

250kV 大電流光陰極電子銃の開発

DEVELOPMENT OF A 250KV PHOTOGUN FOR HIGH CURRENT OPERATION

西森信行[#], 永井良治, 沢村勝, 羽島良一

Nobuyuki Nishimori [#], Ryoji Nagai, Masaru Sawamura, Ryoichi Hajima

JAEA, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka, Ibaraki, 319-1195

Abstract

We have developed a multialkali photocathode preparation system at JAEA to demonstrate high current operation of a dc photocathode gun. Quantum efficiency of 0.37% at 532 nm was obtained for a Cs₃Sb photocathode. The preparation system was connected to a photocathode gun equipped with a 250kV-50mA Cockcroft Walton high voltage power supply. The gun was high voltage conditioned up to 230 kV without a central stem electrode. Beam generation test from the multialkali photocathode is scheduled to be performed by the end of FY2015.

1. はじめに

次世代 ERL 放射光源や高繰り返し自由電子レーザー (FEL) 光源を目的として高輝度大電流電子銃が開発されている。主要な開発課題の一つが光陰極の長寿命化である。コーネル大学では光陰極直流電子銃を備えた入射器から 75mA の電子ビームを生成した。マルチアルカリ光陰極を用いることで、1/e 電荷寿命 15000C を実現している^[1]。75mA で 55 時間連続ビームを生成しても量子効率が 1/e となるに過ぎず、次世代放射光源実現に大きく前進している。高繰り返し X 線 FEL に要求される高輝度性能も、コーネル大学の同じ入射器で同じ光陰極を用いて実現した^[2]。このように、マルチアルカリ光陰極は次世代放射光源実現へ向けて最も期待される光陰極である。

我々は ERL 放射光源のために 500kV 光陰極直流電子銃を開発してきた。2012 年には光陰極電子銃から初めて 500-keV 電子ビーム生成に成功した^[3]。本電子銃は KEK のコンパクト ERL (cERL) に移設後、2013 年 4 月からコミッションング運転に使われ、レーザーコンプトン散乱実験等のために 80 μ A の電

子ビームを生成している^[4,5]。2015 年度には 1mA、その後 10mA と段階的に平均ビーム電流を増やす計画である。cERL ではガリウムヒ素 (GaAs) 光陰極を用いているが、その寿命は 2000C 程度である^[6]。マルチアルカリ光陰極ではその 10 倍が実証されている^[1]ことから JAEA においてもマルチアルカリ光陰極開発に着手した^[7]。

次章では、JAEA におけるマルチアルカリ光陰極準備システムの開発状況を述べる。本システムは 250kV-50mA 高電圧電源を備えた光陰極電子銃に接続されている。3 章では、光陰極電子銃の高電圧印加試験状況について述べる。

2. マルチアルカリ光陰極準備システム

我々は文献[8,9]を参考にマルチアルカリ光陰極システムを構築した。厚さ 0.5mm のシリコンウェハを基板とし、モリブデン製のパックにインジウムで接着している。パックは cERL 光陰極電子銃で用いている GaAs 光陰極と同じデザインである。ジェ

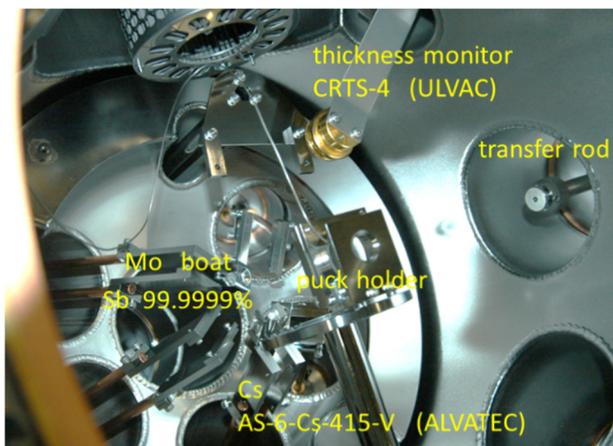


Figure 1: Inside view of multialkali photocathode preparation chamber.

