

アルカリアンチモン光陰極高電圧電子銃から mA ビーム生成

HIGH CURRENT 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 developed a DC gun test stand at National Institutes for Quantum Radiological Science and Technology (QST) to generate high current electron beam. The gun test stand consists of an alkali antimonide photocathode preparation chamber, a DC gun with a 250kV-50mA high voltage power supply, and beam line with a water cooled beam dump. We successfully fabricated a Cs₃Sb photocathode with quantum efficiency of 5.8 % at 532 nm wavelength and generated 150 keV beam with current up to 4.3 mA with 500 mW laser. Our experimental results of mA beam generation are presented.

1. はじめに

高輝度・大電流性能を持つ光陰極電子銃は EUV ソングラフイー用高出力自由電子レーザー (FEL) [1] などの次世代光源や小型テラヘルツスミスパーセル光源[2]への応用が期待される。これら目的達成のための、電子銃開発課題の一つが、光陰極の長寿命化であり、アルカリアンチモン光陰極を用いることで達成できるのではないかと期待されている。アルカリアンチモン光陰極の電子銃適用例を振り返ると、1993年に米ボーイング/ロスアラモスで 32mA 大電流ビーム生成が K₂CsSb 光陰極を用いて実証されたのが大きな出来事である[3]。433MHz RF 電子銃を使ったこの成果は、その後 20 年間大電流電子ビーム生成の世界記録であり続けた。2000年に米ジェファソン研究所(JLab)自由電子レーザー(FEL)がエネルギー回収リニアック(ERL)技術を用いてキロワット高出力 FEL 発振に成功後[4]、ERL 技術を用いた次世代光源開発が世界的に注目を集めるようになった。そこでは、大電流ビーム生成が大きな課題となる。

蓄積リング光源で標準的な 100mA ビームを ERL 光源で実現するには、電子銃から 100mA の電子ビームを生成する必要がある。これは、同じ電子ビームの周回で大電流化を実現する蓄積リング光源と決定的に異なる。そのため、100mA ビーム生成可能な光陰極電子銃開発が ERL 光源にとって大きな技術的課題となった。2005 年頃には JLab FEL でガリウムヒ素光陰極から 10mA ビーム生成が実証され[5]、その後の電子源開発のモデルとなった。米コーネル大学では、負親和性のガリウムヒ素光陰極よりも、正親和性のアルカリアンチモン光陰極が長寿命性能を持つと考え、350kV 直流電子銃開発を進めた。2013 年に K₂CsSb 光陰極を用いた 65mA ビーム生成で世界記録を塗り替え[6]、その後最大 75mA のビーム生成に成功した[7]。520nm レーザーに対するカソードの量

子効率 (QE) は 6% (K₂CsSb)、4.5% (CsSb)、4.5% (NaKSb) であり 1/e 電荷寿命 15000C を実現した[7]。その他、JLab でも 200kV 直流電子銃に K₂CsSb 光陰極を導入して、5mA ビームの生成、QE=1.7% (532nm) を実現している[8]。

このように、アルカリ光陰極開発は多くの研究機関で行われ、成熟した開発課題のように見える。しかし、数%の高い量子効率を電子銃本体で実現し、mA 以上のビーム生成を行った例は、実は 3 例 (現役は 2 例) のみである。光陰極準備装置で高量子効率を実現しても、電子銃本体に移送後、量子効率が大幅に低下すること、高量子効率を持つ光陰極の成膜の再現性が不十分なことが、最近の国際会議 (ERL17) においても報告されている[9]。国内においては広大[10]、早稲田大[11]、名大[12]、東大[13]などで開発が進められているが、mA 級の大電流ビーム生成例はない。このように、アルカリアンチモン光陰極からの大電流ビーム生成は、世界的な技術の蓄積という観点からも極めて重要である。

量研 (旧原子力機構) では、次世代放射光源やテラヘルツスミスパーセル放射光源を目的として、mA 以上の大電流ビーム生成を目指した 250kV 光陰極電子銃を開発している[14]。昨年までに、QE=5.8%のアルカリ光陰極 (Cs₃Sb) の成膜と最初のビーム生成試験の報告を行った[14]。本量子効率は電子銃本体にトランスファーロードで移送後に測定した値である。コーネル大学と同程度以上の高い値を示した稀な例である。

昨年からの進捗は、大電流ビーム生成試験の成功である。最大出力 5mW レーザーを用いて 50 μ A ビームの生成、最大出力 3W レーザーを用いて 4.3mA ビームの生成に成功した。これらの実験結果について次章で報告する。

