

Title	Studies on an RF Gun Injector for Free Electron Laser
Author(s)	小田, 史彦
Citation	大阪大学, 2003, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/44383
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	小 田 史 彦
博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)
学位記番号	第 1 7 3 8 4 号
学位授与年月日	平成 15 年 1 月 17 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文名	Studies on an RF Gun Injector for Free Electron Laser (自由電子レーザ用高周波電子銃に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教授 菅 滋正
	(副査) 教授 那須 三郎 教授 占部 伸二 教授 磯山 悟朗

論 文 内 容 の 要 旨

自由電子レーザ (FEL, free electron laser) は相対論的速度まで加速された電子から放射される電磁波を、共振器により増幅してコヒーレント光を得るユニークな光源であり、広い範囲で波長連続可変・高ピークパワーであるという優れた特徴を持つ。しかし装置が大型・高価で運転が煩雑であることが加速器を用いるが故の欠点であり、FEL の発明 (1977 年) から 20 年以上経過した現在でも、FEL 光の利用研究はあまり進展していないのが実状である。

そこで今回化学・生命科学等の広範な利用研究が期待できる中赤外領域の光を発振する小型でユーザフレンドリーな FEL 装置 (MIR-FEL, middle-infrared free electron laser) を開発した。その電子源として、電子入射部を飛躍的に小型化できかつ高い輝度の電子ビームを発生可能な熱陰極型高周波電子銃 (RF ガン) を採用した。MIR-FEL の発振 (設計波長 5-16 μm) に必要な電子ビームの条件から、RF ガンからの出力ビームの設計目標値を設定した。熱陰極型 RF ガンの最大の欠点は空洞内を逆送した電子によりカソードが衝撃されカソード温度が上昇する (バックボンバードメント) ため入力 RF のパルス幅 (マクロパルス幅) が制限されることである。FEL 運転に必要な長パルス運転を実現させるために、バックボンバードメントを出来る限り小さくすることを第一の設計目標とした。

出力ビームの品質を損なわずにバックボンバードメントを従来型空洞より大幅に小さくできる空洞構造として、2 つの加速空洞をビーム軸上の結合空洞により結合した構造 On-axis Coupled Structure, OCS) を考案した。この空洞構造の特徴として、加速モードとしてビームローディングや共振周波数誤差に対して安定な定在波 $\pi/2$ モードを用いていること、空洞間の結合定数を変えることで、加速電界分布を大きく変化させることができ設計自由度が大きいことが挙げられる。空洞形状は電磁場分布・軌道解析コード (EMSYS) により詳細設計し、その結果従来型単空洞 RF ガンに比べてバックボンバードメントをほぼ半減でき、かつ目標とする出力ビーム品質を得られるよう最適化することができた。

シミュレーションより最適化された OCS 空洞型 RF ガンを製作し、空洞パラメータ (共振周波数、空洞間結合定数、軸上加速電界分布、入力カップラー結合定数) の測定を行った。その結果、全てのパラメータについてはほぼ計算通りの空洞性能であることを確認した。

製作した OCS 空洞型 RF ガンを MIR-FEL にインストールし、FEL 発振のためのビーム調整を行い、ビーム特性 (パルスあたり電荷量・マクロパルス幅・エネルギー分布・マイクロパンチ長・ビームエミッタンス・ビームサイズ) を測定した。エネルギー分布についてはシミュレーションで考慮していなかったバックボンバードメントによるマク

ロパルス内でのエネルギーの低下（約 20%）があることがわかったが、後段の加速管で加速位相を僅かに遅らせることによりこれを補正する運転を確立した。その他の特性についてもほぼ設計値どおりかつ設計波長域での FEL 発振条件を満足するビームを得ることができた。またバックボンバードメントについては単空洞型 RF ガンに比較してバックボンバードメント量は半分以下に抑えられていること、カソード近傍に横方向磁場を印加することでさらに約 40%低減可能であることを確認した。

MIR-FEL はビームエネルギー 32~40 MeV の運転で発振波長 4.0~16.0 μm を達成し、その発振波長全域で飽和出力を得ることができた。発振波長 7.9 μm において FEL の最大飽和出力 37 kW を得た。このときの FEL ゲインは約 21%であった。この飽和出力及びゲインは理論値とほぼ一致することを確認した。

論文審査の結果の要旨

相対論的速度まで加速された電子から放射される電磁波を共振器により増幅してコヒーレント光を得るユニークな光源が自由電子レーザー（free electron laser : FEL）である。広い範囲で波長連続可変・高ピークパワーであるという優れた特徴を持つ。しかし装置が大型・高価で運転が煩雑であることからその発明（1977 年）から 20 年以上経過した現在でも、FEL 光の利用研究は期待通りには進展していない。

本研究は中赤外領域の光を発振する小型の FEL 装置の開発に関するものである。電子入射部を飛躍的に小型化しかつ高輝度の電子ビーム発生が可能な熱陰極型高周波電子銃（RF ガン）の開発に成功したものである。設計波長 5.16 μm の発振に必要な電子ビームの条件を検討し、RF ガンからの出力ビームの設計目標値を設定してある。熱陰極型 RF ガンの最大の欠点は空洞内を逆送した電子によりカソードが衝撃されカソード温度が上昇する（バックボンバードメント）ため入力 RF のパルス幅（マクロパルス幅）が制限されることであり、このバックボンバードメントを出来る限り小さくすることが目標とされた。

バックボンバードメントを大幅に小さくできる空洞構造として、2つの加速空洞をビーム軸上の結合空洞により結合した構造 On-axis Coupled Structure、OCS が考案された。空洞形状は電磁場分布・軌道解析コード（EMSYS）により詳細設計された。その結果従来型単空洞 RF ガンに比べてバックボンバードメントをほぼ半減できるよう最適化できた。

この OCS 空洞型 RF ガンを製作し、空洞パラメータ（共振周波数、空洞間結合定数、軸上加速電界分布、入力カプラ結合定数）の測定が行われた。製作された OCS 空洞型 RF ガンを MIR-FEL にインストールし、FEL 発振のためのビーム調整を行い、ビーム特性（パルスあたり電荷量・マクロパルス幅・エネルギー分布・マイクロバンチ長・ビームエミッタンス・ビームサイズ）が測定された。シミュレーションで考慮されていなかったマクロパルス内でのエネルギーの低下（約 20%）があることがわかったが、後段の加速管で加速位相を僅かに遅らせることによりこれを補正する運転が確立された。

その結果ビームエネルギー 32~40 MeV の運転で発振波長 4.0~16.0 μm を達成し、その発振波長全域で飽和出力を得た。たとえば発振波長 7.9 μm において FEL の最大飽和出力は 37 kW に達する。この研究は設計から装置作成まで一貫したものであり、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。