

保護膜コーティングによる高周波電子銃用 Cs-Te フォトカソードの 高耐久化に関する研究

STUDY ON DURABILITY IMPROVEMENT OF Cs-Te PHOTOCATHODE FOR RF-GUN BY PROTECTIVE FILM COATING

福岡凜大^{#, A)}, 江澤健太郎^{A)}, 小柴裕也^{A)}, 鷲尾方一^{A)}, 坂上和之^{B)}

Rinto Fukuoka^{#, A)}, Kentaro Ezawa^{A)}, Yuya Koshiba^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}

^{A)} Waseda Research Institute for Science and Engineering

^{B)} Photon Science Center of the University of Tokyo

Abstract

We have been conducting research on Cs-Te photocathode for the generation of high-quality electron beams by radio-frequency electron guns (RF-guns). Its performance is evaluated by quantum efficiency (Q.E.) and 1/e lifetime. Generally Speaking, Cs-Te have both high quantum efficiency (~10%) and relatively long lifetime (2 to 3 months). However, it is known that the Q.E. of Cs-Te photocathodes is significantly reduced when exposed to gas molecules especially oxygen. In order to solve this problem, in this study, Cs-Te photocathode was coated with a CsBr or CsI protective film for the purpose of extending the lifetime and durability of the photocathode. Oxygen gas was exposed and evaluated for the purpose of optimizing the coating film thickness. In order to evaluate the relationship between the lifetime of the photocathode and the thickness of the protective film, the lifetime (L_0 : lifetime due to the amount of exposure) was calculated from the relationship between the amount of exposure and the change in Q.E. in order to perform a more quantitative evaluation without depending on the pressure change during the exposure to oxygen gas. In this presentation, we report on the film thickness dependence of CsBr and CsI protective films and the improvement of oxygen gas resistance by coating.

1. はじめに

早稲田大学鷲尾研究室では、高周波電子銃 (RF-gun) を用いた高品質ビーム生成に関する基礎・応用研究を行っている。中でも、半導体フォトカソードは加速器内において、電子源として活用されている。フォトカソードに励起光を入射させることで、光電効果により物質内の電子を取り出し、電子ビームを生成している。当研究室では Cs-Te という半導体物質を使って、フォトカソードを作成しており、その性能は以下の 2 点により評価している。1 点目は、入射光子数から放出電子数への変換効率である「量子効率 (Q.E.: Quantum Efficiency)」、2 点目は、Q.E. の初期値が 1/e 倍になるまでの時間で定義される「1/e 寿命」である。Cs-Te は、5~10% の高い Q.E.、かつ 2~3 ヶ月の比較的長い 1/e 寿命を誇る半導体フォトカソードであるため、世界中で研究が行われている。高い Q.E. を持つフォトカソードの利点としては、レーザー系への負担軽減や生成される電子ビームの電荷量増加に繋がる。しかし、フォトカソードは装置内に残存する気体分子が吸着すると、その性能が劣化してしまう。特に、Cs-Te は酸素ガスに弱いことが知られている[1]。このような課題を解決すべく、長寿命・高耐久なフォトカソードの開発を目的として、アルカリハライド保護膜 (CsBr や CsI) をコーティングする実験を行った。また、コーティングした保護膜厚の最適化を目的に、酸素ガスを暴露し、評価を行った。なお、フォトカソードの寿命と保護膜厚の関係を評価するにあたり、酸素ガス暴露中の圧力変化に依らずより定量的な評価を行うために、暴露量と Q.E. 変化の関

係から寿命 (L_0 : 暴露量による寿命) を算出した。本発表では、CsBr や CsI 保護膜の膜厚依存性、及びコーティングによる酸素ガス耐性の向上に関して報告する。