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

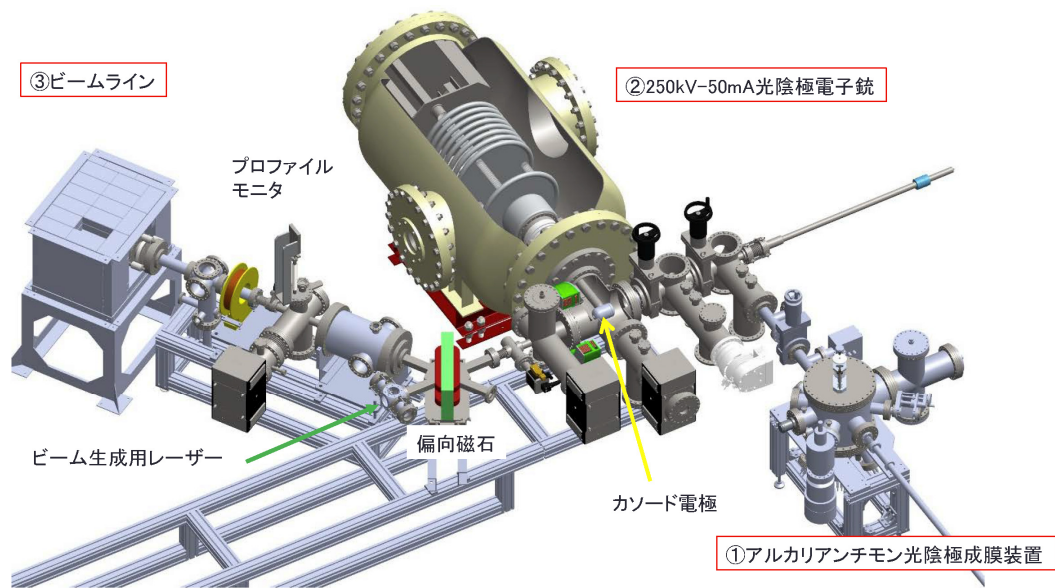


Figure 1: Gun test stand with a multialkali photocathode preparation system for high current beam generation at QST.

2. 大電流ビーム生成試験

図1にQSTで開発を進めている大電流ビーム生成用光陰極電子銃装置を示す。本装置は①アルカリアンチモン光陰極成膜装置、②250kV-50mA光陰極電子銃、③ビームラインで構成されている。光陰極成膜装置は、GaAs光陰極成膜用に用いていた真空容器[15]を改造したものであり、詳細は文献[14]で述べている。成膜したCs₃Sb光陰極は電子銃本体のカソード電極内で、QE=5.8%を達成した。ビームダンプで測定した電流量と、偏向磁石真空ダクトの窓で測定したレーザーパワーから求めた。

電子銃本体の開発は2006年頃から始まった[16]。次世代光源用電子銃の基礎技術を確認する目的で

あったため、GaAsを光陰極として用い、180kVで1 μ Aのビーム生成に成功した[17]。その後、高電圧印加の観点から表面電界を下げるようにカソード電極を改造し、同時にコンパクトERLと同じ形状の光陰極パックを用いることが出来るようにした[18]。高電圧性能については、210kV安定印加に成功している[14]。

ビームラインの詳細は文献[14]で述べている。当時から進捗は、大電流ビーム試験のためのビームダンプ水冷、ビームエキスパンダーの設置、ビームダンプを覆う鉛遮蔽の設置、mA級の大電流ビーム試験のための3Wレーザー準備である。

