

## CsK<sub>2</sub>Sb 光陰極の電子引き出し寿命に関する研究

### A LIFETIME STUDY OF CSK<sub>2</sub>SB PHOTOCATHODE

山本 記史, 栗木 雅夫, 郭 磊  
Norihito Yamamoto, Masao Kuriki, Lei Guo  
Hiroshima Univ. Adsm

#### Abstract

We report a study of CsK<sub>2</sub>Sb photocathode in Hiroshima University. High brightness electron source is one of the key components in advanced electron accelerators. For example, a future light source based on Energy Recovery Linac (ERL) requires high average current electron beam in a range of 10 - 100mA with an extremely low emittance down to 0.1mm.mrad. A photocathode electron injector is expected to fill these requirements because of their superior performances over other technologies. A photo-cathode material with high robustness, high QE, and driven by visible or IR light is strongly desirable. CsK<sub>2</sub>Sb multi-alkali photocathode is one of the candidates to satisfy these requirements. A new system to study CsK<sub>2</sub>Sb was developed and the cathode was successfully produced. The 1/e lifetime regarding to extracted charge density was 255C/mm<sup>2</sup>. The 1/e lifetime without beam emission is immeasurably large. In this article, the cathode evaporation system is explained and these results are presented.

#### 1. はじめに

高輝度電子源の開発が急がれている。ERL や ILC などの先進型の加速器において電子源に対して非常に高い性能が要求されており、例えば ERL では電子源は 0.1mmrad 以下という極低エミッタンスで平均電流 10~100mA といった大電流が要求される [1]。光陰極電子源は低エミッタンス、短パルスなどの高い性能を有しており、これら先進型の加速器の要求にも応えることができると期待されているが、一方で大電流引き出しと耐久性の両立といった課題も残っている。

光陰極電子源のカソードとしてはいくつかの候補がある。NEA-GaAs カソードと呼ばれるカソードは、赤色光で高い量子効率をもち大電流発生が可能である。しかしカソード耐久性が低く、100mA クラスの引出電流に対して短時間で電子引き出し能力を失ってしまい運転に耐え得ない。Cu 等の金属系カソードは耐久性の問題はないが、量子効率が低く、励起には紫外光が必要なため、大電流を引き出すことが困難である。

近年 CsK<sub>2</sub>Sb をはじめとするマルチアルカリカソードが高量子効率、高耐久のカソードとして注目されている。10% 近くの高い量子効率を緑色光で引き出すことが可能であるため、Nd:YAG レーザーなどの個体レーザーの 2 倍波を利用することが可能であり、レーザー技術への負担が少なく大電流を引き出すことができる。最近ではアメリカのコーネル大学で 65 mA の電流を引き出すことに成功し、さらには量子効率が 1/e に減少するまでに 30 時間もの寿命

が見込まれると報告された。 [2]

広島大学ではこの CsK<sub>2</sub>Sb カソードの研究および生成技術の確立のため、専用の実験装置を構築し実験を行っている。本稿では生成した CsK<sub>2</sub>Sb カソードからビーム引き出しを行い、カソードの寿命特性について報告をする。

#### 2. 試験装置の概要

我々はマルチアルカリカソードの研究を行うために新たに実験装置を開発した。この装置はカソードの生成を行うとともに、電子引き出し実験や寿命の測定を行うことができる。装置はカソードを生成する基板、カソード材料の蒸着源、蒸着量測定用の膜厚計等で構成されている。

カソードの生成は、Sb、K、Cs を真空中で基板に蒸着することで行う。この時の蒸着量や基板温度が量子効率などのカソードの性能に大きく影響する [3]。そのためこの装置には温度測定のために基板側面に熱電対を取り付け、蒸着量の制御のために膜厚計も搭載している。膜厚計は Fig. 1 に示す通り蒸着源に対してカソード基板と対称な位置に設置しており、さらに蒸着源はカソード基板と膜厚計に対して対称に蒸着させるような構造とした。これによりカソード基板上の蒸着量と膜厚計上の蒸着量を等しいとして、基板上の蒸着量をリアルタイムで知ることができる。また、蒸着源は可動式になっており、各種材料金属の蒸着時にはそれぞれの蒸着源を基板の正面に配置して蒸着する。

電子の引き出しの測定には 473 nm の青色レーザーを使用した。蒸着の際はレーザー光の導入経路を

基板に対して垂直から 60 度の角度としている。これは光路が膜厚計等と干渉することを避けるため、これにより膜厚の測定と光電流の測定を同時に行える。蒸着後は蒸着源と膜厚計の位置を調整することでカソード正面からのレーザー入射も行える。

