

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 A STUDY OF ROBUSTNESS OF CSK₂SB PHOTO-CATHODE WITH TWO COMPONENT MODEL

栗木雅夫^{#, A)}, 横田温貴^{A)}, 根岸健太郎^{*, A)}, 浦野正洋^{A)}, 清宮裕史^{B)}
Masao Kuriki^{#, A)}, Atsuki Yokota^{A)}, Kentaro Negishi^{A)}, Masahiro Urano^{A)}, Yuji Seimiya^{B)}
^{A)} Hiroshima University / Advanced Science of Matter ^{B)} KEK, Accelerator Lab.

Abstract

Future accelerator projects based on linear accelerator extends our study area in sciences and applications. Photo-cathode is one of the most important subsystems in the advanced linear accelerator, because the accelerator performance strongly depends on the initial beam quality. By the latest technology of the laser and photo-cathode, a high performance electron beam can be provided. In applications requiring a high intensity electron beam, the cathode robustness can be a serious issue. In this article, robustness of CsK₂Sb photo-cathode was studied experimentally. We found that this cathode have more than 1000 hours 1/e life. The cathode is robust enough for practical applications.

1. 序論

近年、国際リニアコライダー(ILC)[1] やFEL[2], ERL[3]のような線形加速器をベースとした次世代加速器の研究開発が積極的に行われている。これらの線形加速器では従来の蓄積リング型の加速器では実現できなかった高性能なビームを実現することができる。一方で、線形加速器におけるビーム性能は初期ビームに強く依存し、かつビーム電流と加速電流が等しいため、電子源から高品質のビームを大量に供給する必要がある。たとえば、FEL[2]やERL[3]においては、従来の放射光源における電子銃よりも、二桁から三桁小さいエミッタンスを要求される。リニアコライダーにおいては、スピン偏極した電子ビームが大きな役割を果たす。そこで、これらの先進加速器の要求を実現する電子源としてフォトカソード電子銃が期待されている。

フォトカソード電子銃はレーザー光による光電効果によって電子ビームを生成する電子銃である。この電子銃は、電子ビーム形状の高い操作性から、低エミッタンス、短パルスの電子ビームを実現可能である。しかし、電子引き出しによるカソード表面の劣化や、大電流の発生が課題となっている。カソードの性能を表す数値として、量子効率(入射光子数に対する放出された電子の数の比: Quantum Efficiency, QE)を用いる。フォトカソードの一種であるNEA(Negative Electron Affinity)-GaAsカソードは、QEが10%程度と高く、スピン偏極が可能で、赤色光での励起が可能など優れた特性を持つが、NEA表面の耐久性が低いのが課題である[4]。一方、CuやMgなどの金属カソードは耐久性が高いが、QEが10⁻⁴以下と低く、紫外光での電子励起が必要であり、大電流の発生は難しい。

そこで近年注目されているのが、2種類以上のアルカリ金属を用いたマルチアルカリフォトカソードである。マルチアルカリフォトカソードは、波長が500 nm 帯の緑色光で電子発生が可能で、QEが10%程度と高い。加えて半導体カソードの中では比較的耐久性が高い[5]。このような特性から、大電流生成が必要な、FELやERLのような線形加速器による次世代放射光源、小型線形加速器によるレーザーコンプトン散乱による準単色X線源等の先進的線形加速器における加速器の電子源として期待されている。しかしマルチアルカリフォトカソードは、光電子増倍管などの光電面として実用化されているが、加速器用電子源としての実績は乏しい。広島大学では、マルチアルカリカソードの中でも比較的QEが高いとされているCsK₂Sbカソードの蒸着装置を構築し[5]、カソード生成および特性評価を行っている。本稿ではカソード生成実験および電子引き出しによるカソード劣化の寿命測定実験についての結果と考察を記述する。

2. 実験方法

マルチアルカリ試験装置

本章では広島大学のマルチアルカリ試験装置の説明を行う。試験装置は電解研磨されたSUSで構成されている。装置内はNEGポンプとイオンポンプを使用することで10⁻⁹ Pa台の極高真空を実現している。Figure 1は試験装置内の蒸着システムの概念図を示している[5]。カソードは31 mm×31 mmのSUS304基板に蒸着する。このカソード基板は、セラミックヒーターを備え付けたカソードフォルダーに固定されている。カソードを蒸着する前にはこのヒーターを用いて基板の加熱洗浄(600度C)と温度制御(100度程度C)を行う。またこのフォルダーには光電効果による電流値を測定できるように、バイアス電圧を引加できるようにしており、実験時の典型的な引加電