図2左に最大出力5mWのレーザーを用いた電子ビーム生成試験の結果を示す。電圧は150kV(赤

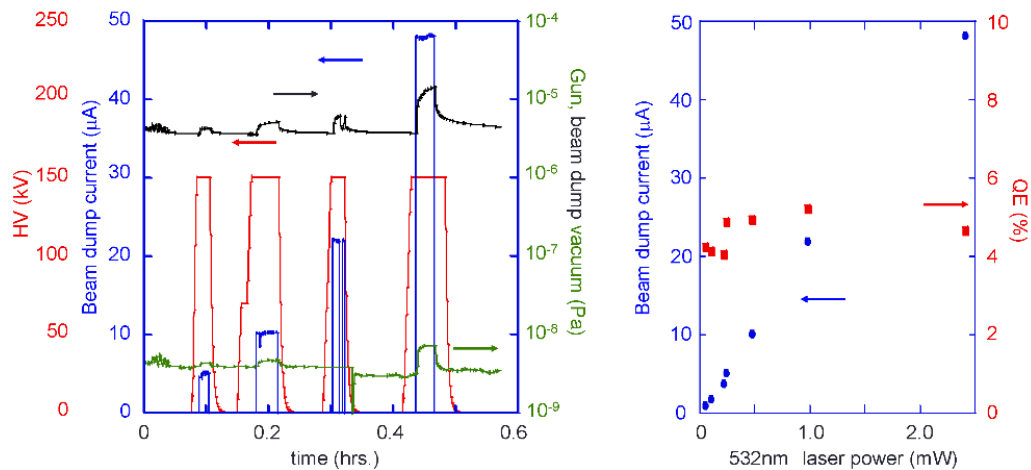


Figure 2: The left shows beam dump current (blue curve), HV (red curve), gun vacuum (green curve) and beam dump vacuum (black curve). The right shows beam dump current (blue circles) and QE (red squares) as a function of laser power at 532nm. The maximum laser power used for the present measurement is 5mW.

線)、青線で示す電流の最大値は約 $50\mu\text{A}$ であった。緑線で電子銃の真空度は $2\times 10^{-9}\text{Pa}$ が標準であるが、下流ビームラインと接続すると、約 2 倍に増加した。黒線で示すビームダンプの真空度は、電子銃よりも 3 桁程度悪いが、ビームライン上に設置した差動排気システムのおかげで、電子銃の真空度は余り悪くならない。図 2 右には 532nm レーザー出力の関数として、電流 (青丸)、QE (赤角) をプロットした。電子銃本体の真空度の 2 倍レーザーの出力を変えながらビーム生成試験を行った。QE はレーザーパワーによらず、およそ 5% である。本測定は光陰極成膜の 4.5 ヶ月後に行ったものである。成膜直後に 5.8% であったことから、光陰極の暗寿命は年オーダーに長いものであることが予想される。

図 3 左に最大出力 3W レーザーを用いた電子ビーム生成試験の結果を示す。電圧は 150kV (赤線)、青線で示す電流の最大値は約 4.3mA であり、この時のレーザーパワーは 500mW であった。緑線で示す電子銃の真空度は $1\times 10^{-8}\text{Pa}$ になっているが、これはターボポンプの操作を誤り、ビームラインの真空度を劣化させた時に、差動排気装置の NEG ポンプの働きが悪くなったためと考えられる。電子銃のみの真空度は $2\times 10^{-9}\text{Pa}$ のままであった。図 3 右に 532nm レーザー出力の関数として、電流 (青丸)、QE (赤角) をプロットした。QE は 2% 程度に減っている。本測定は光陰極成膜の 7 ヶ月後に行ったものである。QE の劣化が暗寿命によるものか、ビームラインの真空度が悪化したことによるものか未調査である。ビームロスも大きかったため、ビームダンプに全量運んでいるかについても不明である。

4.3mA ビーム生成に成功後、電子銃実験室の放射線モニタ値を減らすようにビーム軌道調整を行った。すると、急に電子銃の真空度が 10^{-9}Pa 台から 1Pa に劣化し、インターロックが働いた。詳しく調査したところ、電子銃アノード電極直後のペローズに穴が開いていることがわかった。レーザーパワー 500mW で比較したところ、ビーム調整前後でビームダンプ電流に 0.7mA もの違いがあったことが判明した。

0.7mA のビームがダンプまで運ばれず、どこかで失われていた可能性がある。かなりの量のビームがペローズに当たり、穴があいたものと思われる。

3. まとめ

我々はマルチアルカリ光陰極成膜装置を用いた大電流ビーム生成用光陰極電子銃装置を開発している。 532nm レーザーに対して $\text{QE}=5.8\%$ を持つ Cs_3Sb 光陰極を成膜し、電子銃のカソード電極に取り付け、 500mW のレーザーを用いて 4.3mA の電子ビーム生成に成功した。大電流生成試験のために新設した、放射線遮蔽、ビームダンプ冷却装置、ビームエキスパンダーなどの装置健全性を確認した。真空事故のため、現在は運転を停止しているが、真空作業、ベーキング、高電圧印加試験、光陰極の再活性化などに徐々に取り組みつつある。高い QE を持つ光陰極の成膜の再現性や、 mA 級の大電流ビーム生成は、世界的に注目を集めているため、装置の再立ち上げは重要である。今回のような真空事故を起こさないための、ビームプロファイルモニターを電子銃直後にインストールすることを計画している。既にインストール済みの回折格子を用いた、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 の成果である。

参考文献

- [1] N. Nakamura *et al.*, "S2E Simulation of an ERL-Based High-Power EUV-FEL Source for Lithography", in Proc. of IPAC2017, p. 894-897, MOPVA020, Copenhagen, Denmark, 2017.
- [2] J. Gardelle *et al.*, Phys. Rev. STAB 12, (2012) 110701.
- [3] D. H. Dowell *et al.*, Appl. Phys. Lett. 63 (1993) 2035.
- [4] G. R. Neil *et al.*, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 662.