CsK<sub>2</sub>Sb カソード生成、電子引き出しの際には超高真空が必要とされる。排気にはイオンポンプを使用しており、真空圧力は約  $2 \times 10^{-8}$  Pa である。蒸着の際は蒸着源からの蒸気により、真空度が上昇し、 $5 \times 10^{-7}$  Pa 程度になる。

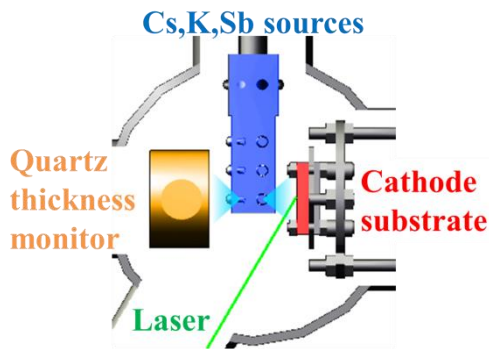


Figure 1: A schematic view of the evaporation system. A cathode substrate and a thickness monitor are placed symmetrically from the evaporation sources. The evaporation source mount is movable to evaporate each source at center of the cathode substrate.

### 3. カソード生成実験

カソードの生成は基板上に Sb、K、Cs を順番に蒸着していくことで行った。今回の実験に使用したカソードの生成手順及び条件を以下に示す。

- 1) 基板を 600°C で加熱洗浄する。その後 100°C まで温度を下げ、蒸着中はこの温度で一定に保つ。
- 2) Sb 蒸着 蒸着膜厚 103 Å
- 3) K 蒸着 蒸着膜厚 331 Å
- 4) Cs 蒸着 光電流がピークに達するまで蒸着。蒸着膜厚は 777 Å であった。
- 5) 基板温度を室温に戻す。

この蒸着条件は文献 [4] [5] [6] を参考にしている。

今回生成したカソードの蒸着中の量子効率の変化を Fig. 2 に示した。縦軸左が量子効率で、縦軸右が膜厚計により取得した材料金属それぞれの膜厚である。横軸は時間である。

量子効率は K 蒸着中に上昇し始め、Cs 蒸着時に大きく増加し、最大で約 0.9% になった。ただし、量子効率はカソード位置によって異なる [7] ため、カソードを生成した後に改めてレーザー照射位置を変えることで量子効率が高い箇所を探索した。結果、最大の量子効率は 3.2% であった。以後の電子引き出しはこのレーザー照射位置で行うこととした。

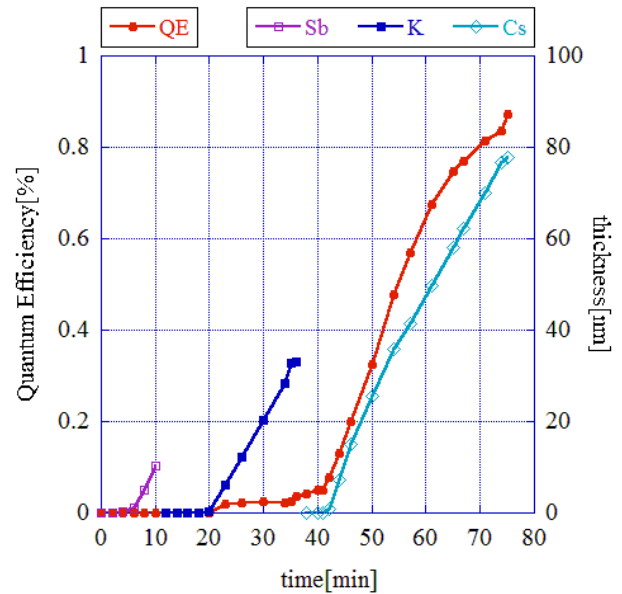


Figure 2: QE and thickness evolutions are shown. Thickness is for each material (not total).