2. 実験

2.1 実験セットアップ

図 1 に蒸着チャンバーの写真を示す。この中で、Cs-Te フォトカソードの作成・保護膜コーティング・酸素ガス暴露実験を行った。2 台のターボ分子ポンプ (PFEIFFER 社: HiPace® 300 DN 100 CF-F、EDWARDS 社: STP-301)、ドライルーツポンプ (Kashiyama 社: NeoDry30E)、2 台の NEG ポンプ (SAES Getters 社: CapaciTorr®)、スパッタイオンポンプ (ULVAC 社: PST-100CX) を使用することで、蒸着チャンバー内は超高真空に保たれている。また、その装置内の圧力測定には、ベヤード・アルパート型真空計 (キヤノンアネルバ社: M-922HG) を用いている。具体的な圧力値としては、Cs-Te 蒸着前が 5×10^{-8} Pa 程度、Cs-Te 蒸着中・保護膜コーティング中が $10^{-7} \sim 10^{-6}$ Pa 程度、酸素ガス暴露中が 1×10^{-5} Pa 程度である。

[#] rinchan.00722@ruri.waseda.jp



Figure 1: Picture of the evaporation chamber.

図2は蒸着源ホルダー(ESH)の図である。このESHには、クロム酸化物との還元反応の原理を用いているCsディスペンサー(SAES Getters社)と、タングステンバスケットの中にはTe(Nilaco社)、CsBr(Pier Optics社)、CsI(Pier Optics社)の結晶が取り付けられている。また、実験中のこれらの蒸着源の蒸着速度や蒸着膜厚は、水晶振動子マイクロバランス(QCM)によってリアルタイムで測定することができる。

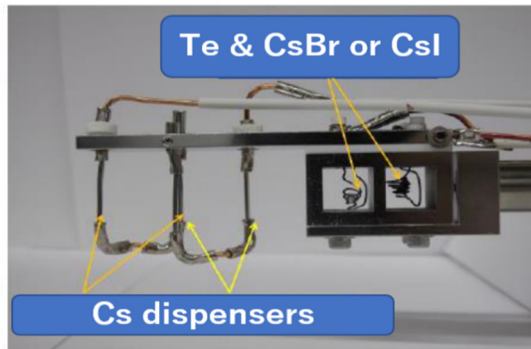


Figure 2: Picture of the evaporation source holder.

本研究では、エタノールと超音波洗浄により表面処理を行ったMo基板上に、逐次蒸着によってCs-Teを作成した。実験中のQ.E.測定は、入射光のエネルギーと光電流を測定することで算出している。入射光としては、波長:265 nmのUV-LED(DOWA社:DF7VL-1H321)、光電流の測定には、電流計(ADCMT社:6243 DC Voltage/Current Monitor)を使用している。また、測定したい電流値からバックグラウンド除去を行うためにメカニカルシャッター(駿河精機社:F116)を用いて、一定間隔で入射光を遮断している。ここで、Q.E.の定義式は以下のように表される。

$$Q.E. [\%] = \frac{\text{放出電子数}}{\text{入射光子数}} \times 100 = \frac{100h\nu I}{eW} \times 100 \quad (1)$$

(1)式において、 I :光電流[A]、 h :プランク定数[J·s]、 ν :振動数[1/s]、 e :電子素量[C]、 W :照射光のエネル

ギー[J]とする。

2.2 実験手順

本研究では、以下のような手順で実験を行った。

- (i)Mo 基板上に Cs-Te フォトカソード作成
- (ii)アルカリハライド保護膜(CsBr or CsI)コーティング
- (iii)酸素ガス暴露(Q.E.測定)
- (iv)Q.E.一暴露量プロット作成
- (v)フィッティングにより L_0 算出
- (vi)保護膜厚と寿命 L_0 の関係性を評価

詳細な実験条件としては、Teを20 nm蒸着した後に、Q.E.がピーク値の60~80%に減少するまでCsを蒸着した。また、コーティングするアルカリハライド保護膜の厚みはCsBr/CsIのどちらも0、5、10、20、25、30 nmであった。

