

氏 名 平野 耕一郎

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大乙第 158 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 学位規則第 6 条第 2 項該当

学位論文題目 大電流マルチバンチフォトカソード高周波電子銃の開発

論文審査委員 主 査 教授 榎本 收志
教授 浦川 順治
教授 大澤 哲
教授 小林 仁
助教授 早野 仁司
教授 上坂 充（東京大学）
上級研究主席 山崎 良成（日本原子力研究
開発機構）

論文内容の要旨

フォトカソード高周波電子銃は、高周波空洞内に設置されたカソード面にパルス幅 10ps のレーザー光を照射することで電子が放出され、即座に RF 電界によって数 MeV まで加速される構造になっている。このため、従来の熱電子銃にくらべて、最初から短バンチ化されたピーク電荷量の高い低エミッタンスビームを得ることができる。

DESY では、L-band フォトカソード高周波電子銃が FEL (自由電子レーザー) のために開発されており、電荷量 4nC、バンチ間隔 444ns、バンチ数 1800 のマルチバンチビームが得られている。一方、S-band のフォトカソード高周波電子銃は BNL、KEK 及び住友重機械工業と共同で開発された。主に、数nC のシングルバンチまたは 2バンチビームが FEL、パルスラジオリシス、X 線生成実験等に利用されている。KEK の ATF では、2nC、パルス間隔 2.8ns、20 バンチのマルバンチビームが各種開発実験に利用されている。DESY の L-band フォトカソード高周波電子銃では、バンチ間隔 444ns がキャビティのフィリングタイム $2.9\mu\text{s}$ の 1/7 程度であるため、バンチビームが空洞を通過する際に生じる励起電圧による空洞電圧の減少は次のバンチビームが来た時にはほぼ回復する。このため、ビームローディングはほとんど観測されない。しかし、バンチ間隔がキャビティのフィリングタイムより非常に小さい場合、高電荷量のマルチバンチビームでのビームローディングは無視できなくなる。DESY のマルバンチビームによる誘起電圧は KEK のフォトカソード高周波電子銃で 6 バンチ発生させた場合の誘起電圧に相当する。これまで、バンチ間隔 2.8ns がキャビティのフィリングタイム $0.56\mu\text{s}$ より 2 桁以上小さい状態で、2nC/bunch 以上の 100 バンチビームをバンチ間隔 2.8ns で発生させているフォトカソード高周波電子銃は存在しなかった。

本研究では、電荷量 5nC を目標にバンチ間隔 2.8ns、バンチ数 100 のマルチバンチを発生させ、マルチバンチビームの各バンチのエネルギを補正し、エネルギー差 1% 以下のマルチバンチビームを実現することを目指した。

高電荷量のマルチバンチを発生させるため、下記に示す項目の工夫を行った。

- 1) 量子効率が高いセシウムテルルをカソード材に用い、レーザーには 357MHz モードロックマルチバンチレーザーを用いた。
- 2) ATF のレーザー入射方法では、ビームラインから 4mm 離れた真空中に金属ミラーを設置し、レーザーを金属ミラーで反射させて、 1.5° の角度でカソードへ入射させている。今回、マルチバンチビームのハローやダークカレントによるミラー損傷を避けるため、高周波電子銃下流に矩形電磁石 4 個を設置してシケインを構成し、ミラーをシケイン中央部の大気中に設置して、レーザーをカソード面に垂直に入射させた。
- 3) 高周波空洞は 1.6 セル空洞で構成されており、電界が高い場所はハーフセル側のカソード上のほか、ハーフセルフルセル間のアイリスのコーナー部分である。アイリス部の電界による放電の可能性とダークカレントを減らし、かつ、カソード上の電界を高めるため、ハーフセルの最大電界がフルセルの最大電界より 3 割程度高くなるように空洞を製作した。
- 4) 空洞内蓄積高周波電力の過渡状態を利用し、マルチバンチビームの電荷量に応

