

平成 22 年 6 月 22 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740129

研究課題名 (和文) 超低エミッタンス電子源開発のための基礎研究

研究課題名 (英文) Basic study of low emittance DC electron gun

研究代表者

山本 将博 (YAMAMOTO MASAHIRO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：00377962

研究成果の概要 (和文)：超低エミッタンス電子ビーム生成のための基礎研究として、主に以下の4つの成果を得た。(1)ビーム電流 $50\mu\text{A}$ のカソード寿命試験を行い、約 120 時間 (引出し電荷量で 20C) の結果を得た。(2)モードロックレーザーを用いたピコ秒幅の電子ビーム生成試験を行い、最大でバンチあたり 28pC の電子ビームを生成した。(3)試験電極の製作を行い、モリブデン製カソード電極の再エージングでは放電 1 回あたり約 0.4kV の放電電圧の向上を再確認した。(4)200kV 電子銃開発の結果を生かし ERL 用実機レベルとなる 500kV 電子銃の設計を行った。

研究成果の概要 (英文)：A basic study of an high brightness electron source for Energy Recovery Linac (ERL) was done by using a 200kV electron gun; A high bunch charge of 28 pC was generated within 25 ps bunch duration; An operational-lifetime for 120 hours with extraction beam current of $50\mu\text{A}$ was observed under extreme high vacuum condition of $2\text{E-}10\text{ Pa}$; A HV-conditioning was performed and the breakdown voltage grew by 0.4 kV per discharge above 200 kV without significant damage of electrode.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：低エミッタンス電子源、電界放出暗電流、超高真空

1. 研究開始当初の背景

現在主流の蓄積リング型放射光源の輝度は、電子ビームのエミッタンスにより決まり、その下限は蓄積リング構造で決まる平衡エミッタンスまでとなる。一方エネルギー回収型リニアック(ERL)では、電子銃より発生し

た電子ビームが超伝導空洞により加速された後、挿入光源を1度だけ通過し再び超伝導空洞に戻る時に減速位相にのせて電子ビームのエネルギーを空洞に渡し、次の電子銃から送られてくる電子ビームの加速に再利用する手法を用いる。これにより連続的に電子

ビームの加速が可能でかつそのエミッタンスは電子銃で決まるエミッタンスまで下げることが原理的に可能になる。したがっていかにエミッタンスの低い電子ビームを電子銃において生成できるかが ERL 成否の重要な鍵であると言える。具体的には、繰返し 1.3GHz、20ps 幅のバンチあたり 77pC 以上の条件にて、規格化エミッタンス 1 π .mm.mrad 以下という従来に比べ 1 桁程度低いエミッタンスの電子ビームを電子銃で生成する事で、第 3 世代放射光源に比べの平均輝度を 2 桁以上向上させられると期待されている。負の電子親和性表面を持つ GaAs 型半導体フォトカソード (NEA-GaAs) を用いた直流型電子源はビーム生成時の熱エミッタンスが小さく、ERL に要求されている電子ビームを供給できる最も有力な候補であるが、ビーム生成後の空間電荷効果によるエミッタンス増大の影響を抑えるため、500kV 以上の加速電圧が要求される。しかしながら、この NEA-GaAs フォトカソードを用いる直流高電界型の超低エミッタンス電子銃開発では Jefferson Lab(JLAB)で開発された電子銃が、350kV と最も加速電圧が高く優れているが、それでもなお上記の要求を満たしておらず、ERL 用超低エミッタンス電子銃は未だ存在していない。この 350kV 電子銃の加速電圧を制限している要因は、加速電極間の電界放出暗電流の増大が原因となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ERL に要求されている 500kV 以上の加速電圧で安定に運転ができる電子銃開発のための基礎研究にある。その研究項目として以下の 3 項目について研究を行った。

- ・ カソード寿命の改善および 500kV の高電圧印加を可能とする高電界下での電界放出暗電流の抑制
- ・ ビーム運転時のカソード寿命評価
- ・ ビーム評価に向けたピコ秒電子ビーム生成

