離が困難になる。

## 2. 研究の目的

本研究は、金沢大学の本研究室とロシア共和国ニージネーノブゴロドにあるロシア科学アカデミー応用物理学研究所の N. S. Ginzburg 教授との共同研究である。テラヘルツ光源を目指した FEM には、上記のように周波数選択性の脆弱性という弱点がある。本研究では、この弱点を克服する方法として、Ginzburg 教授が提案したアドバンスト・ブラッグ共鳴器による周波数選択性の改善効果の原理検証実験を遂行した。アドバンスト・ブラッグ共鳴器は原理的に定常理論を用いており、他の方式での周波数選択性向上への応用も考えられる。

## 3. 研究の方法

### (1) アドバンスト・ブラッグ共鳴器

これまでのブラッグ共鳴器では図 1 上にあるように、従来のブラッグ反射鏡 (以後ノーマル・ブラッグ反射鏡) をレーザーの反射鏡の様に用いている。本研究では、図 1 下のように、ブラッグ共鳴器の上流側にアドバンスト・ブラッグ反射鏡を用いる方式を用いた。以後、上流をアドバンスト・ブラッグ反射鏡、下流をノーマル・ブラッグ反射鏡にしたものの全体をアドバンスト・ブラッグ共鳴器と呼ぶ。これに対して、従来通り上流下流共にノーマル・ブラッグ反射鏡を用いたものをノーマル・ブラッグ共鳴器と呼ぶ。

ブラッグ反射鏡は図 1 の様に円形導波管の内径が周期的に変化していることにより、入射電磁波のうち、周期に対応した電磁波が同一モードまたは他のモードに変換されて入射側に反射される。この反射はモード結合理論により説明される。ノーマル・ブラッグ反射鏡内のモードは単一ではないので、近傍に他のモードが存在すると、設計したモード結合以外のモードで電磁波が反射される場合がある。高周波化に伴い他の結合の交点が多くなり、ノーマル・ブラッグ反射鏡のモード選択性は崩れていく。

これに対して、アドバンスト・ブラッグ反射鏡では、周期の長さがノーマル・ブラッグ反射鏡の 2 倍であり、更に、前進波と後進波の交点部の周波数に、他のモードの遮断周波数が接近して存在するように設計する。遮断周波数近傍の波を介在するという条件を満たす交点のみで、入射波 遮断周波数の波

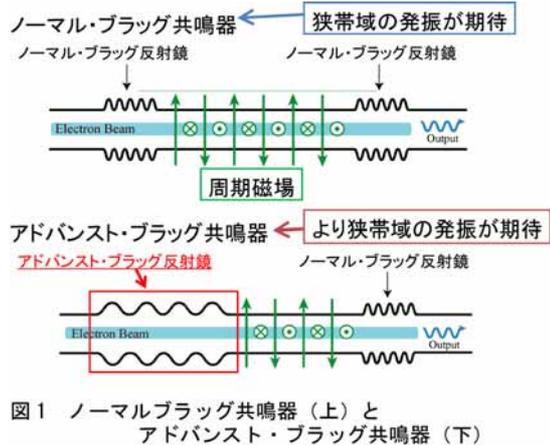


図 1 ノーマルブラッグ共鳴器 (上) とアドバンスト・ブラッグ共鳴器 (下)

反射波といった過程が安定して起きて、ノーマル・ブラッグ反射鏡に比べて強い周波数選択性が期待される。

図 1 で左端から入射された電子ビームは、二つの反射鏡の中間の部分で FEM 機構により電磁波を発生する。このうち、ノーマル・ブラッグ反射鏡の条件を満たす波が上流に反射され、更に、アドバンスト・ブラッグ反射鏡で、より強い周波数選択を受け、下流側に反射される。

### (2) 大強度電子ビームの整備

本研究で用いた大強度相対論的電子ビーム (Intense Relativistic Electron Beam, 以下 IREB と略) とは、エネルギーは 0.5 MeV から数 MeV 程度であるが、ビーム電流は 1 kA 級で、ビーム半径は数 cm 程度なので、伝搬や共鳴器等との相互作用時に自己場が大きな影響を及ぼすという特徴を持つ。パルス幅は 10 ns から数 100 ns である。核融合や次世代加速器等での応用が期待される種々の大強度電磁波源の原理検証実験に、IREB は用いられる。その際にビームエネルギーの変動は極力小さく抑えることが要求される。