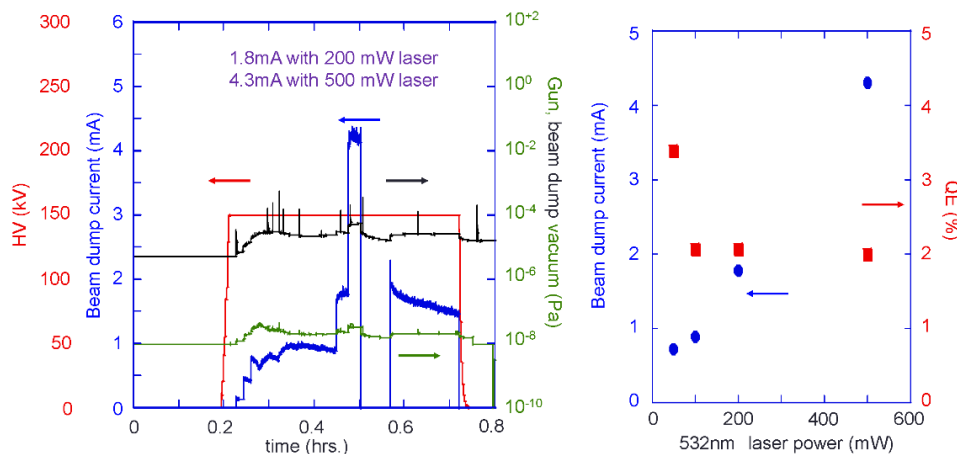


Figure 3: The left shows beam dump current (blue curve), HV (red curve), gun vacuum (green curve) and beam dump vacuum (black curve). The right shows beam dump current (blue circles) and QE (red squares) as a function of laser power at 532nm . The maximum laser power used for the present measurement is 3W .

- [5] C. Hernandez-Garcia *et al.*, “A High Average Current DC GaAs Photocathode Gun for ERLs and FELs”, in Proc. of PAC2005, p. 3117-3119, Knoxville, Tennessee, 2005.
- [6] B. Dunham *et al.*, Appl. Phys. Lett. 102 (2013) 034105.
- [7] L. Cultera *et al.*, Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 103504.
- [8] R. R. Mammei *et al.*, Phys. Rev. STAB 16 (2013) 033401.
- [9] T. Rao *et al.*, “Multialkali cathode for high current electron injector- Fabrication, Installation and Testing”, presented in ERL2017, MOIBCC004_TALK.pptx, CERN, Switzerland (2017).
- [10] 栗木雅夫 他、「二成分モデルによる CsK₂Sb フォトカソードの耐久性についての研究」、第 13 回加速器学会、TUP045, 959 (2016).
- [11] 小野央也 他、「高周波電子銃用 CsK₂Sb フォトカソードの開発」、第 13 回加速器学会、MOP045, 458 (2016).
- [12] 稲垣瞭 他、「背面照射型透明超伝導マルチアルカリフォトカソードの初期エミッタンス測定」、第 11 回加速器学会、SAP031, 536 (2014).
- [13] 中園祥央 他、「カートリッジ型高周波電子銃アンチモン系光陰極の性能向上」、第 7 回加速器学会、THSH06, 240 (2010).
- [14] 西森信行 他、「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」、第 13 回加速器学会、MOP047, 464 (2016).
- [15] 西谷智博 他、「NEA-GaAs フォトカソードを用いた原研 200kV 電子銃の開発」、第 1 回加速器学会、380 (2004).
- [16] 永井良治 他、「ERL 放射光源のためのロードロック型電子銃の設計」、第 3 回加速器学会、559 (2006).
- [17] R. Nagai *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 83 (2012) 123303.
- [18] 西森信行 他、「250kV 光陰極電子銃の開発」、第 12 回加速器学会、WEP036, 508 (2015).