3. 研究の方法

200kV 電子銃および高電界試験装置を用いて基礎的なデータを取得し、500kV 電子銃の設計を進めた。基礎的なデータ取得に関する詳細は以下の通りである。

(1) 比較的大きなビーム電流を引出した状態でのカソード寿命の試験を行い、大電流運転時のカソード寿命に対する問題点を洗い出す。

(2) 繰返し 1.3GHz の 1/16 の繰返し周波数 81.25MHz の Ti:Sapphire モードロックレーザーを励起光源とし、ERL に要求されるピコ秒幅の電子ビーム生成を 200kV 電子銃にて行い、ビーム評価のための準備を整える。

(3) モリブデンおよびチタン製の試験電極を用い、高電界環境下にて放電時の電界放出暗電流の評価を行う。

4. 研究成果

(1) ビーム電流 50 μ A 出力時のカソード寿命試験

200kV 電子銃へ NEA-GaAs フォトカソードを装着し、ビーム電流 50 μ A 一定となるよう照射するレーザー強度を調整し、カソード QE 低下の影響を調べた。

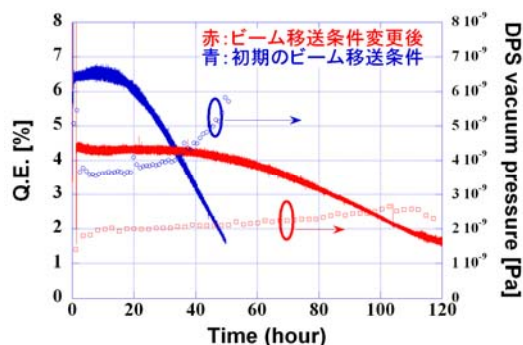


図 1 ビーム電流 50 μ A 時のカソード QE とビーム移送系真空度の関係。

図 1 にカソード寿命試験結果を示す。今回の測定で明らかになった事は、電子銃近傍でのビーム損失が大きい場合 (グラフ中の青の点)、そこでのガス放出による真空悪化がカソード QE 低下に強く影響される事であり、ビーム損失の少なく、電子銃側へ真空悪化の影響を小さく抑えられるビーム移送系の設計が非常に重要であることがわかった。

今回の試験で採用したビーム移送系では、電子銃出口の真空度 2E-11 Pa の条件下、最良の移送パラメーターにて約 120 時間 (引出し電荷量で 20C) の寿命が得られた。

ERL では、少なくとも引き出し電荷量で 1000C 以上の寿命が必要となる。今後、電子銃本体の真空改善、ビームハローの抑制によりカソード寿命を改善する研究を続ける。

(2) 200kV 電子銃を用いたピコ秒パルスビーム生成

ERL に要求されているピコ秒幅の電子ビーム生成を行うため、励起レーザーとして Ti:Sapphire モードロックレーザーを用いた。

電子銃の高圧電源の最大電流仕様の制限より、ERL に要求される電荷量を持つ電子ビームの生成には、ポッケルスセルによりレーザーパルス列を切出したバーストモード運転とする必要がある。そこで、図 2 に示すような約 6.3 μ s 幅のパルス列をポッケルスセルを用いて切出した。1 度の切り出しで約 510pulse 列切出され、立上り及び立下り時に

中途半端に切出されるパルスは両者合わせて5パルス程度であるため、その影響は高々1%程度である。duty比は 1.26×10^{-4} であり、Ti:Sapphire レーザー繰返し周波数 81.25MHz を考慮すると ERL-100mA 条件となる77pC/bunch を電子源で発生させた場合でも平均電流は約790nAまで抑えられると見積もられ、十分に電流制限以下に抑えられる。

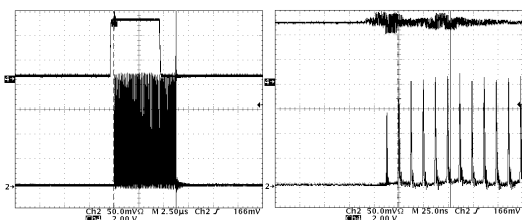


図2 ポッケルスセルを用いたレーザーパルス列の切り出し。

切出したレーザーは、200keV電子銃部に挿入されたBulk-GaAsフォトカソードへ照射した。得られた結果を図3に示す。レーザーエネルギー2.5nJ/pulse時におよそバンチあたりの電荷量が30pCの電子ビームが生成された。

