

氏 名 長谷川 豪志

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 938 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 低エミッタンスビーム生成の為の短パルス HV/RF を  
用いた光陰極電子銃の基礎研究

論文審査委員 主 査 教授 大澤 哲  
教授 榎本 收志  
教授 小林 仁  
助教授 早野 仁司  
教授 平松 成範  
教授 鷺尾 方一（早稲田大学）

## 論文内容の要旨

生物や工学、生命科学など様々な領域での応用が期待される SASE/X 線 FEL 計画などのリニアックを利用した次世代放射光加速器は、高強度極低エミッタンス電子ビーム(数 kA、 $\sim$ 数  $\pi$  mm.mrad 以下)を要求する。リニアック型放射光の特徴からエミッタンスの最小値は電子銃の特性で決定されるため、電子銃の低エミッタンス化が求められる。80 年代後半から開発が始められた光陰極 RF 電子銃は、世界各地で実用化され 1nC、数  $\pi$  mm.mrad のビームが生成されるまでになっており SASE/X 線 FEL の要求に近い段階まできている。引き続きリニアックでの加速時やバンチ圧縮時でのエミッタンス増加を考慮すると電子銃にはいつその低エミッタンス化が望まれる。しかし、空間電荷効果軽減の為の高電界化が RF エミッタンスの増加を引き起こすという相反する問題となり光陰極 RF 電子銃に今以上の改善は難しいと考えられている。そこで本研究では、現在達成されている値を下回る 1nC、10ps、 $1\pi$  mm.mrad 以下のエミッタンスを生成できる新しいタイプの電子銃の設計研究を行い、更にその原理実証試験のためカソード試験やパルス電圧発生装置の設計、製作、低電圧での試験という基礎開発研究を行った。

### 「高強度極低エミッタンス電子銃の基本設計」

高強度極低エミッタンス電子銃の基本構造を次のように決定した。RF 電子銃での RF エミッタンス増加の寄与をなくすため DC 電圧を使用する。しかし、放電限界電圧の問題から空間電荷効果によるエミッタンス増加が問題となるため電圧をパルス化する事で印可電圧を引き上げる。ここで放電限界電圧は、パルス幅が短いほど引き上げることが出来るが高電界化による電界電子放出が暗電流となり問題となるため、放電に関する過去の研究から加速勾配は RF 電子銃 ( $\sim$ 140MV/m) を上回る 1GV/m としパルス幅は 1ns に設定した。カソードは、ビーム構造の整形が容易なこと、必要なビームだけを生成できる事から光陰極を選択した。電圧発生器への負担を軽くする事と使用できるレーザーパルス幅が 3mm (10ps) からカソードとアノード間を 2mm に設定した。よって印可電圧を 2MV とすると 1GV/m が達成できる。10ps レーザーパルスに対し、1ns の印可時間は十分長く擬似的に DC 電圧加速と見なす事が出来る。このようにして、電子生成部は加速勾配 1GV/m のダイオード機構により電子生成直後の空間電荷によるエミッタンス増加を大幅に抑制できる。しかし、ダイオード機構だけでは高々 2MeV 程度のエネルギーであり空間電荷力によるエミッタンス増加の抑制は不十分である。これは、アノード直後に 1.6 セル RF 空洞を設置しての再加速、及び RF 空洞直後のソレノイドでエミッタンス補償を行う事で解決できる。したがって電子銃の構成は、パルス電圧印可で初期加速をするダイオード機構とエネルギー増加の RF 空洞の組み合わせとなり、RF 電子銃のカソード部端板にダイオード機構を追加した構造となる。電子銃の光陰極材は、耐電圧が高く初期エミッタンスの低減が期待できる NEA 表面を持つダイヤモンドを選定した。しかし励起には 200nm 以下のレーザーが必要になるため、実証器の段階ではダイヤモンドを基板とし Cs-Te を蒸着してカソードとして使用する。ダイヤモンドは、266nm 波長