じてレーザー入射タイミングを調整することにより、マルチバンチビームのビームローディングによるエネルギー差を補正した。

マルチバンチフォトカソード RF 電子銃のテストベンチを構築し、ビーム発生試験を実施した。バンチのエネルギー幅が最小となるレーザー入射位相を測定して設定し、マルチバンチビームのエネルギーを測定した。マルチバンチビームのエネルギーはエネルギー分析磁石及びエネルギー分析磁石下流のビーム位置モニタの水平位置信号を用いて測定した。ビームローディングによるエネルギー差を解析し、計算結果と良い一致が得られた。最大電荷量 250nC/100bunches のビームを発生させることができた。

ビームローディングで発生したエネルギー損失を補正するため、高周波電力が空洞に蓄積される途中でレーザーパルスを入射させ、後方バンチのエネルギー利得が先頭バンチのエネルギー利得より高くなるようにした。このように、マルチバンチビームの電荷量及び高周波電力の傾きに応じてレーザーパルスの入射タイミングを調整することにより、220nC/100bunches のマルチバンチビームのビームエネルギー差を 1.3%以下 (peak-to-peak) に補正することができた。

以上より、本研究において、調整した1.6cell空洞及びビームローディング補正方法によって、これまでに無いビームエネルギーが揃った大電流マルチバンチビームを発生させることができた。

論文の審査結果の要旨

平野氏の研究テーマは、電子加速器に用いられるフォトカソード RF 電子銃の開発研究に関するものである。目的とする RF 電子銃は、放射線医学研究所等と共同研究開発中の医療用先端小型 X 線源に用いるもので、エネルギー 5MeV、ピーク電流 1A 以上、パルス幅数百 ns という、世界中でまだ達成されたことのない性能をめざすものである。

RF 電子銃のフォトカソードには量子効率約 1% のセシウムテルル、加速空洞には共振周波数 2856MHz の 1+1/2 セルの定在波型空洞を用いた。照射用レーザーには加速高周波の 1/8 の周波数 (357MHz) で同期する極紫外 (波長 266nm) のモードロックレーザーを用いた。

電子ビームのパルス構造は照射するレーザーにより決まるが、平野氏は大電流で低エミッタンスの電子ビームを引き出す工夫として、従来、用いられてきた空洞形状を再検討し、カソード側空洞 (ハーフセル) の電界を高くする設計を行なった。また、ビーム負荷によりパルス後方のビームエネルギーが小さくなる効果を計算し、レーザーの照射タイミングを適当に調整することによって、エネルギー減少分を補償できることを示した。

これらの概念設計の後、平野氏は RF 電子銃の製作を行い、低電力測定によって、設計通りの電界分布が得られることを確かめた。また、大電力 RF 源、ビームライン、エネルギー分析系など、カソードとレーザー照射系を除く、大部分の実験装置の組立てを担当し、KEK アセンブリーホールにおいて実験を開始した。

その結果、バンチ電荷 2.2nC、バンチ幅 10 ピコ秒、バンチ間隔 2.8ns、バンチ数 100、エネルギー約 5MeV の大電流マルチバンチ電子ビームを得ることに世界ではじめて成功した。このとき、電子ビームのエネルギー幅は約 2.8% であり、ビーム負荷効果はレーザーの照射タイミングを調整することにより 1.3% 以下に計算通り補正できることを実証した。測定した規格化エミッタンスは約 50 μ m であった。

光陰極高周波電子銃は各国で研究開発が進められているが、ピーク電流約 1A、パルス幅数 100ns のマルチバンチ大電流ビームを出力する高周波電子銃の技術を世界に先駆けて確立した意義は大きい。その中で、装置の設計から製作、組立・調整、実験に一貫して取り組み、大電流を引き出すために 1/2 セルの電界を強めるための研究やエネルギー補正の実証的研究を行なったことは、博士論文として十分価値があるものと認める。