

いし かわ りょう

氏 名 石 川 亮  
授 与 学 位 博士 (工学)

学位授与年月日 平成13年3月26日

学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項

研究科、専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻

学 位 論 文 題 目 微小金属スリットを用いた光と電子ビームとの相互作用に関する  
研究

指 導 教 官 東北大学教授 水野 皓司

論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 横尾 邦義  
東北大学教授 潮田 資勝 東北大学教授 江刺 正喜  
東北大学助教授 褒 鐘石

## 論文内容要旨

現在、情報通信や物理計測等の様々な分野で用いられている高周波光源としての電子ビームデバイスにおいて、その動作周波数を可視領域まで高めた研究は、その難しさから非常に少ない。その中で、レーザ光を用いた電子エネルギー変調技術の開発は、電子加速器において従来達成できなかった高い加速勾配の実現、或いはまた、非相対論的電子ビームを用いた小型で光波帯で動作する電子ビーム装置の実現等の可能性を生む。本研究グループでは、電子ビームと光との相互作用に関して微小金属スリットを相互作用回路として用いる方法を提案し、実験と理論解析との照合を通して電子-光の相互作用における量子効果を含めた基礎プロセスを明らかにし、光波帯小型電子ビーム装置開発のための基礎データを得ることを目的として研究を進めてきた。その結果、その実験の困難さから長波長域である赤外領域での予備実験を行う必要性が出てきた。本論文は、金属スリットを用いたレーザ光と電子ビームとの相互作用について、赤外域の光源である波長  $10.6 \mu\text{m}$  の  $\text{CO}_2$  レーザを用いて行った研究に関して、その理論解析、実験装置の設計・製作及び評価、そして実験結果をまとめたものである。

### 第一章 序論

本章では、本研究の背景として電子ビームデバイス等の電子エネルギー変調技術の応用分野について従来の研究の概略を述べ、本研究の位置付けを示し、本研究の目的を明らかにしている。また、光と電子の相互作用の原理について説明を行っている。

### 第二章 相互作用の計算機シミュレーション

本章では、微小金属スリットを用いた赤外光 ( $\text{CO}_2$  レーザ光) と電子ビームとの相互作用を理論的に解析するために行った計算機シミュレーションの結果について述べている。シミュレーションでは、電子ビームがスリット上に発生した近接場分布中を通過する際に、そこで受けるエネルギー変化量を計算している。先ず最初にレーザ入射により金属スリット上に発生する近接場分布を、アンテナ解析法の一つであるモーメント法を用いて導出している。これは、アンテナ上の電流分布を数値解析的に求める手法である。ここでは、電子の進行方向に偏波を持つ平面波がスリット表面に垂直に入射されたとき、そ

ここに発生する電流分布をモーメント法により求め、その電流により二次的に発生する散乱波を得ることでスリット近傍での近接場分布を導出している。この場合に得られる電磁界分布は、伝搬波を含む全てのエバネッセント波成分を含んでいる。そして、9GHzのマイクロ波を用いてスリット上の近接場分布を実際に測定し、解析結果との良い一致を得ている。

次いで、上で得たスリット近傍での近接場分布と電子ビームとのエネルギー授受量を算出することで相互作用の解析を行っている。この解析は、CO<sub>2</sub>レーザの一光子エネルギーに対してエネルギー分析器の分解能が大きく、測定で量子効果が観測されることはないため、量子論ではなく古典論的に行われる。具体的には、スリット上の電磁界が、そこを通過する電子に及ぼすローレンツ力を求め、その力による仕事量を計算することを行っている。以下に、この解析により得られた各種特性結果の概略を列挙する。

1. スリット上での電子ビーム軌道を解析し、本解析条件下で、電子の散乱角が進行方向に対して0.015°程度と極僅かであることが確認された。
2. 電子エネルギー変化のスリット幅依存性を求め、そのピーク値を与えるスリット幅が平行平板モデルと比較して走行角で約 $\pi/2$ ずれることが確認された。
3. 電子エネルギー変化の初期入射速度に対する依存性を求め、測定に適したスリット幅が $0.6\lambda \sim 0.7\lambda$ 程度であるという指針が得られた。
4. 電子エネルギー変化と電界の波数分布との比較を行い、電子が同期条件を満たす、一つのエバネッセント波成分のみと相互作用を行うことが確認された。
5. 電子エネルギー変化の入射位置依存性を求め、本実験装置で検出可能なエネルギー変化を受ける電子の通過領域が、入射速度（相対速度） $\beta=0.5$ のときに、スリット表面から $0.4\lambda$ 程度（ $\approx 4\mu\text{m}$ ）までであることがわかった。