領域の透過率があるため後方入射による透過型カソードが可能となる。ここで、ダイヤモンド基板上の Cs-Te の蒸着は実績がないためテストベンチでの実験を行った。実験の結果、透過光を用いた測定で寿命 30 日、量子効率 1.2%を確認した。

#### 「生成される電子ビームの評価」

生成される電子ビームの性能は、カソード形状及び電場分布を Poisson で計算し、その結果を General Particle Tracer(GPT)に取り込み軌道計算を行って評価した。ダイオード機構のみの計算では、エネルギー 2MeV、エネルギー幅 0.1%のビームが、1nC、 $1.0\pi$  mm.mrad で生成される事がわかった。しかし、アノード孔通過時の発散方向電場の影響からビームが発散力を受ける。よってカソードに曲率をつけ収束効果を持たせるよう改良した。この後、RF 空洞、ソレノイドを設置し再計算を行った。この際、計算結果からエミッタンスが  $1\pi$  mm.mrad 以下になるまでカソード形状の最適化を行った。最終な計算結果は、0.8m の地点でエネルギー 8.4MeV、エネルギー幅 0.85%、1nC、7.2ps、 $1.0\pi$  mm.mrad となった。この結果から目的の高強度極低エミッタンスビームが生成できる設計であることを示した。

#### 「パルス電圧発生装置の設計、製作、低電圧実証試験」

ダイオード機構にパルス電圧を印可してビーム生成の実証試験を行うため、パルス電圧発生装置の設計と製作を行った。パルス電圧発生装置は、一次パルス電源として KEK-ATF で用いているモジュレータとパルストランスで生成した 1us、-400kV から 1ns、2MV パルス電圧を生成する事を仮定した。パルス電圧発生装置の主な構成要素は、1ns パルス発生を行う PFL とギャップ放電スイッチ、パルス電圧の昇圧を行うインピーダンス変換ライン(ITL)、そしてビーム発生を行うダイオード機構である。PFL は同軸構造で内部を真空にし、1ns パルス出力の為長さは 15cm となる。伝送線路間に設置する放電スイッチは、パルスの立ち上がり(立ち下がり)が数百 ps となるよう純水、同軸構造を用いて低インダクタンス化をはかった。電子ビームを所用のタイミングで発生させるためレーザービームとパルス電圧との同期をとる必要があるが、パルス電圧を発生させる放電スイッチに時間ジッタが小さいレーザートリガー放電スイッチを使用する事を仮定した。しかし、低電圧実証試験ではレーザートリガーの代わりに別パルサーによる電圧加算によるトリガーとした。次に 1ns パルス電圧は、伝送線路を通り更に出力側に向かってインピーダンスが連続的に大きくなる ITL で昇圧される。ITL の長さは、反射波を小さくするため、反射係数特性の式から 1ns パルスの主周波数成分である 0.5GHz 成分が最小になる 0.6m とした。ITL は、入射側インピーダンスを  $10\Omega$ 、出力側を  $250\Omega$  とし伝搬に伴うエネルギー損失がないと仮定すると昇圧比が 5 倍となる。更にダイオードへの印可時に開放端反射から 2 倍となり、最終的に 10 倍に昇圧される。しかし実際には、ITL での反射や壁面での損失から昇圧比は低減される。この ITL についてシミュレーションコード (MW-Studio) を用いて計算を行い、0.5GHz 以上の周波数成分に関して透過率 90%以上、入射電圧の昇圧比約 6 倍を得た。これは予定した印可電圧の 6 割であるが、この印可電圧でエミッタンスを計算した結果  $0.95\pi$  mm.mrad となり目的のエミッタンスを

達成する事が出来る。

パルス電圧発生装置とダイオード機構(RF 空洞を除く)の製作を行い、最大-60KV 電源を PFL 充電電源とした実証試験装置を組み立てトリガー制御によるパルス電圧発生実験を行った。その結果からトリガー制御によるパルス電圧発生の確認と時間ジッタ<16ns を測定し、原理的にトリガー制御によるパルス電圧が発生出来る事を示した。

