

2025 年 2 月 25 日

報道機関 各位

高耐久な光電陰極の簡便な作製法を確立 加速器や電子顕微鏡への応用にも期待

【本研究のポイント】

- ・加速器などに使われる電子銃の心臓部である「光電陰極^{注 1)}」のうち、特にカリウム、セシウム、アンチモンの化合物薄膜を使ったものは、照射光から放出電子への変換効率(量子効率)が高く高性能。しかし動作時に超高真空が求められることや寿命が短いという課題がある上、最適な製造手法を見つけるのは困難だった。
- ・このタイプの光電陰極の性能は、薄膜を蒸着させる基板の表面の状態に大きく影響されることが分かっている。今回、超高真空状態での輸送と放射光^{注 2)}を用いた分析により均質な薄膜を作ることができ、高い性能を達成する手法の確立に成功した。
- ・本手法は従来と比べ簡便である上、薄膜の性能が高いことを確認できた。加速器や電子顕微鏡でも寿命が長い光電陰極が比較的簡単に活用できるようになると期待される。

【研究概要】

名古屋大学シンクロトロン光研究センターの郭 磊(かく らい)助教、高嶋 圭史 教授、高倉 将一 副技師、米国・ロスアラモス国立研究所の山口 尚登 研究員、Gaoxue Wang 研究員、高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設の山本 将博 教授、日本大学の小川 修一 准教授、あいちシンクロトロン光センターの仲武 昌史 主任技術研究員らの共同研究チームは、新作製手法(適正カリウム蒸着法)を用いて化学量論的に均質^{注 3)}な K_2CsSb 光電陰極の作製に成功しました。この成果は化学的に活性な光電陰極材料を含む薄膜材料の作製法に新たな指針を与えるものです。

本研究では、光電陰極物質カリウム(K)、セシウム(Cs)、アンチモン(Sb)を基板上に成膜した K_2CsSb 光電陰極を研究対象としています。名古屋大学において製膜されたサンプルを光電陰極の機能を損なわずに輸送できる真空輸送装置(真空度^{注 4)}: $<10^{-7}$ Pa)を用いてあいちシンクロトロン光センター(あいち SR)のビームライン BL7U へ輸送し、X 線光電子分光による分析を行いました。

2種類の成膜法から作製されたサンプルの量子効率(QE)^{注 5)}、耐久性および物質の組成を比較し、その比較結果から、化学量論的に均質な K_2CsSb 光電陰極が作製できる成膜法が確立でき、その方法で作った光電陰極が従来の不完全なものよりも耐久性としても優れていることが示されました。また、放射光を利用することで光電陰極の性能の裏に隠された物理現象の分析が可能となり、性能に影響を与える組成の理解が深められました。(図 1)

本研究の成果は 2025 年 1 月 23 日付で学術雑誌「Scientific Reports」に掲載されました。

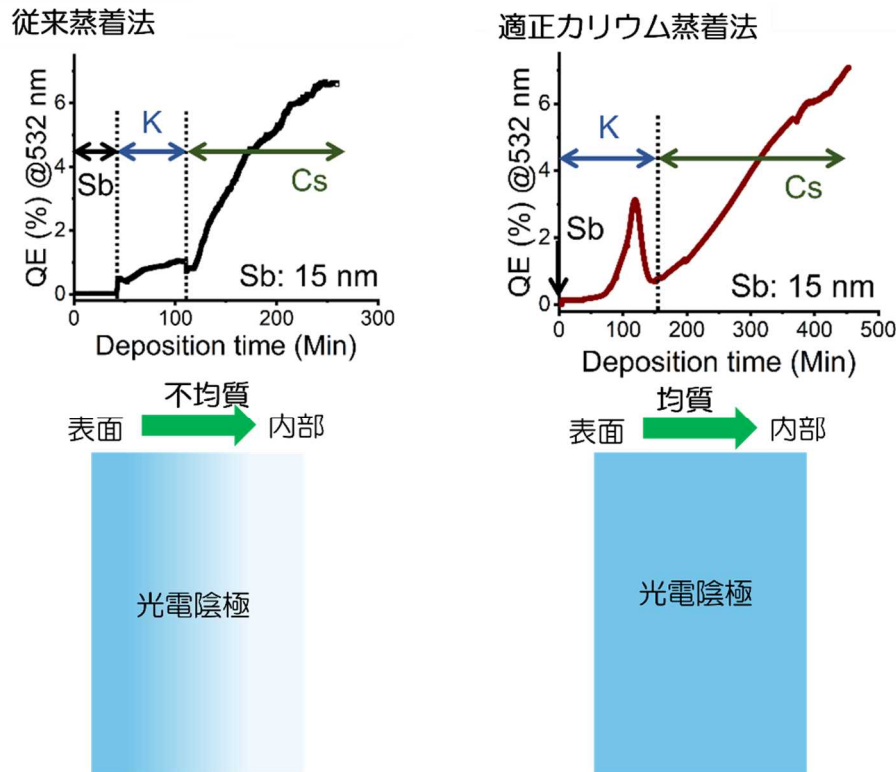


図1 手法による光電陰極構造の変化

【研究背景と内容】

アルカリ金属を基本材料とした高性能光電陰極は、高輝度で短パルスの電子ビームが必要とされる先端的な加速器の光電陰極として広く利用されており、カリウム、セシウム、アンチモンの化合物(K-Cs-Sb)は、大強度や短パルスが容易に実現できる緑色レーザー(532 nm)の波長で高い量子効率(QE)が得られる高性能の光電陰極薄膜の一つです。一方、動作真空圧力の制限、時間あるいは電荷量による寿命が短いなどという欠点があります。

