

アルカリアンチモン光陰極高電圧電子銃からのビーム生成

BEAM GENERATION FROM A HIGH VOLTAGE DC GUN WITH AN ALKALI ANTIMONIDE PHOTOCATHODE

西森信行^{#A)}, 永井良治^{B)}, 沢村勝^{B)}, 羽島良一^{B)}

Nobuyuki Nishimori^{#A)}, Ryoji Nagai^{B)}, Masaru Sawamura^{B)}, Ryoichi Hajima^{B)}

^{A)} Tohoku University, 1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai, Miyagi 982-0826

^{B)} QST, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka, Ibaraki, 319-1106

Abstract

We have generated 1.3 μA beam from an alkali photocathode dc gun at 150kV. The Cs_3Sb photocathode is fabricated in our preparation system. The maximum quantum efficiency reaches 5.8 % at 532 nm. The dc gun was high voltage conditioned up to 230 kV with cathode electrode in place. High voltage holding test for more than eight hours was performed at 210 kV. We will prepare for beam generation test at current higher than 10mA.

1. はじめに

次世代 ERL 放射光源[1]、EUV リソグラフィ用高出力自由電子レーザー (FEL) [2]、高繰り返し XFEL 光源を目的として高輝度・大電流性能を持つ光陰極電子銃が開発されている。これら次世代光源の実用化の課題の一つが、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から 75mA の電子ビームを生成し、1/e 電荷寿命 15000C を実現した[3]。75mA で 55 時間連続ビームを生成しても、量子効率が 1/e という長寿命性能の実現は、マルチアルカリ光陰極の採用が鍵であった。XFEL に必要な

電子ビームの高輝度性能も、同じ光陰極を用いて既
に実証されている[4]。

量研機構 (旧原子力機構) においても、次世代 ERL 放射光源やテラヘルツスミッパースセル放射光源を目的として、50mA ビーム生成を目指した 250kV 光陰極電子銃を開発している[5]。ビーム生成の前提となる技術課題は、安定な高電圧印加と高量子効率光陰極の成膜である。昨年までに、マルチアルカリ光陰極成膜装置を完成し、アルカリ光陰極(Cs_3Sb)の最初の成膜に成功した[5]。ただし、その量子効率は 0.37%と教科書[6]に比べて 1 桁少ない値であった。高電圧についてはカソード電極及びそれを支えるサポート電極を外した状態で 230kV の長時間保持に成功した他、暗電流を抑制するデザインの新しいカソード電極を制作した[5]。

昨年からの進捗は、高電圧については新カソード電極とサポートロッドをインストールした状態で 230kV までの高電圧コンディショニングと、210kV で 8 時間以上無放電保持に成功したことである。成膜についてはより最適な蒸着条件を用いて、量子効率 5.8%@530nm を達成した。0.37%の量子効率を得たのと同じ基板で実現した。ビームラインも整備し、ビーム生成試験を行った。ビーム生成試験は電圧 150kV にて行い、YAG スクリーンモニターによるビームプロファイルの確認と、ビームダンプ電流 1.3 μA を計測した。0.18 μA で 2 時間の連続ビーム生成も行った。2 章では、アルカリ光陰極成膜の開発状況を述べる。3 章では、光陰極電子銃の高電圧印加試験、下流ビームラインの整備、ビーム生成試験について述べる。

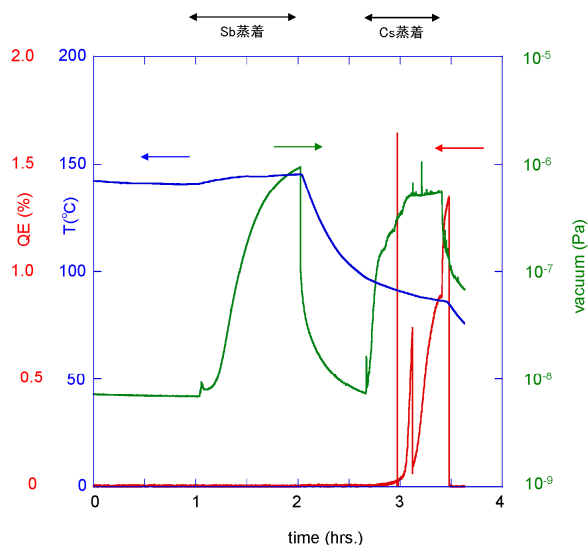


Figure 1: Quantum efficiency of a Cs_3Sb photocathode (red curve) obtained from photocurrent measured with a Faraday cup in front of it and a 532 nm laser. The green curve shows vacuum pressure of the evaporation chamber. The first and second peaks show Sb and Cs evaporation, respectively. The blue curve shows the temperature of the photocathode puck holder.

