

氏 名	董 志 偉
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学 位 記 番 号	エ ネ 博 第 36 号
学位授与の日付	平成 13 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	Simulation study on mode-medium interaction in a Free Electron Laser oscillator (自由電子レーザ生成における光モードと電子ビームの相互作用に関する数値的研究)
論文調査委員	(主 査) 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 (FEL) 応用装置の最適化設計を目的として、時間と空間に依存する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 における光モードと電子ビームの相互作用について評価し、さらに FEL 発振に大きな影響をもつ諸要因の探索を理論的に行った結果について論じたもので 9 章より構成されている。

第 1 章は序論であり、まず、FEL の特徴、発展の歴史、研究・応用の現状、及び今後の研究方向について述べ、これらとの関連において本論文の研究目的と理論的背景を述べている。また、高性能な赤外線領域 FEL の運転に際しての問題点であるスリップ効果について、設計における計算機シミュレーションにおいて時間と空間に依存したコードの必要性を示している。さらに、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、まず FEL の構成要素と、アンジュレータ内部を蛇行する電子ビームによる自発放射光、及びその増幅による自由電子レーザの原理について述べ、つづいて、本論文で研究対象とする FEL のパルス形状に関連する重要な物理的現象について概略を述べている。

第 3 章では、スリップ効果を評価するために新たに開発した時間と空間に依存するシミュレーションコードについて、そこで用いた仮定について説明し、さらに電子軌道ならびにレーザ場発展の方程式を、それぞれローレンツ方程式およびマックスウェル方程式から導出している。またそれらの方程式を解く際に課した境界条件、与えられた電子ビーム、レーザ場パラメータの初期値、及び数値計算上用いた手法、対象とするパラメータ領域の選び方について説明している。さらに、このコードの正当性を既存の FELEX コードの計算結果と定量的に比べ検証している。

第 4 章では、第 3 章で示したコードを用いて、まず時間依存しない定常状態の場合の FEL コードの応用領域を調べた。さらに、電子ビーム特性 (エネルギー分散、エミッタンスなど) 及び光とのアウトカップリング因子が FEL に与える影響について詳しく解析し、サイドバンド領域の FEL がそれらの変化に最も敏感になっていることを示している。

第 5 章では、スリップ効果を定量的に解析し、光共振器のディチューニングによる光パルスの形状とスペクトルの変化を解明している。キャビティーディチューニング長さ (δL) をレーザ波長 (λ_L) に比べ、 $\delta L > 2\lambda_L$ すれば FEL 出力は stable focus の状態になり、 $0.5\lambda_L < \delta L < 2\lambda_L$ すれば limit-cycle の状態になることを確かめている。そして、電子パンチの圧縮により FEL 出力が向上できることを理論的に示している。

第 6 章は、光共振器の類型とディチューニングの変更が FEL 出力および光の横方向強度分布に与える影響について詳しく解析したものである。最適の光共振器としての近共心光共振器においては 90% 以上の FEL 強度は TEM_{00} モードであり、高次モードは TEM_{01} , TEM_{10} , および TEM_{02} の順番で強度が強いことを明らかにしている。さらに、安定性条件である g 因子を $g_1 g_2 \rightarrow 0.5$ すると、高次モードの寄与が高くなり、一方 $g_1 g_2 \rightarrow 1$ または 0 とすると、高次モードの寄与がなくなることを示している。

第 7 章では、FEL の初期成長過程を評価するために縦方向多モードの競合の影響も検証できるよう第 3 章で示したコー

ドを発展させ、シミュレーションによって縦方向多モードの競合によるレーザ場への影響を解析している。さらに、原研の高出力 FEL 実験結果についてシミュレーションを行い、原研の実験結果に近い理論結果を示している。

第 8 章では、電子ビームの空間電荷効果がレーザ場へ与える影響を調べるため、あらたに開発されたシミュレーションコードについて説明している。電子ビームの空間電荷効果を考慮する場合と考慮しない場合のシミュレーション結果の比較検討により、とくにどのような電子ビームパラメータがレーザ場に大きな影響を与えるかを明らかにしている。また、光共振器 FEL では、空間電荷効果は集団相互作用を妨げるため FEL ゲインと出力が減少し、また共振波長が長波長側に移動することを示している。さらに、開発したコードにより大阪大学で行われた自己増幅自発放射 (SASE) 実験に関するシミュレーションを行い、実験で得られた FEL 共振波長が長波長側に移動する実験結果を説明することに成功している。

第 9 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、赤外線領域の自由電子レーザ (FEL) 装置の最適化設計を目的として、時間と空間に依存する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、とくにスリップ長が電子ビームパルス長より大きい場合の相互作用について評価するとともに、FEL 発振に大きな影響をもつ諸要因の探索を理論的に行った結果について論じたもので、得られた主な成果は次の通りである。

1. 新たに開発した時間と空間に依存する三次元の FEL コードを用いてスリップ効果を定量的に解析し、光共振器のディチューニングによる光パルスの形状とスペクトルの変化を解明した。さらに、電子バンチの圧縮により FEL 出力が向上できることを理論的に示した。

2. 他の共振器との比較から近共心光共振器が FEL 発振の点で最適であることを明らかにするとともに、その場合 90% 以上の FEL 強度は TEM_{00} モードであり、高次モードは TEM_{01} , TEM_{10} , および TEM_{02} の順番で強度が強いことを明らかにした。さらに、安定性条件である 2 枚のミラーの g 因子の積を 0.5 とすると、高次モードの寄与が高くなり、一方 1 または 0 とすると、高次モードの寄与が大きく減少することを理論的に明らかにした。

3. 縦方向多モード競合による FEL 発振過程への影響を検証できる時空間依存三次元 FEL コードを発展させ、そのコードを用いて日本原子力研究所が最近行った高出力・高効率 FEL 実験結果のシミュレーションを行い、4% もの高変換効率は縦方向多モード競合によることを明らかにした。

4. 電子ビームの空間電荷効果がレーザ場に与える影響を調べるためさらに FEL コードを発展させ計算を行った。その結果空間電荷効果は電子のバンチングを妨げるとともに FEL ゲインと出力を減少させ、また共振波長を長波長側に移動させることを明らかにした。さらに、大阪大学で行われた自己増幅自発放射実験結果のシミュレーションを行い、実験で得られた FEL 共振波長が長波長側に移動するという実験結果を定量的に精度良く説明することに成功した。

以上、本論文はスリップ効果を計算できるシミュレーションコードの開発により、最近行なわれた FEL 実験結果を精度良く説明するとともに、FEL 発振に大きな影響をもつ諸要因の探索、ならびに効果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 13 年 1 月 13 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。