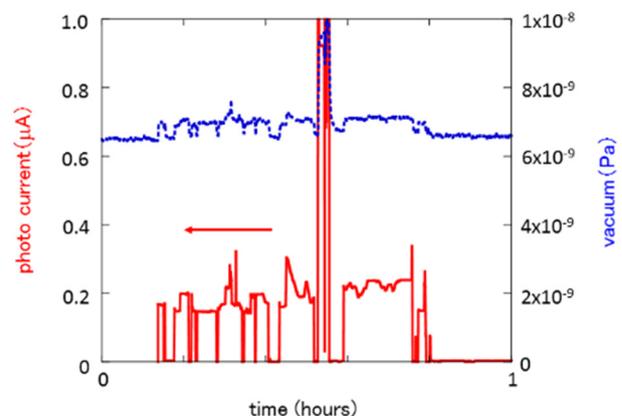


Figure 2: Photo current (red curve) measured with a Faraday cup in front of a Cs₃Sb photocathode with 532 nm laser of 125 μ W. The QE is estimated to be 0.37%. The vacuum pressure rises with laser irradiation.

[#] nishimori.nobuyuki@jaea.go.jp

ファーンソン研究所と同様^[10]、専用の真空スーツケースを用いて、cERL 電子銃で用いることも可能である。基板の熱洗浄、アンチモンとアルカリ金属蒸着時の基板加熱のためタングステンヒーターを用いている。パックホルダーには熱電対が設置されており、加熱時のパックの温度がモニター出来るようになっている。

マルチアルカリ光陰極として、セシウムアンチモン (Cs_3Sb) 光陰極を最初に製作することにした。2種以上のアルカリ金属を用いるより、量子効率はやや劣るものの、最も単純なアルカリアンチモン光陰極であり、装置のバグ出しに最適と考えたからである。99.9999%純度のアンチモン粒 (SB-020100:ニラコ) をモリブデン製ボートに乗せ加熱し蒸着した。セシウム源 (AS-6-Cs-415-V:アルパテック) は基板から 3cm 離れたところに設置した。可動式膜厚計 (CRTS-4U:アルバック) を基板の位置にセットし、アンチモンとセシウムの膜厚を測定した。装置のセットアップ完了後、マルチアルカリ光陰極準備システムを $0.3\text{m}^3/\text{s}$ のターボポンプで排気しながら、20時間 170°C でベーキングした。ベーキングの終了時に $1.3\text{m}^3/\text{s}$ の NEG ポンプ (CapaciTorr-B 1300-2:サエスゲッターズ) を活性化し、 $0.05\text{m}^3/\text{s}$ のイオンポンプ (PST-050AU:アルバック) を起動した。真空度は $5 \times 10^{-9}\text{Pa}$ を実現している。

成膜手順は次の通りである。シリコン基板を 550°C で 2 時間ヒートクリーニングし、 170°C まで冷却した。その温度で厚さ 40nm のアンチモンを蒸着後、光電流値が最大になるまでセシウムを蒸着した。図 2 はパックホルダーのすぐ近くにあるファラディカップで測定した光電流である。ファラディカップは基板に対し $+40\text{V}$ の電位を持つ。 532nm の CW レーザー (パワー $125\mu\text{W}$) を用いてビームを生成した。この測定から Cs_3Sb 光陰極の量子効率 (QE) は 0.37% と評価される。この値は教科書^[9]や文献^[8,10]に比べると一桁少ない値となっている。アンチモン蒸着時の温度の最適化や、シリコン基板の表面洗浄の最適化などで低 QE 問題を解決したいと考えている。

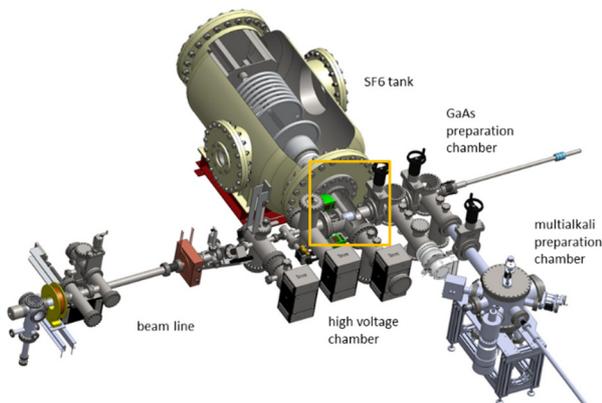


Figure 3: Gun test stand for high current beam generation at JAEA.