IREB のエネルギーは、パルス整形線路と負荷である電極部のインピーダンスの関係で決定される。しかし、冷陰極放電による電子放出には電極部プラズマの生成が必須であり、電極のインピーダンスはこのプラズマ

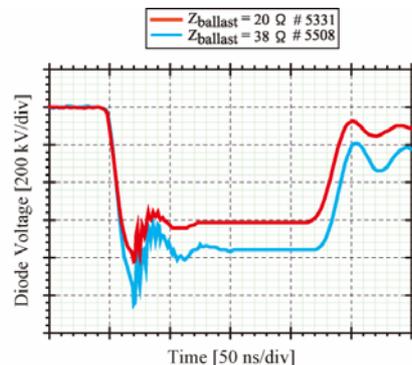


図 2 電極に並列に抵抗を配置する事でダイオード電圧波形の時間的変化は 5% 以内に抑えられた

の時間的发展に大きく依存している。具体的には、時間と共に実効的な電極間隔は狭まり、インピーダンスは時間と共に減少する。この結果、何もしなければ時間と共にビームエネルギーは減少する。電極上のプラズマの制御は困難である。本研究では電極部に並列に抵抗を用意して、電極部インピーダンスの変化の影響をエネルギー変動幅 5 % 程度に抑えた(図 2)。

### (3)ウィーグラーコイルの設計製作

現有の IREB 発生装置の電圧、周波数測定器の測定可能周波数、コイル電源の容量等々を勘案し、ヘリカルウィーグラーコイルを設計した(図 3)。管径約 20 mm、周期 48 mm、最大電流 9 kA において、半径方向周期磁場 0.18 T を発生する。



図3 ウィーグラーコイル

### (4)ブラッグ鏡の設計製作

ノーマル・ブラッグ反射鏡の設計は、モード結合理論に沿って、数値計算から求めた。実験の進展に伴い、54 GHz、40 GHz の二種類を製作した。数値計算と並行してコンピューターシミュレーションを行い、結果は図 4 に見るようによい一致を示した。

アドバンスド・ブラッグ反射鏡は 40 GHz で設計した。主にコンピューターシミュレーションを用い微細構造を決定した。図 5 に示すように、ノーマル・ブラッグ反射鏡に比べて、非常に狭帯域での周波数応答性を示し、周波数選択性の向上が期待できた。

### (5)実験装置

図 6 に実験装置の全体像を示す。陽極中心の 3 mm の穴を通過した電子ビームは、真

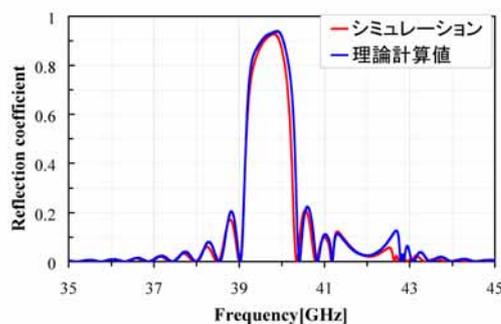


図4 40 GHz ブラッグ反射鏡の周波数応答

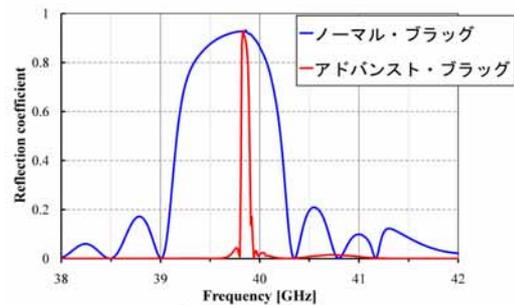


図5 ノーマル・ブラッグ反射鏡のとアドバンスド・ブラッグ反射鏡の周波数応答の比較

空容器中を伝搬する。伝搬部には軸方向に図 6 のようなガイド磁場がかけられる。実験全体を通じて装置全体の真空度は  $1 \times 10^{-5}$  Torr に保たれている。

陽極より約 300 mm の位置から半径方向のウィーグラー磁場が周期的にかかる。断続的な条件変化による電子ビームの発散等を抑えるためにウィーグラー磁場は入口と出口で漸的に変化している。ノーマルおよびアドバンスド・ブラッグ反射鏡は図 6 で赤い陰影部で示した位置に配置される。