2. アルカリ光陰極成膜

アルカリ光陰極成膜装置は文献[6,7]を参考に、MBE (Molecular Beam Epitaxy) 装置として 20 年以上前に購入していたものを改造して構築した[5]。

[#] n_nishim@tagen.tohoku.ac.jp

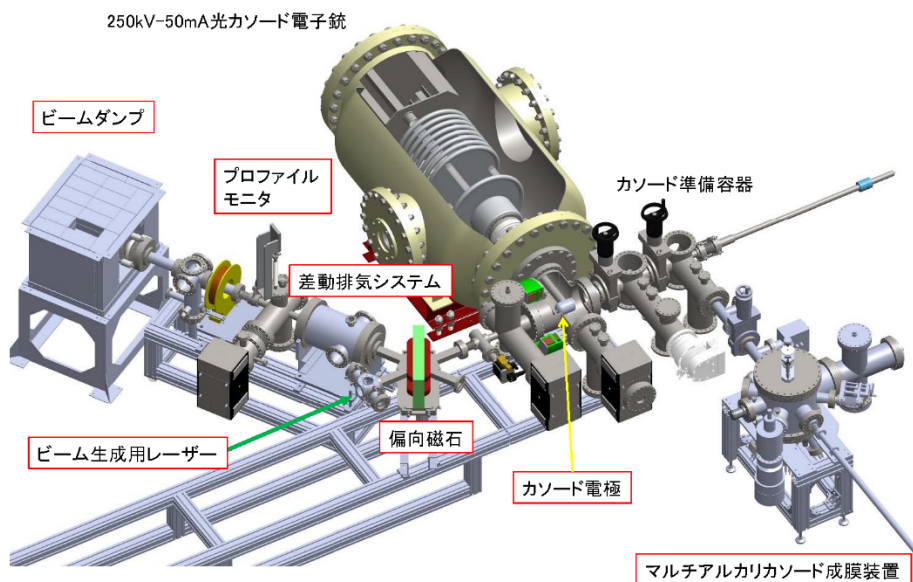


Figure 2: Gun test stand with a multialkali photocathode preparation system for high current beam generation at QST.

厚さ 0.5mm のシリコンウェハを基板とし、アルカリ源を用いて基板表面に成膜する。基板はモリブデン製のパックにインジウムで接着している。昨年度 0.37% の量子効率を達成したパックを極高真空 (2×10^{-9} Pa) で成膜装置に保持していた。今回は、同じ基板を再成膜してビーム生成試験を行った。基板の加熱洗浄は以前と同じ条件 (550°C で 2 時間) で行った。パックが固定されているステンレス製のパックホルダーには熱電対が取り付けられ、温度モニターとして利用する。パック表面温度とモニターの関係は校正済みである。Fig. 1 のアンチモンとセシウムの蒸着は、加熱洗浄とは別の日に行った。アンチモン蒸着時の基板加熱温度 (基板表面 170°C 相当)、真空度の劣化と蒸着時間 (アンチモンの膜厚に相当) は 0.37% の QE 実現時と同様であった。

次にセシウムを蒸着した。基板表面にレーザー照射し、発生電子 (光電流) を測定しながら蒸着する。昨年度までは出力 0.1mW@532nm 程度のレーザーを用いていたが、4.6mW@532nm に交換した。低い QE での光電流測定が可能となり、蒸着条件の最適化が容易となった。昨年度からの違いはセシウム源を加熱するための電流量である。昨年並みの 8.0A で蒸着している間は光電流がなかなか増えず、原因が不明なまま 10 分程度待った。光電流の確認後は、セシウム加熱源の電流増加とともに光電流増加を明確に観測できた。最終的に、セシウム源の最適な加熱電流量は 8.8A であることがわかった。我々の用いている Alvasource 社製のセシウム源は蒸発セシウム量が多く、アルカリ光陰極の成膜に適しているが、個体差が大きい。一方で、SAES 社製のセシウム源は個体差は少ないが、蒸発セシウム量が少ないとされており、どちらのアルカリ源を用いるかは難しい

選択である。今回は、光電流モニター用のレーザーを強化したことで、セシウム源の最適化ができた。

Fig.1 に示すように、セシウムの蒸着終了直前に 1.0% の QE を記録し、終了後温度を下げ始めると急速に QE が上昇した。翌々日、室温条件下で測定した QE は 2.7% であった。昨年度の 0.37% から 1 桁程度上昇したことになる。昨年度は、セシウムの蒸着温度条件が不適当であったため QE が低かったと考えている。