以上より、実験を行う際の装置に要求される条件が明らかにされた。

また、理想的な平面波と自由な電子との相互作用はエネルギー・運動量の両保存則を同時に満たさないために行われないことは周知の事実であるが、入射されるレーザ光が分布を持ち、しかもレンズで絞られているため、入射レーザ光（伝搬光）が電子のエネルギー変化に与える影響を無視することはできないと考えられる。このことについて計算により考察を行い、ガウス分布のレーザ光を波長以下に絞ったときに初めてその影響が無視できない値になることを確認し、本実験の条件下ではその影響が現れないとの結論を得ている。

### 第三章 実験装置の設計及び評価

本章では、第二章の相互作用の計算機シミュレーション結果から得られた実験条件を基に実験装置の設計・製作及び評価を行っている。本実験で用いる主な装置は、光源であるCO<sub>2</sub>レーザ装置、金属スリット回路、電子ビーム装置及び電子エネルギー分析器、電子検出後の信号処理系等がある。これらについては過去に行われたサブミリ波帯での逆スミス・パーセル効果の検証実験の際に用いたものを基準に開発を行った。エネルギー分析部を含めた電子ビーム装置に関しては、制御回路等を新たに製作し直し、特性の再評価を行っている。そして、今回新たに金属スリット回路の製作、CO<sub>2</sub>レーザ光をスリット表面に照射させるための光学系の設計等を行っている。金属スリット回路は、ミクロンオーダーの製作精度が要求されることに加えて検出可能なエネルギー変化を得るために非常に高いレーザパワー密度に耐えられることが要求される。そのため、このレーザ光に対する耐性について評価を行う必要がある。

まず最初に、相互作用回路として用いる金属スリットについて、その材質決定のためにCO<sub>2</sub>レーザ光に対する耐性の測定を行い、銅製の金属スリットが適しているとの結論を得ている。また、実際に金属スリットの製作を行い、スリット幅約 $6\mu\text{m}$ のもの製作に成功した。次いで、CO<sub>2</sub>レーザ光のスリット表面導入に関する光学系についてガウス理論を基に計算と測定を通して設計を行い、焦点距離7.5 inchのレンズを用いた場合にスリット表面でのビーム径が約 $210\mu\text{m}$ になるとの結果を得ている。このレンズを用いることで、エネルギー授受の測定に要求されるレーザパワー密度 $30\text{ MW/cm}^2$ が実現されることになる。また、電子ビーム装置について、まずその電子ビームの横方向分布の測定を行い、相互作用領

域内ではほぼ一様な電流密度が得られることを確認した。またその値は  $1 \text{ A/cm}^2$  程度であり、相互作用の観測に十分な値であることがわかった。また、新たに製作されたエネルギー分析部の制御回路系で測定されたエネルギー分析器の分解能が約  $0.75 \text{ eV}$  であり、過去に得られた値と同程度であることを確認している。

#### 第四章 相互作用実験

本章では、 $\text{CO}_2$  レーザ光と電子ビームとの相互作用実験の測定結果について述べている。まず最初にサブミリ波帯の実験で用いていた、電子電流検出による信号処理系で相互作用実験を行っている。そして、 $\text{CO}_2$  レーザ光と  $100 \text{ keV}$  までの非相対論電子ビームとの相互作用を実験的に観測することに成功している。この結果は、赤外領域のレーザ光と非相対論的な低速電子とのエネルギー授受が実験的に観測された最初の測定結果である。ここで、スリット構造でのエネルギー授受の特性を詳細に調べるためには、レーザ光によりエネルギー変化を受けた電子の中でもスリットの極近傍を通過して特に大きなエネルギー変化を受けた極僅かの電子を検出する必要があり、この検出系では極微量電子の検出には不向きであるために詳細な測定が行えないことが確認された。そこで、実験時のコレクタ到達電子電流をそれまでの  $1/1000$  程度に押さえ、電子検出に二次電子増倍管を導入し、更にカウンティング技術による計測を行うことにより電子検出感度を  $100$  倍以上向上させることに成功した。この検出系を用いて相互作用の各種特性の測定を行っている。以下にこの検出系で測定した諸特性について列挙する。