発生した電磁波は下流の亚克力窓から大気中に放射される。亚克力窓直後にはホーンアンテナが配置され、導波管の Cutoff、バンドパスフィルター、ローパスフィルターからなる電磁波測定系で測定される。周波数帯域は、26.5-31.0, 30.7-35.7, 35.5-40.0, 40.0 GHz 以上で非常に大まかな周波数把握に留まった。遮断周波数を利用した高域通過型周波数フィルターも併用した。

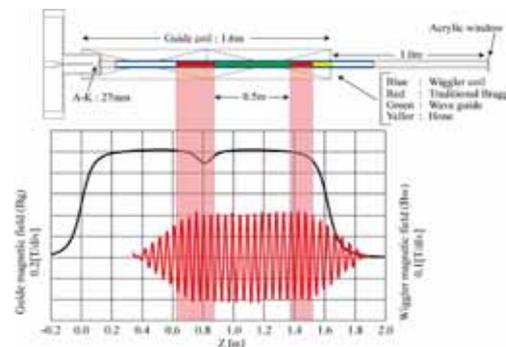


図6 実験装置図

## 4. 研究成果

### (1)ウィーグラーコイルのみによる FEM 発振

最初に FEM 機構による周波数 54 GHz の発振の観測を行った。40 GHz 以上の検出器で、ウィーグラー磁場強度の増大に伴う出力の増大が観測できれば、FEM 発振機構が検出されたとおおまかに判定できる。結果は、観測したすべての周波数帯にわたり出力が検出された。しかも、すべての周波数帯において、ウィーグラー磁場の強さと電磁波出力の間に相関は見られなかった。40 GHz 以上の電磁波出力の結果を図 7 に示す。上に示されているのは電圧波形である(以下の図も同様)。

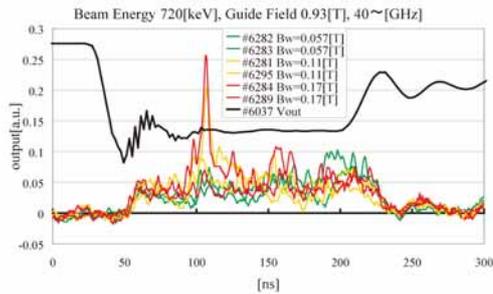


図7 ウィーグラー磁場強度を変化させたときの 40 GHz 以上での電磁波出力。

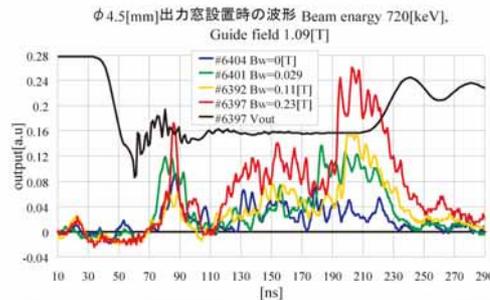


図8 ウィーグラー磁場強度を変化させたときの 40 GHz 以上での電磁波出力。直径 4.5 mm のフィルターを用いた

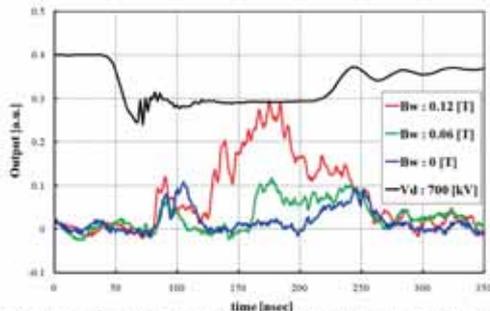


図9 ウィーグラー磁場強度を変化させたときの 40 GHz 以上での電磁波出力。54 GHz ノーマル・ブラッグ共鳴器を使用した。

そこで、自由電子レーザー機構のモードで、周波数約 50 GHz 以上が観測できるように、金属板に直径 4.5 mm の穴をあけたものを設置して観測した結果が図 8 である。図 8 の横軸の値で 110 ns 以降では、ウィーグラー磁場強度の増大と共に出力の増大する電磁波検出された。先にも述べたが、FEM 発振はウィーグラー磁場強度の上昇とともに出力を増すはずである。更に、電磁波出力は、ビームの入射後約 100 ns 程度の成長時間を経て観測される事が理論的に予測されている。この事からも 110 ns 以降の電磁波出力は FEM 発振であろうと推測できる。モードは分散関係から  $TE_{11}$  モードと推定される。

