

氏 名	さわ 澤 村 勝
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3551 号
学位授与の日付	平 成 12 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目	大出力・高効率自由電子レーザーのための超伝導リニアックの研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 今 西 信 嗣 教 授 福 山 淳 教 授 伊 藤 秋 男

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、超伝導リニアックについて細部にわたる研究を行い、自由電子レーザー (FEL) の効率と出力の上昇に必要な諸条件を明らかにし、大出力・高効率 FEL を実現した結果をまとめたものであり、本文 7 章と補填 2 からなっている。

第 1 章は序論であり、FEL の歴史的発展、各種加速器を用いた FEL 発生方式の概説、FEL の特徴と高効率・大出力を得るうえでの問題点を列挙したのち、超伝導リニアックの研究により大出力・高効率 FEL の実現が可能であると述べている。さらに各章の構成を簡潔に記している。

第 2 章では、FEL の発生原理、基本的機器構成、ならびに波長可変性、大出力および高効率という特徴について先ず述べている。つぎに、FEL に必要な電子ビームおよび光の性質について考察している。FEL で電子ビームからレーザー光に変換される割合は、光の増幅率がプラスであるという条件からアンジュレータの周期数を N とすると、 $1/2N$ 以下であること、さらにエネルギー広がりやエミッタンスもアンジュレータの特性から上限が設定されることを述べている。具体例として、周期長 33mm、周期数 50、アンジュレータパラメータ 0.7 のアンジュレータを用いる場合、15MeV のエネルギーのとき、エネルギー広がり 0.5% 以下、エミッタンス約 $5 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 以下の電子ビームが要求されることを示している。

第 3 章では、FEL の効率と出力について基本的要因を分析している。FEL の効率を加速器効率と光変換効率の積と定義し、まず、高周波系と冷凍機系の上に注目して常伝導加速器と超伝導加速器の加速器効率の比較を行っている。連続波モードで運転できるように冷凍機を取り付けた場合は 5% デューティ以上で、超伝導の方が常伝導より消費電力が小さくなる。加速電界 5 MV/m、平均電子ビーム電流 4 mA の連続波モード運転のとき、加速器効率は常伝導で 1.2%、超伝導で 17% となる。さらに、FEL 発振後残ったエネルギーを回収すると加速器効率は、超伝導ではビーム電力と冷凍機電力の比になり、常伝導ではビーム電力と空洞壁での高周波損失との比になる。空洞壁での高周波損失が大きい常伝導ではエネルギー回収によってもほとんど加速効率は変わらないが、超伝導では 24% と改善される。さらに加速器効率を上げるためには、電子ビーム電流の増強、常伝導では高周波変換効率を良くすること、超伝導では冷凍機電力を減らすことが必要になることを示している。光変換効率は加速器の種類によらず数%程度である。

FEL 出力を大きくするためにはマイクロパルス内の電荷を増やすこと、マイクロパルスの繰返しを大きくすること、デューティを大きくすることが必要であり、そのためには低い周波数の超伝導空洞が最適であることを述べている。

第 4 章では、具体的な例として、電子銃、サブハーモニックバンチャ (SHB)、2 台の単セル空洞と 2 台の 5 セル空洞で構成される FEL 用超伝導加速器についての設計概念について述べている。まず、周波数として 500MHz 帯を選んだこと、電子銃として長時間運転可能な熱陰極カソードを用いたことについて述べている。各加速器要素のパラメータを最適化するとともに、電子銃電圧を高くすることにより SHB での速度変調の非線形性が空間電荷効果によりうまく打ち消されることを利用してパルス幅が最小になるようにしたこと、また SHB のみで全粒子が最も圧縮できるようにサブハーモニック数を $1/6$ とし大電流化をはかったことについて述べている。2 台の超伝導加速空洞はいずれも $\beta = 1$ の空洞を用い、 $\beta < 1$ での位相のずれやパルス発散は各空洞の高周波制御を別々に行うことによって解決したことを述べている。SHB でパルス幅が

