

## (論文内容の要旨)

本論文は、小型で廉価な高エネルギー電子銃でありながら、**Back- bombardment** 現象と呼ばれる問題点から使用が困難であった熱陰極高周波電子銃について、これを小型中赤外自由電子レーザ装置へ適用するための生成電子ビームの高品質化を目的に、自由電子レーザ発振の成否に関わる生成電子ビームのエネルギー変動と、これを補償する手法について、理論的・実験的研究を行うと共に、新たに提案・開発した手法を実機に適用して自由電子レーザ発振実験を行った結果をまとめたもので、10章からなっている。

第1章の序論では、まず今後の再生可能エネルギー開発に対する中赤外自由電子レーザの有用性を論じると共に、自由電子レーザを駆動する電子加速器の問題点、並びに、熱陰極高周波電子銃の適用の必要性について述べ、研究目的と背景を明らかにしている。また、熱陰極高周波電子銃を自由電子レーザ用電子加速器に用いる際の課題について述べており、特に **Back-bombardment** 現象に起因して生成電子ビームの電流とマイクロパルス長が制限されることと、それに対する既存の改善策を論じ、ビームエネルギー変動の補償法の開発が必要であることを述べている。さらに、本論文全体の構成について述べている。

第2章では、自由電子レーザの原理と、レーザ発振に必要な高エネルギー電子ビームの特性についての理論的背景を述べ、特に熱陰極高周波電子銃において改善の必要な電子ビーム品質について論じている。

第3章では、高周波共振空洞の電子ビーム負荷変動に対する応答について述べ、**Back- bombardment** 現象とその改善策の理論的背景を説明している。まず、高周波共振空洞と電子ビームとの相互作用の理論について述べ、熱陰極高周波電子銃の定在波空洞の高周波電圧と電子ビーム負荷との関係を、等価回路モデルを用いて論じている。次に、後段加速に用いられる加速管の進行波空洞中における電子ビーム負荷の効果を述べている。

第4章では、**Back- bombardment** 現象のメカニズムを論じている。先ず、熱陰極高周波電子銃における電子ビームの逆流、逆流電子の衝突による陰極温度上昇と出力ビーム電流の増加、これに起因する電子ビームエネルギー変動について、実験結果と理論、数値解析結果を用いて論じている。次に、これらの効果を第3章で論じた等価回路モデルに取り入れた数値解析モデルを示し、実験で観測された高周波反射特性やビームエネルギー変動を再現可能であることを示している。

第5章では、本論文で研究対象とした京都大学中赤外自由電子レーザ装置について、実験で用いた熱陰極高周波電子銃、進行波加速管、電子ビーム輸送系、アンジュレータと光共振器の諸元と構成を説明している。

第 6 章では、高周波入力制御によるビームエネルギー補償法について、その原理と方法について述べ、実機に適用してその特性を調べている。その結果、熱陰極高周波電子銃への高周波振幅制御の適用によって、許容エネルギー幅を持つ有効マクロパルス長を従来に比べて 4 倍以上伸ばすことに成功し、その有効性を示している。さらに、本手法適用により発生する高周波位相変動と、後段進行波加速管による加速エネルギー変動を併せて補償する必要性を指摘すると共に、入力高周波の位相・振幅制御によって、これらの変動幅をそれぞれ 40 度から 2 度、6% から 0.8% まで大幅に低減することに成功している。

第 7 章では、より速い変動に対しても有効な新たなエネルギー補償法を提案している。熱陰極高周波電子銃の高周波空胴の共振周波数と入力周波数とを適切に離調させることで、広範囲のビーム電流変動に対して空胴電圧変化が極めて小さくなる動作点のあることを見出し、数値解析と実験においてビーム電流変動に対するエネルギー変化を  $-3.7 \text{ MeV/A}$  から  $-0.2 \text{ MeV/A}$  まで大幅に低減できることを明らかにして、空胴離調法によるエネルギー補償の原理を実証している。

第 8 章では、第 7 章で提案した空胴離調法を、第 6 章で論じた高周波入力制御法と併用して、マクロパルス長を更に約 30% 伸ばすことに成功し、両手法が同時に適用可能であることとその有効性を示している。次に、得られた電子ビームの特性計測について、エミッタンス計測において計測対象に僅かに混在する低エネルギー電子ビーム成分が計測結果に大きな影響を与えることを明らかにすると共に、数値処理手法によりその影響を分離・除去可能であることを示している。さらに、自由電子レーザー利得・出力の時間発展について数値シミュレーションを行って電子ビーム高品質化の効果を評価し、エネルギー補償法適用前には得られなかったレーザー利得飽和を達成できる可能性を示している。

第 9 章では、高品質化した電子ビームを用いて自由電子レーザー発振実験を行い、波長  $13.2 \text{ }\mu\text{m}$  において利得飽和を達成し、得られたレーザー光の特性を計測して、波長スペクトル、コヒーレント長、パルスエネルギー、長時間安定性などの特性を明らかにしている。また、得られた実験結果と数値シミュレーションを用いて、同自由電子レーザー装置において発振可能な波長範囲を評価している。

第 10 章は結論であり、熱陰極高周波電子銃による中赤外自由電子レーザーのための高品質電子ビーム生成に関して本研究で得られた結果を要約している。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、再生可能エネルギー開発に供する小型中赤外自由電子レーザー装置の実現のため、熱陰極高周波電子銃による高品質電子ビーム生成を目指した研究の成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 熱陰極高周波電子銃における逆流電子の **Back-bombardment** による電子ビーム電流変動に起因する出力ビームエネルギー変動に対して、高周波入力制御法の適用によって、許容エネルギー幅を持つ有効マクロパルス長を従来の4倍以上に伸ばすことに成功し、有効性を実験的に明らかにした。
2. 熱陰極高周波電子銃の高周波空洞の共振周波数を入力周波数と離調させることで、ビーム電流変動に対する空洞電圧変化が小さくなる動作点のあることを見出した。この空洞離調法と呼ぶべき新たな電子ビームエネルギー補償法の原理を、理論・数値解析及び実験により実証した。
3. 空洞離調法が高周波入力制御法との併用も可能であることを実験で明らかにし、有効マクロパルス長を更に約30%伸ばすことに成功した。
4. 電子ビームエミッタンスの計測において、熱陰極高周波電子銃では不可避な低エネルギー電子ビーム成分の存在が、計測結果に大きな誤差を与えることを明らかにすると共に、その影響を計測結果から分離・除去する数値処理手法を提案してその有効性を示した。
5. 以上の研究成果を京都大学中赤外自由電子レーザー装置に適用し、波長13  $\mu\text{m}$  においてレーザー利得飽和を達成した。また、計測された電子ビーム特性から、同装置による5~13  $\mu\text{m}$  の波長範囲でのレーザー発振が可能であることを数値シミュレーションで示し、熱陰極高周波電子銃による小型で廉価な連続波長可変の中赤外自由電子レーザーが十分実現可能であることを示した。

以上、本論文は熱陰極高周波電子銃における **Back-bombardment** 現象による電子ビームエネルギー変動とその補償法について、理論、実験両面で基礎的研究を行い、新たな知見を得ている。また、自由電子レーザーに要求される高品質電子ビームの発生に成功して京都大学中赤外自由電子レーザー装置における初めてのレーザー利得飽和を達成するなど、学術上・實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21年4月24日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。