## (2) ノーマル・ブラッグ共鳴器を用いた FEM 発振

54 GHz ノーマル・ブラッグ共鳴器を用いた実験結果が図 9 である。周波数は 40 GHz 以上の出力を示している。明らかにウィーグラー磁場強度の増大と共に、電磁波出力の増大が見られる。また、同じ状況で、高周波通過型フィルターで 60 GHz のものを設置したと

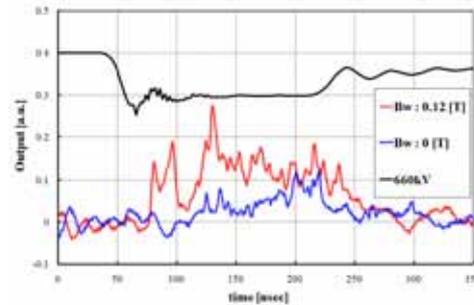


図10 40 GHz ノーマル・ブラッグ共鳴器を用いた時の 33.3 GHz 以上での電磁波出力。ウィーグラー磁場強度を変化させた。

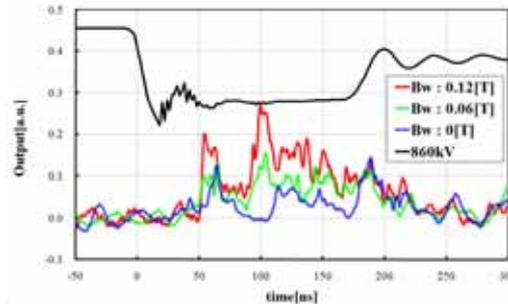


図11 40 GHz アドバンスト・ブラッグ共鳴器を用いた時の 33.3 GHz 以上での電磁波出力。ウィーグラー磁場強度を変化させた。

ころ、電磁波出力はなくなった。このことから、ノーマル・ブラッグ共鳴器を用いて、FEM 機構で発振された 54 GHz 付近の電磁波が観測されたと結論する。モードは  $TE_{11}$  モードであろうと推測される。

ここで、周波数設定を大幅に変更し、設定周波数を 40 GHz に切り替えた。観測系の作成・使用に関する制限から周波数を変更した。観測装置は同じで、Ka-3(35.5-40.0 GHz)のディテクターを用いた。

周波数 40 GHz の場合もノーマル・ブラッグ共鳴器を設置しない実験では、やはり、ウィーグラー磁場の強度に依存する電磁波出力は観測できなかった。

図 10 に見るように、ここでも、ノーマル・ブラッグ共鳴器を用いる事で、ウィーグラー磁場強度の増大と共に増加する電磁波出力が得られた。この出力も FEM 発振モードの分散関係からモードは  $TE_{11}$  モードであろうと推測される。

## (3) アドバンスト・ブラッグ共鳴器を用いた FEM 発振

上述の 40GHz ノーマル・ラッグ共鳴器の上流部をアドバンスト・ブラッグ反射鏡に置き換え、下流部にノーマル・ブラッグ反射鏡を用いた。アドバンスト・ブラッグ共鳴器の実験結果を図 11 に示す。ノーマル・ブラッグ共鳴器と同様に、ウィーグラー磁場強度の増大に伴って増加する電磁波出力が、ノーマル・ブラッグ共鳴器の結果と同じ周波数帯で観測された。現状ではアドバンスト・ブラッグ共鳴器の周波数選択性の優位性を実験的に確認できる結果は得られていない。

#### (4)結論

本研究では、自由電子メーザー機構による大強度電磁波源の周波数選択性の向上を目指した。自由電子メーザーによる電磁波発振では、周波数選択性が悪く、光源としての性能が低いという欠点がある。そこで、共同研究者により新たに提案されたアドバント・ブラッグ共鳴器を用い、周波数選択性の向上の原理検証実験を行った。

エネルギーの時間的変動を、時間幅約 120 ns にわたりエネルギー変動を概ね 5%程度に抑えた大強度相対論的電子ビームを用いた実験の主な結論を列挙する。

- 大強度電子ビームとヘリカルウィーグラー磁場、軸方向磁場を用いた FEM 発振実験では、寄生発振が幅広い周波数帯で観測され、自由電子メーザー発振は確認できなかった。
- 同上的実験で、FEM 発振で期待される周波数帯のみを抽出したところ、ウィーグラー磁場強度の増大と共に増加する電磁波が観測された。
- 更に、ノーマル・ブラッグ共鳴器、アドバント・ブラッグ共鳴器を用いた場合、40 GHz の周波数で双方の場合共にウィーグラー磁場強度に対応した電磁波が観測された。この事から、両共鳴器を用いる事で、FEM 機構による発振が選択されているであろうと予測される。
- 現時点では、アドバント・ブラッグ共鳴器のノーマル・ブラッグ共鳴器に対する優位性は確認できていない。