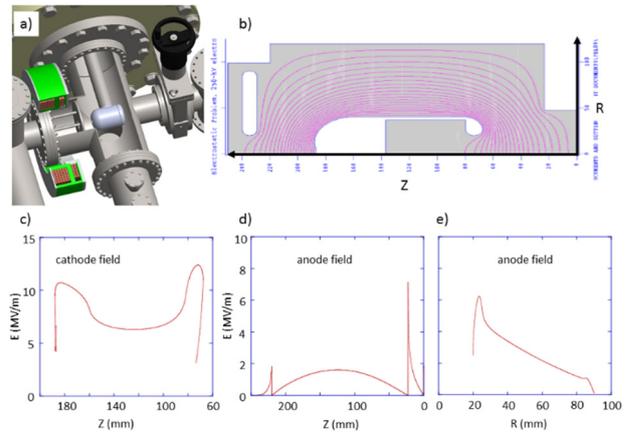


Figure 4: (a) Cutaway drawing of gun high voltage chamber and (b) radial cross section showing static electric field calculation for the gun chamber. Surface electric field distributions at 250 kV (c) of the cathode as a function of Z, (d) of the HV chamber as a function of Z, and (e) of the anode electrode as a function of R.

3. 大電流ビーム試験用 250kV の電子銃

JAEA では $250\text{kV}-50\text{mA}$ のコッククロフト電源を持つ直流電子銃システムを保有している。この電子銃は次世代放射光源用に、ガリウムヒ素を光陰極として開発されたものである。システムの詳細やビーム試験結果については文献^[11,12]に詳しい。図 3 に示すように電子銃システムは、 SF_6 絶縁ガスタンク、高電圧真空容器、GaAs 光陰極準備装置、ソレノイドやレーザー導入真空容器、診断用ビームラインで構成されている。本研究開発で進めているマルチアルカリ光陰極準備システムは、GaAs 準備容器に接続されており、トランスファーロードを用いて光陰極を輸送することが出来る。

本電子銃の GaAs 光陰極から $1\mu\text{A}$ の電子ビームを生成し、磁気エミッタンスの研究が行われた^[12]。運転電圧は 180kV であったが、その原因はカソード電極からの電界放出電子であった。この問題を避けるため、カソード電極を新たにデザインし、表面電界の低減を図っている。図 4 に静電界計算結果を示す。カソードの最大電界を $14\text{MV}/\text{m}$ から $12\text{MV}/\text{m}$ に、アノードの最大電界を $8\text{MV}/\text{m}$ から $6\text{MV}/\text{m}$ に、それぞれ低減することができた。

カソード電極の交換前に、サポート電極を抜いてセラミック管単独での高電圧印加試験を行った。カソード電極を入れた試験と比較することで、カソード電極からの電界放出電流も推定することができる。図 5 に高電圧保持試験の様子を示す。本試験前に 240kV まで昇電圧したところ、放電が発生したため、それ以上の昇圧は避けた。その理由は、放電後に昇電圧時の真空度が悪くなったこと、またマルチアルカリ光陰極を用いた電子ビーム生成試験は、当面