本研究では、酸素ガス暴露中の圧力変化に依らずより定量的な評価を行うために、暴露量(ラングミュア)とQ.E.変化の関係から寿命 L_0 を算出する。気体分子付着によるフォトカソードのQ.E.劣化モデルは、次の式で表される[2]。

$$\alpha = \alpha_0 \times \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) \quad (2)$$

(2)式において、 α :Q.E.の測定値、 α_0 :Q.E.の初期値、 L :暴露量[ラングミュア]、 L_0 :暴露量で決まる寿命とする。Q.E.低下は時間経過と真空度の双方に依存するため、それらを統合的に議論するために以下の式で定義されるラングミュアという単位を使用する。

$$L = P[\text{Pa}] \times 133 \times 10^{-6} \times t[\text{sec}] \quad (3)$$

また、保護膜コーティング中のフィッティング関数として、以下の式を用いた。

$$\alpha = A \exp\left(-\frac{x}{L_1}\right) + B \exp\left(-\frac{x}{L_2}\right) \quad (4)$$

(5)式において、 x :保護膜厚、 A, B, L_1, L_2 :フィッティングパラメータとする。ただし、

$$L_1 < L_2 \quad (5)$$

である。

3. 結果と考察

3.1 保護膜厚と寿命 L_0 の関係

図3は、暴露量による寿命 L_0 とアルカリハライド保護膜厚の関係を示している。この結果から、CsBr/CsIどちらの場合も、寿命 L_0 は0~20 nmの間で増加し、20 nmを超えると減少することが判明した。これらの原因として、寿命の増加はCs-Teフォトカソードと酸素ガスの相互作用が低下したため、寿命の減少はカソードや保護膜内で散乱される電子数が増加したためであると考えられる。従って、アルカリハライド保護膜を約20 nmコーティングすることで、Cs-Teフォトカソードを最も長寿命・高耐久化できる。また、CsIをコーティングした際、最も長寿命なカソードが得られたことから、寿命の観点からすると、CsBrより

CsIの方が保護膜として優れているといえる。

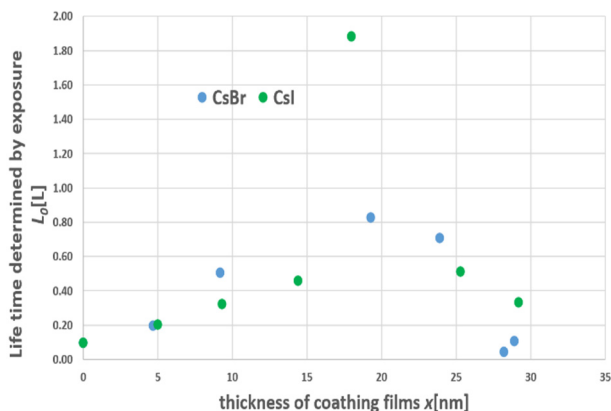


Figure 3: Relationship between lifetime L_0 and coating film thickness.

3.2 コーティング中の Q.E.変化と保護膜厚の関係

図 4 に CsBr コーティング中の相対 Q.E.と CsBr 膜厚の関係、図 5 に CsI コーティング中の相対 Q.E.と CsI 膜厚の関係を示した。この結果から、CsBr/CsI のどちらの場合もコーティングする保護膜厚が厚くなるにつれて、Q.E.が低下することが判明した。その Q.E.劣化挙動について、最初の数 nm では急激に Q.E.が低下した後に、その後は保護膜厚の増加に伴い、なだらかに Q.E.が低下することが判明した。これらの原因として、急激な Q.E.低下はカソードと保護膜の結晶構造のマッチングが悪く格子欠陥が生じたため、カソードと保護膜の境界面にポテンシャル障壁が生じたため[3]、保護膜コーティング中 Cs-Te がスパッタされたためなど複数の要因が考えられ、これは(4)式の L_1 項に対応している。また、なだらかな Q.E.低下は電子が CsBr 内で失うエネルギーが増加するためであると考えられ、これは(4)式の L_2 項に対応している。