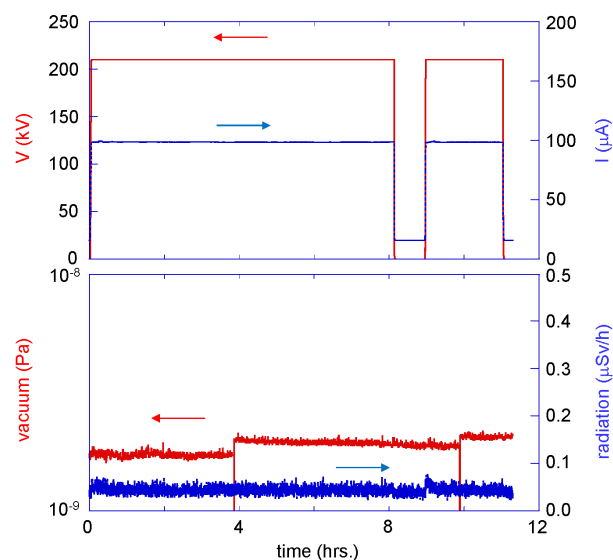


Figure 3: High voltage holding test with cathode and central stem electrodes. Top shows HV (red curve) and HVPS current (blue curve). Bottom shows vacuum pressure (red curve) and radiation (blue curve).



Figure 4: Beam profile measured with a YAG screen monitor. The screen size is 23 mm in diameter.

3. アルカリ光陰極電子銃からビーム生成

Fig.2 に QST の大電流ビーム試験用電子銃装置を示す。アルカリ光陰極成膜装置で成膜したパックをトランスファーロードで 250kV 電子銃のカソード電極に装着出来る。ビーム生成試験のために、電子銃下流ビームラインを整備した。ビーム生成用レーザーは電子銃下流の偏向磁石真空容器のビューポートから打ち込む。光陰極で反射したレーザーは同じビューポートから取り出す。偏向磁石下流には差動排気容器（直径 3cm 長さ 3cm のコンダクタンス制限オリフィスを出入り口に持ち、容器内部には 3500 l/s の NEG ポンプを持つ）が設置されており、 2×10^{-9} Pa の極高真空である電子銃とビームダンプを真空的に切り離す役割を果たす。差動排気システム直後に設置された YAG スクリーンを用いてビームプロファイルを観測する。プロファイルモニター下流にはスミスパーセル放射光生成用の回折格子が設置された直線導入器と、ビームを絞るためのソレノイド電磁石が設置されている。また、ビームダンプは 500kV-10mA ビーム用に製作されたものを流用した。本電子銃からは最大 250kV-50mA の電子ビームを生成することが出来る。ビームパワーとしては、最大 2.5 倍となるので、5kW 以上のビームパワーをダンプする場合は、温度をモニターしながら電流を増やす必要がある。

Fig.3 にカソード電極とそれを支えるサポートロード電極をインストールした後の電子銃高電圧保持試験結果を示す。210kV で 8 時間以上、無放電でありビーム試験に問題のない高電圧性能を持つ。本試験に先立ち、延べ 18 時間の高電圧コンディショニングを行い、暗電流発生なく 230kV まで高電圧印加することができた。これらの高電圧印加試験では、ステンレス製のダミーパックをカソード電極先端に装着している。

過去に本電子銃を用いて 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[8]。当時の運転電圧は 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。新カソード電極は、表面電界の低減を図り、より高電圧化を目指したものであるが、目論見通りの結果が得られたことになる。

Fig.4 は YAG スクリーンで観測したビームプロファイルである。スクリーンのサイズは直径 23 mm である。最初のビームプロファイルを得るまでにやや手間取った。原因は電磁石のリモートコントロール操作に失敗したからである。プロファイルモニター後のソレノイド磁石と偏向磁石の操作を取り違え、偏向磁石を操作しているつもりで、ソレノイド磁石を操作していた。その間、偏向電磁石に磁場が印加されず、電子ビームがレーザー導入用の窓を直撃していた。ビーム生成中に電子銃の放電が 2 回発生し、その後電子銃から電圧とともに指数関数的に増加する暗電流が発生した。電子ビームが窓を直接叩くことで発生した粉塵が電子銃に逆流し、カソード電極に付着して、暗電流発生源となったと考えられる。150kV において暗電流は既に発生しているが、真空度の劣化が少ないことから、この電圧でビーム生成試験を行うことにした。