[#] mkuriki@hiroshima-u.ac.jp

* 現在の所属:岩手大学理工学部

圧は-100 [V]である。Figure 1の中央にある蒸着源を加熱することで各金属を蒸着することができる。この蒸着源を中心に、カソード基板と水晶振動子膜厚計が対称に装着されている。これは膜厚計とカソード基板に対称に成膜させることで、基板上的膜厚を推計するためである。蒸着源は図中での上下方向への移動機構を備えており、各々の金属の蒸着源がカソードの正面になるように移動する。Figure 1のように光導入用ビューポートからレーザー光を導入することで、蒸着中もQEを測定することが可能である。

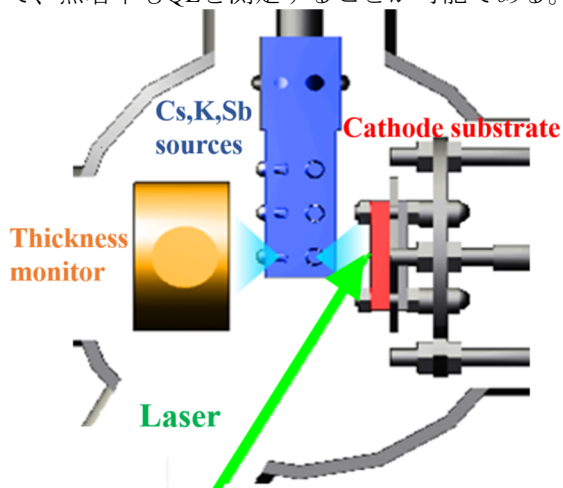


Figure 1: Layout of the evaporation chamber. The evaporation head generates metal vapor symmetrically to the quartz thickness monitor and the SUS substrate.

量子効率の二次元マップ

本研究ではマルチアルカリフォトカソードの寿命測定を行うために、カソード基板上的QEの二次元マップを長期間にわたり測定した。この測定を行うため、次のような手順でデータ計測を繰り返すシステムを構築した。QE測定を行うための光学系は、レーザーの二波長切替、および照射位置の自動制御が可能である。PCからこのレーザーシステム制御を含め、光電流、実験環境であるカソード基板温度、真空度などのデータ取り込みを行うシステムを作成した。二つの波長（532nm および405nm）のレーザーでカソード基板上を3mm間隔で二次元的にスキャンし、同時にカソード上での光電流値を計測することでQEの二次元分布を取得する。それらのデータを取得後、405nmレーザーを特定のスポットに連続的に照射することで電荷を引き出す。以上のプロセスをおよそ2時間おきに繰り返すことで、引き出し電流密度の異なる条件でのQEの時間変化を求め、カソードの寿命を測定する。

3. 実験結果と考察

CsK₂Sb 蒸着実験

マルチアルカリカソードの生成は基板の上に3種類の材料金属（Sb,K,Cs）を順番に蒸着することで行った。本実験では先行研究[6][7][8]にならい、Sb,K,Csの順番で蒸着を行い、CsK₂Sbカソードの生成を試みた。蒸着の典型的な手順を以下に示す。

1. 基板を600℃で1時間加熱洗浄する。その後、温度を100℃まで下げて蒸着中温度を一定に保つ。
2. 所定の膜厚までSbを蒸着する。
3. 所定の膜厚までKを蒸着する。
4. QEが最大となるまでCsを蒸着する。
5. 基板温度を室温まで下げる。

Figure 2は蒸着中のQEの時間変化を波長405nmのレーザーで測定した一例である。QEはK蒸着中から徐々に観測され始め、Csを蒸着することで大幅に上昇する。以下の例では、蒸着完了直後のQEは、11.6%まで上昇した。

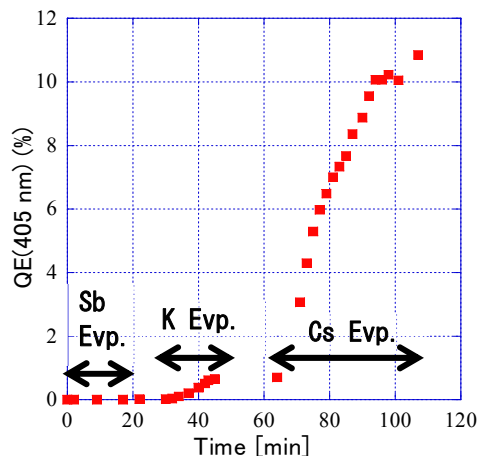


Figure 2: QE evolution during the evaporation process. Sb, K, and Cs was evaporated on SUS substrate in this order. QE measured by 405 nm laser was launched during K evaporation and much enhanced in Cs evaporation.