1.  $\text{CO}_2$  レーザ出力に対するコレクタ到達電子電流応答を測定し、電子がその入射速度と同期するエバネセント波と相互作用を行うことを想定して計算した理論の結果と実験結果とがよく一致することを確認した。
2. 相互作用を受けた電子のエネルギースペクトラムを測定し、 $9 \text{ kW}$  の入射レーザパワーに対して  $\pm 10 \text{ eV}$  以上のエネルギー変化を受けた電子が検出されていることが確認された。また、全透過電子数との比から相互作用領域が約  $3.5 \mu\text{m}$  ( $0.33\lambda$ ) であると見積もられた。
3. 相互作用のレーザパワーに対する依存性を測定し、エネルギー変化が理論予測であるパワーの平方根（電界）に比例した特性を示すことを確認した。
4. 相互作用の入射レーザ光偏波面角度に対する依存性を測定し、進行方向の電界成分の減少に従って理論予測と同様に減少していく様子を確認した。
5. 相互作用の電子初期入射速度（加速電圧）に対する依存性を測定し、新たに製作された幅  $8 \mu\text{m}$  程度のスリットを用いた場合の測定結果が、それに近い値の幅  $7.2 \mu\text{m}$  での理論曲線と一致する傾向を示すことを確認した。

以上から、相互作用は理論で予想した通り近接場中に含まれている一つのエバネセント波によりエネルギー変化を受けていることが実験的に確認された。

そして、この  $\text{CO}_2$  レーザを用いた赤外域での実験で得られたパラメータを用いて可視領域に実験を拡張した場合の実験の可能性を見積り、エネルギー量、電子数に関してその検出が可能であるとの結論を得ている。

#### 第五章

本章では、各章の要約を取りまとめて総括を行っている。

本研究で得られた結果は、可視光領域での金属スリットを用いたレーザ光と電子ビームとの相互作用実験に対する指針を与えるものである。その実験は可視光と電子ビームの相互作用のメカニズムを明らかにするものであり、光波帯における新しい電子ビームデバイス開発の可能性及び方向性を示唆するものである。

# 論文審査結果の要旨

相互作用回路として単一間隙を用いるクライストロン型の電子ビーム装置で、その高周波動作は量子効果により制限されることが予想されている。これは電子ビームと電磁波との相互作用が、1光子を単位としてのエネルギー授受により行われるためである。この量子効果を実験的に確認するためには、光領域での相互作用を観測することが必要であるが、そのためには、赤外領域で詳細な予備実験を行う事が不可欠である。本論文は、この赤外領域での電磁波（レーザー光）と電子ビームとの相互作用に関する実験について、その実験装置の設計、製作、さらに相互作用の観測に成功するまでをまとめたもので、全文5章よりなる。

第1章は、序論であり、本研究の背景及び意義等について述べている。

第2章では、先ず相互作用回路として金属スリットを提案し、電磁波を照射した時のスリット近傍の電磁界分布（近接場）について理論的に解析している。次いで、その結果を用いて波長10ミクロンのCO<sub>2</sub>レーザー光による近接場と電子ビームとの相互作用を計算機シミュレーションにより解析している。

第3章では、実験で用いる金属スリットの材質を決めるために、真空中でCO<sub>2</sub>レーザー光を種々の金属に照射して、その結果、銅が相互作用実験に必要な30 MW/cm<sup>2</sup>のレーザーパワー密度（ピーク値）に耐え得ることを示している。また、加速電圧100 keVまでの電子ビーム系について、0.01 pAまでの電流を分解能0.75 eVで計測出来るエネルギー分析器の設計、製作に成功している。

第4章では、以上の準備のもとに、波長10ミクロンのCO<sub>2</sub>レーザー光とスリット幅8ミクロンの銅製回路を用いて行った相互作用実験の結果について述べている。出力10 kWまでのCO<sub>2</sub>レーザー光を用いて、10 eV以上のエネルギー変化を信号・雑音比1000以上で、加速電圧あるいはレーザー出力などの関数として観測している。これは、赤外光と電子ビームとの相互作用を、単一間隙回路を用いて観測した初めての結果であり、今後予定されている光領域の研究に対して、多くの貴重な知見を与えるものである。

第5章は、結論である。

以上要するに本論文は、電子ビームデバイス動作の高周波限界を検証することを目的に、単一間隙の相互作用回路を用いて波長10ミクロンの赤外光と電子ビームの相互作用の観測に初めて成功した結果を取りまとめたもので、電子デバイス工学および計測工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。