最小になる前に電子ビームを単空洞に入射し、1段目の単空洞でさらに速度変調をかけ、つぎの単空洞までのドリフト空間でビーム圧縮が起こるようにしたことを言及している。

第5章では、超伝導加速器の製作および性能試験について詳述している。SHBの周波数は83.3MHzであり、加速空洞の構造は $\lambda/4$ 同軸型加速管である。この空洞はQ値が高く、必要な高周波電力が小さくなるように設計し、製作後各種Q値の測定を行い加速試験に必要なギャップ電圧の校正を行っている。加速器は単空洞と5セル空洞の2種類ある。それぞれ加速空洞、入力カップラー、ピックアップカップラー、高次モード(HOM)カップラー、2種類の周波数チューナー、クライオスタットで構成されている。空洞の無負荷Q値が 1×10^9 のとき加速電界は約5 MV/mである。入力カップラーは可変型とした。結合係数を約2桁半変えることができる。高周波電源は83.3MHz用と499.8MHz用があるが、すべて全半導体高周波増幅器を用いた。出力はSHB用が5 kW、単空洞用が6 kW、5セル空洞用が50 kWである。各増幅器は350 Wから1.8 kW程度の出力を1モジュールとして、これらを多数合成して大出力を作り出すものである。この高周波電源からの高周波の安定度は、空洞を負荷として空洞内の高周波電界をフィードバック信号として用いることにより、振幅で1%以下、位相で0.6deg以下である。

第6章では、加速・ビーム圧縮試験およびFEL発振の結果について述べている。

電子ビームパルス幅の測定を電子銃の出口、SHB後のドリフト空間終端およびアンジュレータ中央で行い、パルス幅の半値幅としてそれぞれの位置で4 ns, 70ps, 22psを得たことを述べている。アンジュレータを通過する電子ビームのピーク電流は13A程度となり、FELの発振実験の結果、波長25 μ m, 出力0.1kWの大出力発振に成功したことを述べている。

第7章は、まとめであり、本論文で得られた成果について要約している。

補填では、常伝導空洞および超伝導空洞のQ値について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、超伝導リニアックについて細部にわたる研究を行い、自由電子レーザー(FEL)の効率と出力の上昇に必要な諸条件を明らかにし、大出力・高効率FELを実現した結果をまとめたものであり、主な成果は次のとおりである。

1. FELの効率は、一般には、加速器効率と光変換効率の積で表される。光変換効率は加速器の種類によらず数%程度である。したがって、FEL効率の良し悪しは加速器効率による。加速器効率は、常伝導リニアックの場合は主として高周波損失により、また超伝導リニアックでは冷凍機電力により決まる。加速電界5 MV/m, 平均電子ビーム電流4 mAの連続波モードのとき、加速器効率は、常伝導リニアックでは1.2%, 超伝導リニアックでは17%となることを示した。さらに、FEL発振後、残ったビームのエネルギーを回収すると、空洞壁での高周波損失が大きい常伝導リニアックでは、加速器効率は改善されないのに対し、超伝導リニアックでは、ビーム電力と冷凍機電力の比となり、24%に達することを示した。

2. FEL出力を大きくするためにはマイクロパルス内の電荷を増やすこと、マイクロパルスの繰返しを大きくすること、デューティを大きくすることが必要である。ピーク電流を大きくするためにサブハーモニックバンチャー(SHB)を用いてビーム圧縮を行い、高電圧でかつ大電流のとき、SHBでの速度変調の非線形性が空間電荷効果によりうまく打ち消されることから、よりよいビーム圧縮が可能となることを見出している。さらにSHBでパルス幅が最小になる前に単空洞に入射し、最初の単空洞でさらに速度変調をかけ、次の単空洞までのドリフト空間でビーム圧縮が起こるようにすることにより、ビームをより効果的に圧縮できることを示した。

3. 単空洞と5セル空洞から成る超伝導リニアックを製作した。SHBの周波数は83.3MHzであり、加速空洞の構造は $\lambda/4$ 同軸型加速管である。空洞の無負荷Q値が 1×10^9 のとき加速電界約5 MV/mを得た。空洞を負荷として空洞内の高周波電界をフィードバック信号として用いることにより、振幅で1%以下、位相で0.6deg以下の高周波安定度を得た。

4. アンジュレータにおける電子ビームパルス幅の測定結果は22psと狭く、アンジュレータを通過する電子ビームのピーク電流は13Aに達した。この電子ビームを用いてFELの発振実験を行い、波長25 μ m, 出力0.1kWの大出力発振に成功した。

以上要するに、本論文は、超伝導リニアックについて細部にわたる研究を行い、自由電子レーザー(FEL)の効率と出力

の上昇に必要な諸条件を明らかにし、大出力・高効率 FEL を実現したものであり、その成果は学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成12年10月3日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。