寿命測定

加速器での電子源としての性能を評価するために、カソードの寿命を測定することは重要である。特に、ERLのように~100 mAの引き出し電流で運転する高輝度放射光源では、電子源の寿命は加速器の運転において重要になる。本研究では、実験解析のために現象論的にカソード劣化の定式化を試みることにする。本研究では、QEの劣化には時間に依るものと、引き出し電荷密度に依るものがあると仮定し、前者を時間寿命、後者を電荷密度寿命と呼ぶことにする。これら二つの成分によるカソードのQE劣化のモデルを二成分モデルと呼ぶことにする。QE $\eta(t)$ の時間変化は以下のように表現される。

$$\eta(t, \rho) = \eta_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \exp\left(-\frac{\rho}{\Theta}\right) \quad (1)$$

$$\tau = \frac{C}{P} \quad (2)$$

ここで、 η_0 は初期QE、 t は時間(sec)、 τ は時間寿命(sec)、 ρ は引き出し電荷密度(C/m²)、 Θ は電荷密度寿命(C/m²)である。レーザーを連続照射した場所を除くと、引き出し電荷密度は過去の電荷密度寿命に比べて無視できるため、QEの劣化は時間に依る劣化だけとなる[9]。Figure 3は波長405 nmのレーザーで測定した、カソード基板上のいくつかの点の量子効率の時間変化を表している。カソードの有効領域として、初期量子効率が10%以上の点を用いた。カソードの平均的な時間寿命 τ を見積もった結果として、 $6200 \pm 1700(\text{sys}) \pm 400(\text{stat})$ 時間(405 nmのレーザーで測定)、 $2200 \pm 400(\text{sys}) \pm 300(\text{stat})$ 時間(532 nmのレーザーで測定)という値を得た。この測定での平均的な真空度の値は 2.5×10^{-8} Paであった。Sysは系統誤差であり、測定点ごとの τ のばらつきから求めた。Statは統計誤差を表している。

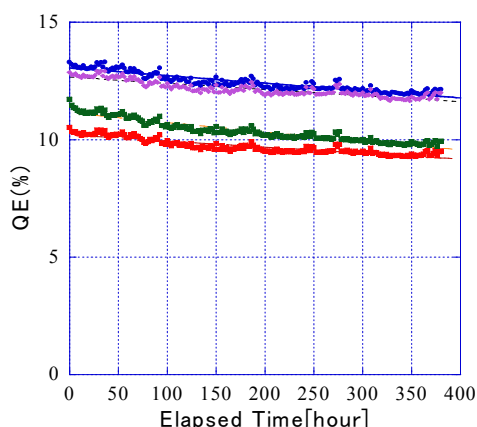


Figure 3: QE evolution of the cathode where the extracted charge density is negligible. Data of typical four positions are shown. By fitting these data to the formula, we evaluated the temporal lifetime.

時間寿命の真空圧力依存性

時間寿命 τ と真空圧力の依存関係について調べた。 τ の劣化の原因が、真空中の残留ガスのカソード表面への吸着であり、かつ圧力の1次で効いてくるとすると、 τ は真空圧力に逆比例する。この仮定を実験的に確かめるために、イオンポンプを停止するなどして、真空圧力を変化させて τ を測定した。Figure 4は、測定中の平均真空圧力と τ の関係について表したグラフである。グラフ中の青色のデータ点と緑色のデータ点は、波長405 nmのレーザーと532 nmのレーザーでの測定結果である。Figure 4中の実線及び点破線は、理論式