現在、反射型回折格子を用いた波長分光計を製作し、アドバント・ブラッグ共鳴器の使用による周波数選択性の向上の検証を行っている。

ここまでに、電磁波出力値については、校正を行っていないので、触れてこなかったが、全出力で概ね 1 MW を超える出力であろうと推定される。従って、自由電子メーザー発振の出力はこれ以下で、予想外に出力が低い状況にある。その原因は主に電子ビームの配置にあると考えている。現在、ビーム径、ガイド磁場強度、共鳴器の位置・間隔を変化させ、自由電子メーザー発振出力の向上を試みている。

原理検証実験として、発振周波数帯域のアドバント・ブラッグ共鳴器の使用による狭小化の確認と共に、現装置のパラメーターで可能な、高周波化の実験を続けている。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたっては金沢大学大学院自然科学研究科博士前期課程の大学院生であった相澤公祐君、河村実希子君、小田原周平君、博士前期課程の大学院生、近藤史親君、野瀬孔太君、三澤賢君、柳晶子君、の貢

献が大きいことをここに記し、感謝の意を表します。更に平成 20 年 11 月に赴任された金沢大学大学院自然科学研究科助教の曾我之泰博士には、赴任直後にかかわらず大きな協力を仰ぎました、ここに感謝の意を表します。

#### 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 10 件)

1. S. Odawara, F. Kondo, K. Tamura, Y. Soga, K. Kamada, N. S. Ginzburg, "Experimental study on free electron laser using advanced Bragg resonator," 平成 20 年度核融合科学研究所共同研究「パルスパワー技術を用いたプラズマ科学の新展開」, 印刷中、査読なし。
2. N. S. Ginzburg, A. M. Malkin, N. Yu. Peskov, A. S. Sergeev, V. Yu. Zaslavsky, K. Kamada, Y. Soga, "Tunable terahertz band planar Bragg reflectors", Appl. Phys Lett. 95, 043504 (2009). 査読あり。
3. N. S. Ginzburg, A. M. Malkin, N. Yu. P. eskov, A. S. Sergeev, V. Yu. Zaslavsky, K. Kamada, R. Ando, "Free electron laser with terahertz band Bragg reflectors", Phys Rev. ST Accel. Beams 12, 060702 -1-7 (2009). 査読あり。
4. 鎌田啓一、「パルスパワー技術を用いたプラズマ技術の新展開」, 平成 20 年度核融合科学研究所「一般共同研究成果報告書」 pp534-538. 査読なし。
5. K. Kamada, M. Kawamura, K. Aizawa, S. Odawara, R. Ando, N. S. Ginzburg, A. M. Malkin, N. Yu. Peskov, A. S. Sergeev, V. Yu. Zaslavsky, "Theory and design of the free electron MASER with advanced Bragg resonator", Proc. of 2008 Global Congress on Microwave Energy Applications (Otsu, JAPAN AUG. 2008) pp. 577-580. 査読なし。
6. K. Kamada, M. Kawamura, K. Aizawa, S. Odawara, R. Ando, N. S. Ginzburg, I. V. Zotova, A. M. Malkin, N. Yu. Peskov, A. S. Sergeev, V. Yu. Zaslavsky, "Strong microwave studies in Kanazawa University (Topical Lecture)", Proc. of 7th International Workshop "Strong Microwaves: Sources and Applications"(Nizhny Novgorod, Russia July. 2008) pp.215-223. 査読なし。
7. K. Kawamura, K. Aizawa, S. Odawara, K. Kamada and N. S. Ginzburg, "Free electron maser with advanced Bragg resonator for millimeter wavesource", 平成 19 年度核融合科学研究所共同研究「パルスパワー技術とそのプラズマ科学への応用」報告書

pp.88-93. 査読なし。

8. K. Aizawa, K. Kawamura, S. Odawara, K. Kamada and N. S. Ginzburg, "5GHz superradiance using newly designed corrugated waveguide", 平成 19 年度核融合科学研究所共同研究「パルスパワー技術とそのプラズマ科学への応用」報告書 pp.94-99. 査読なし。