Fig.5 はビーム生成試験時の電圧（赤）、ビームダンプ電流（青）、暗電流発生による放射線（紫）、電子銃真空度（緑）を示す。下流ビームラインと接続した状態で真空度は 2.3×10^{-9} Pa という極高真空である。レーザーは波長 532nm でレーザーパワーの実測値は $51\mu\text{W}$ 、ビームダンプ電流は $1.26\mu\text{A}$ であった。この結果から光陰極の QE は 5.8% と推定された。この値は成膜装置で測定した 2.7% を大きく上回っている。考えられる理由は、極高真空中で保持している

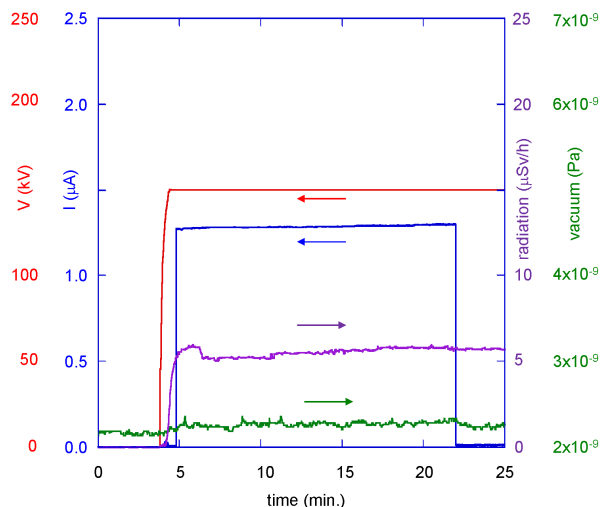


Figure 5: Beam current measured with a beam dump (blue curve), high voltage (red), radiation monitor (purple), and gun vacuum pressure (green). The beam current is $1.26\mu\text{A}$ with $51\mu\text{W}$ laser at 532 nm, which corresponds to $\text{QE}=5.8\%$ for Cs_3Sb photocathode.

間に徐々に QE が上昇した可能性と、成膜装置の QE 計測で光電流を十分に捕獲できていない可能性である。QE=5.8%は市販の光電子増倍管の Cs₃Sb 光電面の QE と遜色ない値であり、成膜装置の健全性が示されたことになる。今後、カリウムやナトリウム等の異なるアルカリ源をインストールして成膜し、マルチアルカリ効果により高い QE が得られることを期待している。

4. まとめ

我々はマルチアルカリ光陰極成膜装置を開発している。Cs₃Sb 光陰極の成膜条件を最適化することで、QE=5.8%を 532nm で得た。教科書[6]の値などと遜色ないレベルに到達し、装置の健全性を実証した。さらに、ビーム生成試験のため下流ビームラインの整備と共に光陰極電子銃の高電圧試験を行い、210kV で長時間無放電を実現した。カソード電極の改造の成果である。成膜したパックを光陰極電子銃のカソード電極に取り付け、レーザーを照射し、最大 1.3 μ A ビーム電流の安定な生成に成功した。今後は、50mA ビーム生成試験を目指しビームダンプの放射線遮蔽の強化、ビームダンプ冷却装置の準備、ビームエキスパンダーの整備を行う予定である。また、電子銃のカソード電極を大気開放し、暗電流源の除去に取り組むことも視野に入れている。ビーム

プロファイルモニター下流にインストール済みの回折格子を用いて、小型テラヘルツスミスパーセル放射光源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] 坂中章悟 他、「コンパクト ERL におけるビーム電流約 1mA の運転」、本プロシーディングス、WEOM15 (2016).
- [2] 中村典雄 他、「ERL を用いた高出力 EUV-FEL 光源の S2E シミュレーション.スタディ」、本プロシーディングス、TUP074 (2016).
- [3] L. Cultera *et al.*, Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 103504.
- [4] C. Gulliford *et al.*, Appl. Phys. Lett. 106 (2015) 094101.
- [5] 西森信行 他、「250kV 光陰極電子銃の開発」、第 12 回加速器学会プロシーディングス、WEP036, 508 (2015).
- [6] A. H. Sommer, "Photoemissive Materials", John Wiley & Sons, Inc. New York (1968).
- [7] Luca Cultera, "Fabrication, characterization, and use of alkali antimonides in a dc gun", Photocathode Physics for Photoinjectors 2012, Ithaca, NY, 2012.
- [8] R. Nagai *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 83 (2012) 123303.