による405nm及び532nmレーザーのデータに対する回帰曲線である。ここで、 C は比例定数(sec.Pa)、 P は真空圧力(Pa)である。概ね、理論式はデータをよく表しているが、いくつかのデータ点がずれている。通常は同一の基板に加熱洗浄を行った上で、繰り返し蒸着をおこないカソードを生成しているが、Figure 4の一連のデータの取得の途中にカソード基板を新しいものに交換している。この影響を調べるために、データを時系列で並べたものをFigure 5にしめす。横軸はデータを測定した順番を、縦軸は τ の真空圧力依存性を調べるために、 $\tau \times$ 真空圧力の値、すなわち圧力依存性が同一の定数 C で式(2)に従う場合、圧力が変化しても同じ値となる数値を表している。グラフ中の青色のデータ点と緑色のデータ点は、波長405 nmのレーザーと532 nmのレーザーでそれぞれ測定したデータ点である。この実験の際、2回目の測定の後、カソード基板(SUS)を新しい物に取り換えた。3回目の測定と4回目の測定では、他の測定点に比べて $\tau \times$ 真空圧力の値が著しく低いという結果になった。しかし、5回目の測定以降では、この $\tau \times$ 真空圧力の値が、2回目の測定以前の値と一致する結果となった。この結果から、交換した直後の清浄な基板では、 $\tau \times$ 真空圧力の値が違うふるまいを示すことが判明した。また、2回目の測定終了後、装置を大気開放して基板を交換したため、真空容器内の分圧状況に変化が生じたため、このような結果が得られた可能性もある。つまり、カソードの劣化への寄与はガス分子に依存し、その分圧比が変化することで不整合が生じたと推測する。今後、QMS (Quadruple Mass Spectrometer)を使用して、真空中の分圧を調べていく予定である。

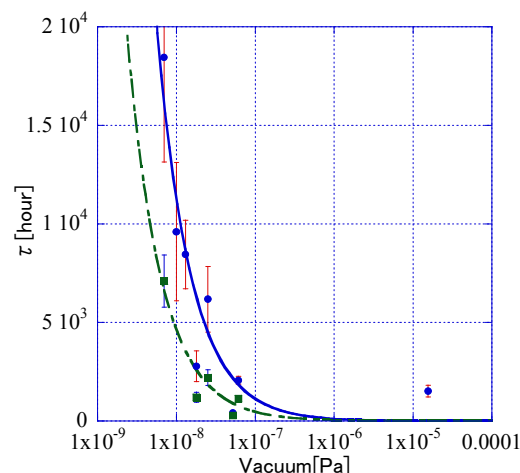


Figure 4: The temporal lifetime of the cathode as a function of vacuum pressure.

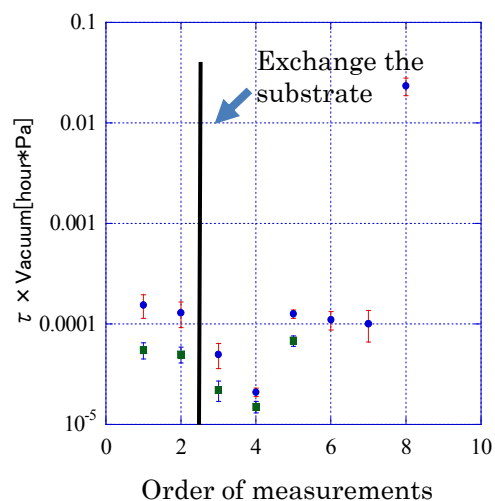


Figure 5: The normalized temporal lifetime in order of the measurements. Blue solid circle and green solid square show that measured with 405 nm and 532 nm lasers.

4. 結論

広島大学では、CsK₂Sbマルチアルカリフォトカソード試験装置を開発し、カソード蒸着生成および寿命測定を行った。波長405 nmのレーザーで測定した場合、最大QEは12%、波長532 nmのレーザーで測定した場合、QEは3%程度のカソードの生成するレシポを確立した。生成したCsK₂Sbカソードは、時間寿命にして数千時間の寿命があることが判明し、従来の加速器では実用に耐えうることが分かった。また本研究から、カソードの時間寿命が真空圧力に逆比例することが分かった。カソード基板の状態の影響や、真空中の残留ガス分圧がカソード寿命へ影響を及ぼしていることが示唆される。

電荷密度寿命については、時間寿命とは異なり、独立に測定することが困難であり、測定データには二つの成分による劣化が含まれる。今後、電荷密度寿命の測定に向けて実験、解析を進めていく。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report, KEK Report 2013-1 (2013).
- [2] The Technical Design Report (TDR) of the European XFEL (2007).
- [3] Design Study of Compact ERL, KEK-Report 2007-7 (2007).
- [4] M. Kuriki *et al.*, NIM A637, pp. 87-90 (2011).
- [5] M. Kuriki *et al.*, Proc. of IPAC2016, THPOW006, Busan, Korea (2016).
- [6] D.H. Dowell *et al.*, Nucl. Instrum. Methodes Phys. Res. A 356, page167-176 (1995).
- [7] L. Cultrera, et al., proc. of Particle Accelerator Conference (PAC'11), WEP244 (2011).
- [8] J. L. McCarter *et al.*, proc. of Particle Accelerator Conference (PAC'11), wep284 (2011).
- [9] M. Kuriki *et al.*, proc. of IPAC2013, MOPFI013 (2013).