表 1 に保護膜コーティング中の Q.E.減衰率を示した。この結果から、どちらも約 20 nm コーティングした際の方が Q.E.減衰率が小さい。また、他の保護膜厚の場合においても、同様の傾向が確認されているため、Q.E.の観点からするとCsIよりCsBrの方が優れているといえる。

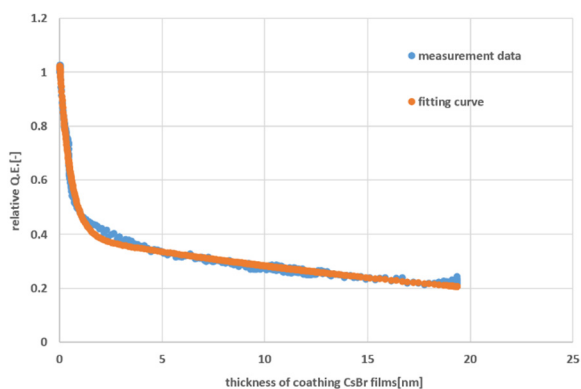


Figure 4: Relationship between relative Q.E. and coating CsBr film thickness.

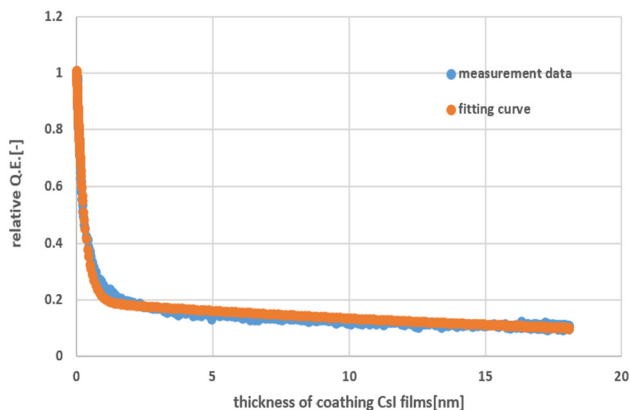


Figure 5: Relationship between relative Q.E. and coating CsI film thickness.

Table 1: Q.E. Decay Rate During Coating

material	initial Q.E. [%]	After coating Q.E. [%]	Decay rate [%]
CsBr	2.0	0.43	78
CsI	2.5	0.28	89

4. 結論と今後の展望

Cs-Te フォトカソードにアルカリハライド保護膜 (CsBr or CsI) をコーティングした際の、保護膜厚と暴露量による寿命の関係とコーティング中の Q.E.変化と保護膜厚の関係を調査した。その結果、CsBr/CsI を約 20 nm コーティングすると寿命 L_0 が最大になることが判明した。両者を比較すると、CsBr より CsI の方が酸素ガス耐性は高い傾向がみられた。また、コーティング中の Q.E.低下に関しては、CsI よりも CsBr の方が減衰率は小さいことから、Q.E.の観点からすると CsBr の方が Cs-Te と相性が良いといえる。

今後の展望としては、本研究で得られた知見を活かし、Cs-K-Sb フォトカソードを用いたアルカリハライド保護膜コーティング実験を行う予定である。

参考文献

- [1] A. di Bona *et al.*, “Auger and x-ray photoemission spectroscopy study on Cs:Te photocathodes”, *Journal of Applied Physics* 80, 3024, (1996); <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.363161>
- [2] Lei Guo *et al.*, “A STUDY OF BEAM LIFE TIME OF NEA-GaAs CATHODE”, *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2011, pp. 1204-1207.
- [3] E. Shefer *et al.*, “Photoelectron transport in CsI and CsBr coating films of alkali antimonide and CsI photocathode”, *Journal of Applied Physics* 92, 4758, (2002); <https://doi.org/10.1063/1.1505684>