

氏 名	そば じま まさ あき 傍 島 正 朗
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第7号
学位授与の日付	平成11年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻
学位論文題目	Effects of Optical Geometry and Optical Guiding on Evolution of Free Electron Lasers (自由電子レーザー生成における光共振器形状と光ガイドの効果) (主査)
論文調査委員	教授 吉川 潔 教授 山 寄 鉄 夫 教授 若 谷 誠 宏

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、赤外線領域の自由電子レーザー (FEL) の回折損失の減少を目的として、計算機シミュレーションコードの開発、及びその適用によりFELにおける光ガイドについて評価し、光共振器の改良を理論的に試みた結果について論じたものであり、8章で構成されている。

第1章は序論であり、まず、FELの特徴、研究・応用の現状、及び実用性向上の可能性について述べ、研究目的と理論的背景を明らかにしている。FELの実用性向上の一方法として、一台のFEL装置で生成出来る波長領域の拡張を挙げて、実際に発振波長領域拡張の実験を行った中国北京FEL (BFEL) で発生した、レーザー場がビームダクトに衝突することによる回折損失について説明し、回折損失を評価する際に考慮しなくてはならない光ガイド効果と、これまでなされてきた回折損失と光ガイドに関する研究の概要を述べ、三次元計算機シミュレーションの必要性を示している。また本研究で開発された三つのシミュレーションコードの概略、並びに本論文の構成について述べている。

第2章では、まずFELで用いられるアンジュレータという周期的磁場を用いた挿入型光源と、アンジュレータ内を蛇行する電子ビームによるシンクロトロン放射の重ね合わせである自発放射光とその増幅の原理について述べている。次にレーザー場が電子ビーム付近に収束される光ガイド効果の概略を示し、FEL内の電子ビームの複素屈折率をMaxwell方程式から解析的に導き、屈折率が真空中より大きくなることから光ガイド効果を説明している。またヒームダクトや一對の球面ミラーからなる光共振器系がレーザー場に及ぼす影響についても述べている。

第3章では、光ガイド効果を評価するために開発した三次元シミュレーションコードで用いた仮定を示し、電子軌道を求める方程式をLorentz方程式から、レーザー場発展の方程式をMaxwell方程式からそれぞれ導出している。またそれらの方程式を解く際に課した境界条件、与えた電子ビーム・レーザー場パラメータの初期値、及び数値計算上用いた手法について説明している。さらに、光ガイド効果を定量的に評価する手法についても示している。

第4章では第3章で示したシミュレーションコードを用いて、電子ビーム特性、レーザー場の初期エネルギー、光共振器、及びアンジュレータの相対位置が光ガイド効果とFELゲインとに与える影響について詳しく解析し、光ガイド効果によって、レーザー径が10%以上減少することを示している。またミラーの曲率半径を変えることによって光ガイド効果を有効利用してレーザー出力特性を変えられることも示している。

第5章は、BFELの回折損失を評価するために新たに開発したシミュレーションコードを用いて、回折損失を定量的に解析し、ダクト形状の変更による回折損失の改善を試みたものである。シミュレーション結果は実験結果に近い傾向を示していることが確認され、ビームダクト断面形状の最適化により大幅に回折損失が減少し、最大5倍の出力向上を理論的に示している。

第6章では、ビームダクトがレーザー場へ与える影響を自己無撞着に求めるために開発された、ビームダクトの影響を境界

条件として与え有限要素法を用いてレーザ場発展を求めるシミュレーションコードについて説明し、それを用いたシミュレーションによって、ビームダクトのレーザ場に対する影響を解析している。シミュレーション結果から、ビームダクト内で基本モードである $TEM_{00}$ モード以外に10%以上の割合を占める $TEM_{02}$ モードが発生することによってレーザ場と電子ビームの相互作用が妨げられ、ゲインが減少することを示した。また光共振器内を電子ビームと相互作用しながら周回するレーザ場のシミュレーションから、従来の解析的手法では求められなかった、実際にFELのビームダクト内で発振するレーザ場モードを求めており、 $TEM_{02}$ モード以外に $TEM_{01}$ 、 $TEM_{04}$ モードを数%含んでいることを示している。

第7章は、リング型光共振器の利用とアンジュレータの相対位置の変更によって回折損失の改善を試みたものである。シミュレーション結果からアンジュレータの相対位置変更は効果があまり顕著でないものの、リング型光共振器を用いることで2%以上の回折損失が軽減された結果、26%もの出力向上が見られることを示している。

第8章は結論であり、本研究で得られた結果について要約している。

### 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は、赤外線領域における自由電子レーザ（FEL）の回折損失軽減を目的として、計算機シミュレーションコードの開発、及びその適用によりFELにおける光ガイド効果について評価し、光共振器の改良を理論的に試みた結果についてまとめたもので、得られた主な成果は次の通りである。

1. 電子ビームの周りにレーザ場が収束する光ガイド効果により、条件次第で回折損失を軽減できる可能性があるが、その光カイドを自己無撞着に含むシミュレーションコードを開発した。また、それを自由電子レーザ研究所のFEL実験結果に適用した結果、光ガイド効果によって回折が抑制されレーザスポット径が10%以上減少することを明らかにした。さらに光カイド効果を有効に利用する方法を提案し、その有効性を理論的に示した。

2. ビームダクトにおける回折損失を解析するため、光カイド効果も考慮に入れ、かつ有限幅ビームダクト内でのレーザ場の伝搬を自己無撞着に計算できるコードを新たに開発した。またそのコードを用いて中国北京FELのシミュレーションを行った結果、ビームダクト内で $TEM_{00}$ 基本モード以外に10%以上の振幅をもつ $TEM_{02}$ 高次モードが派生し、これがFELゲイン低下の主原因となっていることを明らかにした。

3. レーザ場の光共振器内周回時、ビームダクトによるレーザ場への干渉により、 $TEM_{02}$ モード以外に数%の大きさの振幅を持つ $TEM_{01}$ 、 $TEM_{04}$ 高次モードが派生し、最終的にはこれらの成分が発振モードに寄与していることを明らかにした。

4. 回折損失を軽減するため、最適ビームダクト形状を提案し、最大5倍もの出力向上が可能であることを理論的に示し、またリング型光共振器を提案し、BFELに適用してシミュレーションを行い、約30%程度の出力向上が理論的に可能であることを示した。

以上、本論文は光ガイド効果と光共振器系の影響を自己無撞着に計算できるシミュレーションコードの開発により、赤外線領域FEL実験結果を定性的、定量的に明らかにするとともに、光共振器系の最適化によるレーザ場回折損失の改善を理論的に示したもので、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（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成11年2月5日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。