本論文では、以上の3項目の基礎研究にもとづいて DC/RF ハイブリッド方式による新しい低エミッタンス電子銃の実現可能性に十分な見通しがつけられる事を示した。フォトカソード RF 電子銃では避ける事のできないエミッタンス増大効果を、高電圧短パルス DC 電子銃とのハイブリッド方式で効果的に避ける事ができるこの電子銃は、引き続き開発研究でより低エミッタンスな電子ビームを生成できると考えられる。

## 論文の審査結果の要旨

長谷川豪志氏の博士論文は、SASE-FELを想定した低エミッタンス電子銃の開発を目指したもので、①電子生成部の設計と②短パルス高電圧発生装置の基礎研究からなる。

①では、1nC、10psという高密度電子ビームにおいて、規格化エミッタンスを $1\cdot\text{m}$ 以下にすることを目標に設定した。低エミッタンスビームを得る為には、カソードから放出された電子をすみやかに加速することが求められる。しかし加速電場が変化するRF電子銃では加速電界を高くしても、パルス内の電子が場所により異なった加速を受ける為に低エミッタンス化に限界があることを明らかにした。さらにDCで加速する場合でも、1GV/mの高電界をカソードに印加することが不可欠であることを示した。次にこのような高電界を印加する場合の放電対策として、1GV/mの高電界を1nsまで短パルス化する方法と、カソードにダイヤモンド基板を使用して耐電圧を上げる案を提唱した。そしてカソードに1GV/m、1nsの高電界短パルスを印加すると、 $1\cdot\text{m}$ 以下の規格化エミッタンスが達成されることを、GPTのシミュレーションを用いて示した。

②では、1GV/m、1nsの高電界短パルス発生に向けた実証機の、具体的な設計・製作と高電圧パルスの試験、およびダイヤモンド基板を用いた陰極の開発試験を行った。実証試験に用いた高電界短パルス発生装置は、充電用の一次高圧電源と同軸構造のパルス形成線路(PFL)、放電スイッチおよび同軸構造のテーパー型インピーダンス変換器から成る。PFLの長さで1nsの幅を決める。PFLの内軸に印加された高電圧が放電スイッチによりパルス化され、インピーダンス変換器の内軸に伝えられる。テーパー部でインピーダンスを $10\Omega$ から $250\Omega$ に変換し、電圧を昇圧する。長谷川氏は、MW-Studioを用いて数値計算を行い、パルス電圧が6倍に昇圧されることを示した。

次に、実際に製作した高電界の短パルス発生装置を用いて、動作確認の試験を行った。PFLの充電電圧を6kVに制限した状況ではあるが、短パルスの発生を確認した。技術的には、まだ放電スイッチの改良や電圧モニターの改善等に課題が残っているが、壮大な構想に基づき、実際に実証機を設計製作し、パルス発生試験まで実施した実績は高く評価できる。また実証試験用電子銃では、透過型カソードに背面からレーザーを垂直に照射するという新しい方式を採用し、実際にこれが機能することを実験で確認した。まず導電性を持たせるために硼素をドーピングしたダイヤモンド基板の透過率を測定し、使用を予定しているYAGレーザーの4倍波に対して65%の透過率を有することを示した。そしてその基板上にCs-Teを蒸着し、量子効率が2週間以上にわたって1%以上の状態に維持できることを実証した。透過型ダイヤモンド基板上にCs-Teを蒸着し、 $5\times 10^{-7}\text{Pa}$ の実用的な環境下で高い量子効率を実現したことは、透過型カソード方式の実用化に道を開いたものであり、そのオリジナリティーと先進性は高く評価される。

電子銃のビーム加速試験までは至らなかったが、本研究は短パルスの低エミッタンス電子ビーム生成に伴う諸問題を詳細に検討したうえ、更に実証機を設計製作して技術的な課題の解決に挑戦した基礎研究として重要であり、この分野における今後の研究の方向を示唆している。

審査員全員が一致して、長谷川豪志氏の論文は博士論文(工学)に値すると判定した。