GPTコードを用いた200keV電子銃のシミュレーションと比較した場合、ビーム放出径 $\phi 1\text{mm}$ 、バンチ幅25psの条件において、およそ40pC以上より空間電荷効果による引出し制限の影響を受け始めるのに対し、本実験ではレーザースポット径がおよそ $\phi 2\text{mm}$ と大きく、フォトカソードとしてBulk-GaAsを使用しているため引出されるバンチは30ps程度のレーザー幅に比べ長くテイルを引いている事、さらに使用したBulk-GaAsはZnドープ密度が $3.2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ であり表面電荷制限に対しても十分耐性がある事から、得られた実験結果と特に矛盾はないと考えられる。

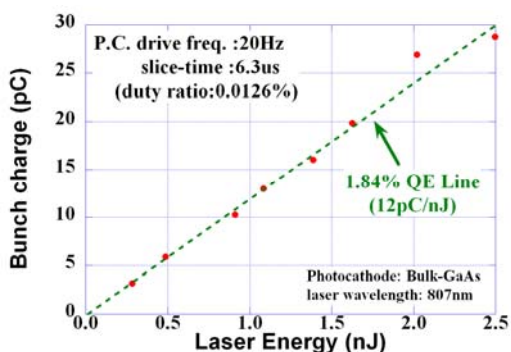


図3 200keV電子銃に装着されたBulk-GaAsフォトカソードからのピコ秒電子ビームの生成結果。

ピコ秒幅の電子ビームの生成準備はほぼ整った。今回生成したビームの評価は評価装置の開発を含め今後の課題である。

(3) Mo-Ti 試験電極の作製、電極の再エージング効果

高電界環境中における電界放出暗電流抑制のための基礎実験用として、複数の異なる材料・表面処理の施された電極サンプルを作製し、高電界試験を行う準備を進めた(図4)。

電極サンプルは、ロードロック機構により試験装置本体の真空を破ること無く交換を可能とするため、サンプル表面の裏側に着脱機構を設置した設計としている。

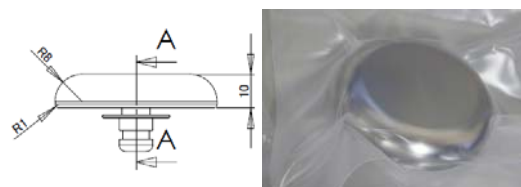


図4 作成した試験電極

200kV電子銃は、名古屋大から高エネ研へと搬送され、再度ベーキングとエージングを実施した。搬送前では放電電圧225kVの状態であったが、搬送後の最初のエージングでは放電電圧が140kV程度まで低下していた。しかしながら、搬送前と同様に放電エージングの実施により、放電1回あたり約0.4kVの放電電圧上昇が確認され、モリブデン電極の耐放電性・暗電流の抑制効果について再現性が確かめられた。

(4) 500kV電子銃、電極の設計

これまでに得られた200kV電子銃開発に関する成果を生かし、500kV電子銃装置および電極の設計を行った。主な特徴は以下の通りである。

- $1\text{E}-10\text{ Pa}$ レベルの極高真空を得るために、真空容器はガス放出速度を低く抑えられる表面処理が為されたチタンを用いる。
- ビーム損失を抑えるため、ビーム出力部のサイズをICF114規格とした。
- セラミック管は200kV電子銃で実績のある分割方式を採用し、電界の均一性確保、カソード電極部からの電界放出電子飛来防止、沿面放電の成長を抑える構造とした。

電極はチタンおよびモリブデンで製作を行う予定である。カソード表面上の電界強度を抑えるため、曲率半径60mm以上とする条件にて電極の設計を行った(図6)。カソード電極はモリブデンが最も優れていると考えられるが、大型サイズの電極加工が難しいため、カソード電極をいくつかの部品に分けて製作する方式として設計を行った。一部については表面電界10MV/mを超える部分があるが、大部分の領域で