9. N. S. Ginzburg, A. M. Malkin, N. Yu. Peskov, R. M. Rozental, A. S. Sergeev, V. Yu. Zaslavsky, K. Kamada, R. Ando, "Development of FEM based on coupling of propagating and trapped waves in advanced Bragg resonators", Conference Digest of the Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millimetre Waves and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 2007, V.1, pp.565-566. 査読なし。

10. A. M. Malkin, N. S. Ginzburg, N. Peskov, R. Rozental, A. Sergeev, V. Zaslavsky, R. Ando, K. Kamada, "EL with Orotron Type Feedback", Proc. of Int. Conf. of Free-Electron Lasers (FEL-2007), Budker INP, Novosibirsk, Russia, 2007, p.324-325. 査読なし。

〔学会発表〕(計 11 件)

1. 近藤史親, 田村かおり, 小田原周平, 曾我之泰, 鎌田啓一, 「大強度電子ビームを用いた自由電子レーザーの発振実験」日本物理学会第 64 回年次大会(東京), 2009 年 3 月 30 日。

2. 小田原周平, 近藤史親, 田村かおり, 曾我之泰, 鎌田啓一, 「ヘリカルウィグラーを用いた自由電子レーザーの研究」平成 20 年度 NIFS 共同研究研究会「パルスパワー技術を用いたプラズマ科学の新展開」(岐阜核融合科学研究所), 2009 年 3 月 6 日

3. 近藤史親, 小田原周平, 田村かおり, 永井創世, 野瀬孔太, 曾我之泰, 鎌田啓一, 「ヘリカルウィグラーコイルによる FEM 発振」日本物理学会北陸支部講演会(福井), 2008 年 11 月 29 日。

4. 田村かおり, 小田原周平, 近藤史親, 柳 晶子, 三澤 賢, 曾我之泰, 安藤利得, 鎌田啓一, 「パルス電磁波に対する周波数測定システムの構築」日本物理学会北陸支部講演会(福井), 2008 年 11 月 29 日。

5. 小田原周平, 近藤史親, 田村かおり, 廣地卓也, 安藤利得, 鎌田啓一, 「ヘリカルウィグラーコイルを用いた FEM 発振実験」日本物理学会 2008 年秋季大会(岩手) 2008 年 9 月 21 日

6. K. Kamada, M. Kawamura, K. Aizawa, S. Odawara, R. Ando, N.S.Ginzburg, A.M. Malkin, N.Yu.Peskov, A.S.Sergeev, V.Yu.Zaslavsky, "Theory and design of the free electron MASER with advanced Bragg resonator", 2008 Global Congress on Microwave

Energy Applications (Otsu, JAPAN AUG. 2008) (滋賀), 2008 年 8 月 8 日

7. K. Kamada, M. Kawamura, K. Aizawa, S. Odawara, R. Ando, N.S.Ginzburg, I. V. Zotova, A.M. Malkin, N.Yu.Peskov, A.S.Sergeev, V.Yu.Zaslavsky, "Development of high-power microwave sources in Kanazawa University (Topical Lecture).", 7th International Workshop "Strong Microwaves: Sources and Applications"(Nizhny Novgorod, Russia July. 2008), ロシア, 2008 年 8 月 1 日

8. 小田原周平, 河村実希子, 相澤公佑, 安藤利得, 鎌田啓一, 「アドバンスト・ブラッグ共鳴器による発振の予備実験」, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 26 日 (大阪)

9. 河村実希子, 相澤公佑, 小田原周平, 鎌田啓一, 「ミリ波光源を目指したアドバンストブラッグ共鳴器の開発」, 平成 19 年度位 NIFS 共同研究研究会「パルスパワー技術とプラズマ科学への応用」, (岐阜核融合科学研究所) 2008 年 3 月 7 日

10. 河村実希子, 鎌田啓一, 小田原周平, 近藤史親, 田村かおり, 廣地卓也, 安藤利得, 鎌田啓一, 「大強度電子ビームのエネルギーの平坦化」, 日本物理学会北陸支部定例学術講演会, (富山) 2007 年 12 月 1 日

11. 小田原周平, 相澤公佑, 河村実希子, 鎌田啓一, 「大強度電子ビームの金属壁近傍伝搬特性の検証」, 日本物理学会北陸支部定例学術講演会, (富山) 2007 年 12 月 1 日

## 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

安藤 利得 (ANDO RITOKU)

金沢大学・数物科学系・准教授

研究者番号: 80212679