200kV で行いたいと考えているからである。ただし、230kV で4時間保持したところ、真空度は 8×10^{-9} Pa から 4×10^{-9} Pa の放電前の状態に回復した。図5は真空度の回復後の保持試験の様子である。200kV 以上では、電圧を印加しない状態に対して若干ガス放出があるものの、真空度の変化はほとんどない。高電圧真空容器のセラミック管を覗く位置に設置した放射線モニターが、200kV 以上ではその値が若干上昇する。この放射線上昇が何に起因するものか、特定できていない。セラミック管表面は TiN コーティングしてあるため、微小な表面電流が原因の可能性もある。

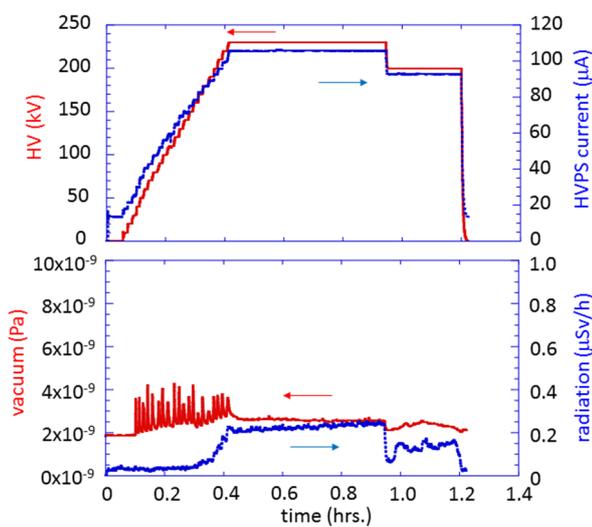


Figure 5: High voltage holding test without central stem electrode. Top shows HV (red curve) and HVPS current (blue curve). Bottom shows vacuum pressure (red curve) and radiation (blue curve). The vacuum pressure and radiation slightly increase with HV.

4. まとめ

我々はマルチアルカリ光陰極準備システムを開発

している。これまでに、Cs₃Sb 光陰極を成膜し、QE=0.37%を532nmで得た。教科書^[9]の値などに比べて1桁少ないので、システムのさらなる改良が必要である。システムを250kV-50mAのコッククロフト電源を持つ光陰極電子銃に接続した。セラミック管単独での高電圧印加試験を行い、230kVまで高電圧コンディショニングを行った。マルチアルカリ光陰極からのビーム生成試験は2015年度末までを予定しており、その後小型テラヘルツスミスパーセル放射光源としての試験も予定している。

謝辞

本研究の一部は、科研費15K13412、文部科学省受託研究：光・量子融合連携研究開発プログラム「小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング基盤技術開発」の成果である。

参考文献

- [1] L. Cultera et al., Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 103504.
- [2] C. Gulliford et al., Appl. Phys. Lett. 106 (2015) 094101.
- [3] N. Nishimori et al., Appl. Phys. Lett. 102 (2013) 234103.
- [4] R. Nagai et al., “Demonstration of High-flux Photon Generation from an ERL-based Laser Compton Photon Source”, in Proc. of IPAC2015, Richmond, VA, 2015.
- [5] S. Sakanaka et al., “Recent Progress and Operational Status of the compact ERL at KEK”, in Proc. of IPAC2015, Richmond, VA, 2015.
- [6] J. Grames et al., Phys. Rev. STAB 14 (2011) 043501.
- [7] 西森信行 他、「大電流電子源のための光陰極準備システムの開発」,第11回加速器学会プロシーディングス,1031 (2014).
- [8] Luca Cultera, “Fabrication, characterization, and use of alkali antimonides in a dc gun”, Photocathode Physics for Photoinjectors 2012, Ithaca, NY, 2012.
- [9] A. H. Sommer, “Photoemissive Materials”, John Wiley & Sons, Inc. New York (1968).
- [10] R. R. Mammei et al., Phys. Rev. STAB 16 (2013) 033401.
- [11] R. Nagai et al., “Development of a 250-kV Photo-cathode Electron Gun for the ERL Light Sources at JAEA”, in Proc. of PAC2009, p. 545-547, Vancouver, BC, Canada, 2009.
- [12] R. Nagai et al., Rev. Sci. Instrum. 83 (2012) 123303.