10MV/m以下に抑えられる形状とした。

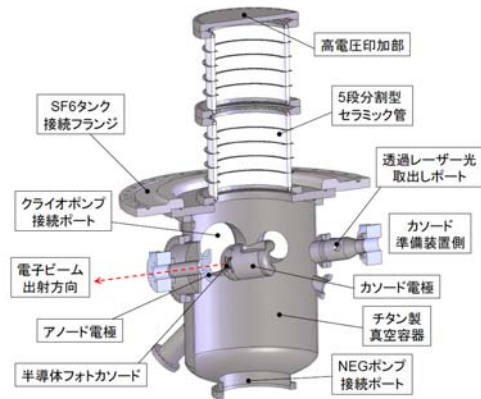


図5 高エネ研における500kV電子銃の設計

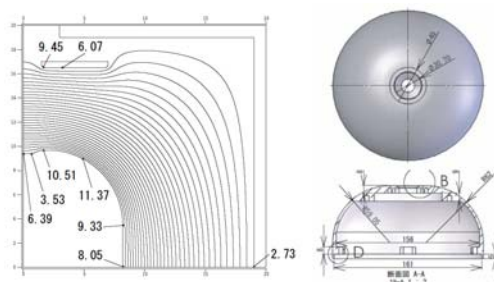


図6 カソード電極の設計

今後、今回設計したカソード電極をベースに実機用電極を製作し、高電圧試験を進める予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ①R. Nagai, M. Yamamoto(5番目), 他10名, 「High-voltage testing of a 500-kV dc photocathode electron gun」、Review of Scientific Instruments, 査読有, (2010), 033304(online) 5 pages
- ②山本将博、他27名、「KEKにおけるERL放射光源用500kV電子銃の開発計画」、第6回日本加速器学会 Proceedings, 査読無、(2009), 860-862
- ③N. Nishimori, M. Yamamoto(9番目)、他7名、「DC gun technological challenges」、Proceedings of the ERL09, 査読無、(2009)
- ④山本将博、他2名、「ERL-09(ICFA Beam Dynamics Workshop)の会議報告」、加速器, 査読無、(2009), 256-258
- ⑤M. Yamamoto, 他14名、「Status of 200-keV beam operations at Nagoya University」、Workshop on Source of

Polarized Electrons and High Brightness Electron Beams, 査読無、(2009)

- ⑥山本将博、他14名、「200keV偏極電子源 50 μ A 試験運転報告」、第5回加速器学会 Proceedings, 査読無、(2008), 957-959
- ⑦山本将博、他14名、「NEA-GaAs型フォトカソードより生成した高密度パルス電子ビームのエミッタンス測定系の構築」、第5回日本加速器学会 Proceedings, 査読無、(2008), 957-959

[学会発表] (計8件)

- ①M. Yamamoto, 他29名、「Polarized electron update in Japan」、International Linear Collider Workshop 2010 (LCWS2010), 2010年3月27日, 中国北京 (KEKよりwebEX接続発表)
- ②山本将博、他11名、「ERL用電子銃」、第27回PFシンポジウム, 2010年3月9日, 茨城県つくば市
- ③T. Miyajima, M. Yamamoto(2番目) 他20名、「500kV Gun development at KEK」、48th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources (FLS2010), 2010年3月2日, SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA, USA
- ④山本将博、他27名、「KEKにおけるERL放射光源用500kV電子銃の開発計画」、第6回日本加速器学会, 2009年8月6日, 茨城県東海村・日本原子力機構
- ⑤M. Yamamoto、「Vacuum and Field Emission from Electrodes」、ERL09, 2009年6月10日, Cornell University, Ithaca, NY, USA
- ⑥M. Yamamoto, 他14名、「Status of 200-keV beam operations at Nagoya University」、Workshop on Source of Polarized Electrons and High Brightness Electron Beams, 2008年10月1日, CEBAF Center Jefferson Lab. (Newport News, VA, USA)
- ⑦山本将博、他14名、「200keV偏極電子源 50 μ A 試験運転報告」、第5回加速器学会, 2008年8月8日, 東広島市中央公民館
- ⑧山本将博、他14名、「NEA-GaAs型フォトカソードより生成した高密度パルス電子ビームのエミッタンス測定系の構築」、第5回日本加速器学会, 2008年8月7日, 東広島市中央公民館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 将博 (YAMAMOTO MASAHIRO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速
器研究機構・加速器研究施設・助教
研究者番号：00377962