### 4. 寿命測定

現象論的に、カソード寿命は時間のみによるものと、引出電荷量、あるいは引出電荷密度によるものがある。前者を時間寿命（あるいはダーク寿命）、後者を電荷量寿命（あるいはビーム寿命）と呼ぶ。これまでの測定から、本カソードでは時間寿命は少なくとも数千時間以上あり、必要とされるビーム電流を勘案した際の電荷密度寿命と比較して、ほぼその効果を見捨てる事が分かっている [7]。そこで、以下は電荷密度寿命のみについて考察する。

カソード蒸着生成の後、レーザーを照射し続け、量子効率の時間変化を観測した。電子引出実験を約 170 時間継続し、この間の電流値は約  $60 \mu\text{A}$  であった。レーザーパワーを一定としているため、この値は量子効率により変動する。電子引き出しに使用したレーザーは蒸着時と同様に 473nm の青色レーザーであり、レーザーパワーは 5.1mW、スポットサイズは  $2\sigma$  で  $0.41\text{mm}^2$  である。

得られた電流値から求めた引き出し電荷量と量子効率の関係を Fig. 3 に示す。横軸は積算電荷量であり、縦軸は量子効率である。

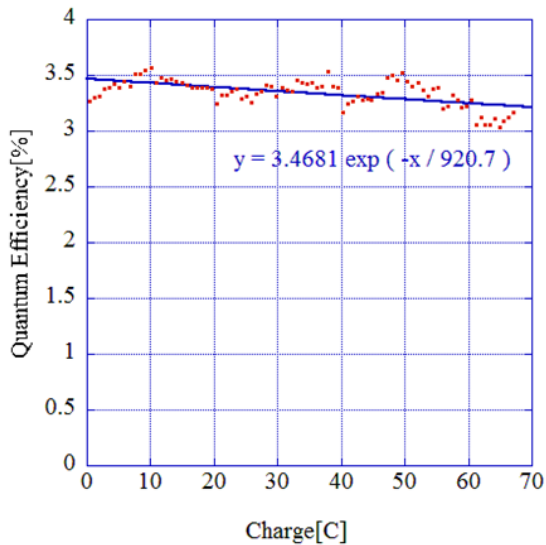


Figure 3: QE evolution as a function of extracted charge.

電荷密度寿命は電子引き出しにより量子効率が  $1/e$  になる電荷密度であり、以下の式で定義される。

$$\eta(\rho) = \eta_0 e^{-\frac{\rho}{\theta}} \quad (1)$$

ここで  $\eta$ 、 $\eta_0$  は量子効率とその初期値、 $\rho$  は引き出した電荷密度、 $\theta$  は電荷密度寿命である。得られたグラフから電荷量寿命を求めると 921C であり、レーザースポット径から単位面積当たりの電荷量を求めると  $2250\text{C}/\text{mm}^2$  であった。これは例として ERL 実証機に必要なとされる電子銃の平均電流値 10mA で考えると約 60 時間、ERL 実機で必要とされる 100mA で考えると 6 時間に相当する。仮にこの寿命の二倍までレーザーパワーのマージンなどを利用し運転が可能と仮定すると、現状では ERL 実機での実働は難しいが、ERL 実証機では十分に実用に耐えうると評価できる。今後、蒸着条件の最適化や、真空の向上などにより、性能改善が見込めることからさらなる長寿命化ができるのではないかと考えている。

## 5. まとめ

我々は CsK<sub>2</sub>Sb 光陰極の特性を調べることを目的として専用の実験装置を作製し、カソードの生成及び電子引き出し実験を行った。カソード生成後、青色レーザーを用いた電子引き出し実験をおこない、そこから電荷密度寿命を推定したところ  $2250\text{C}/\text{mm}^2$  と非常に長い寿命を得た。今後は生成時の蒸着膜厚、基板温度を変えることで、量子効率や引き出し電荷量寿命への影響を調べ、より高性能なカソードとなるような最適な蒸着条件を探していきたい。

## 6. 謝辞

本研究の一部は、KEK 大学等連携支援事業、科研費基盤 C (25390126) および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 線源イメージング基盤技術開発」により行われた。

## 参考文献

- [1] Design Study of Compact ERL, KEK-Report 2007-7 (2007).
- [2] B. Dunhum et al., Appl. Phys. Lett. 102, 034105(2013)
- [3] R.L. Ternes et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A318 (1992) 401-409
- [4] D.H. Dowell, et al., Nucl. Instrum. Methodes Phys. Res. A 356, page167-176 (1995).
- [5] L. Cultrera, et al., proc. of Particle Accelerator Conference (PAC'11), wep244(2011).
- [6] J. L. McCarter, et al., proc. of Particle Accelerator Conference (PAC'11), wep284 (2011).
- [7] M.Kuriki et al., proc. of IPAC2013, MOPFI013(2013)