これまでの研究では K_2CsSb 光電陰極の性能は、基板の表面状態(清浄度、粗さ、および表面配向)に大きく影響されることが分かっています。しかし、化学量論的に均質な K_2CsSb 光電陰極を作製できる成膜法が確立されていないことが課題になっていました。

光電陰極材料の化学結合状態や物理的な劣化メカニズムなどの探究は理論モデルに留まっており、現象論に基づき解釈されています。そのため、光電陰極材料表面の詳細な分析が必要ですが、化学的に非常に活性であるため、サンプルの作製から分析まで常に超高真空を維持しなければならないという課題があります。

本研究では、グラフェンコーティングした基板を超高真空中において 500℃で1時間の加熱をすることによって表面を清浄化し、同一真空槽に実装された Cs, K, および Sb の蒸着源を用いて従来蒸着法及び適正 K 蒸着法で K-Cs-Sb 光電陰極を作製しました。

従来蒸着法は、Sb を膜厚で定量的に成膜し、K と Cs は QE がピークに達するまで蒸着する手法です。一方、適正 K 蒸着法は、Sb と Cs の蒸着条件は変えず、K を蒸着する際に QE が完全に低下するまで蒸着する手法です。これら 2 手法において QE と酸素に対する耐久性を評価したところ、QE はほぼ差がない一方で、適正 K 蒸着法により作製された光電陰極は酸素ガスに対する耐久性が1桁良いという結果になりました。

名古屋大学で作製されたサンプルは、新たに開発した超高真空スーツケースを用いて超高真空を維持したまま、あいちシンクロトロン光センターのビームライン BL7U の X 線光電子分光(XPS)^{注6)}装置に輸送し、分析を行いました。光陰極の表面とスパッタリング後(内部)の組成を定量的に評価したところ、適正 K 蒸着法により作製された光陰極の組成は理論的な化学量論 K_2CsSb に近く、内部までこの構造で構成されていました。一方従来蒸着法では Cs と K が 1:1 での組成になり、内部まで浸透できず表面近傍に留まっていました。(図2)

さらに、光陰極物質表面の K、Cs と酸素の元素間の結合力について密度汎関数理論(DFT)^{注7)}を用いて計算したところ、Cs と酸素の場合の結合エネルギーは、セシウム 1 原子層および 2 原子層の終端面でそれぞれ -4.53 eV、-5.35 eV でした。これに対し K と酸素では、カリウム 1 原子層および 2 原子層の終端面でそれぞれ -2.17 eV、-2.24 eV と大幅に弱く、酸素に対する耐久性評価実験結果と矛盾しないことを示しました。

本研究により、化学量論的に均質な K_2CsSb 光陰極が容易に作製できる成膜法の確立に成功し、その耐久性は従来の不完全なものよりも優れていることが分かりました。また、超高真空を維持した状態での輸送と放射光を用いた分析により、光陰極の性能に影響を与える組成について理解を深めることができました。

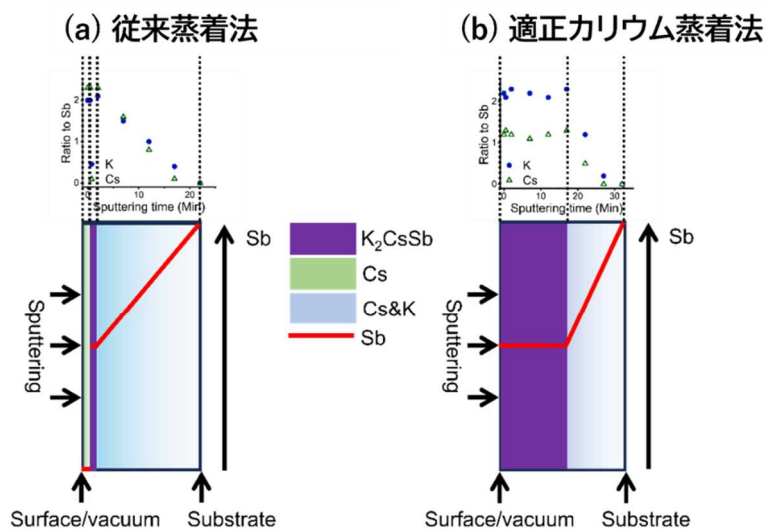


図2 「従来蒸着法」と「適正カリウム蒸着法」を用いたK-Cs-Sbフォトカソードの組成の比較

【成果の意義】

本研究により、適正に K を蒸着することで、化学量論的に均質な K_2CsSb 光陰極の作製法が確立でき、化学的に活性である光陰極の耐久性の向上が実現できました。この成膜法により、先端的な加速器および電子顕微鏡などにおいてより容易に高性能な光陰極が利用できるようになります。また、超高真空を維持した状態でのサンプルの輸送を可能にしたことで、活性な物質についても放射光利用を用いた構造などの詳細な観測と分析が容易に実現できるようになりました。

本研究は科学研究費助成事業(若手研究、21K17994)及び日米科学技術協力事業「高エネルギー物理学分野」の助成を受けています。

【用語説明】

注 1)光電陰極:

光を照射した際に光電効果により電子を放出する陰極。光陰極やフォトカソードとも言う。

注 2)放射光:

加速器でほぼ光速まで加速された高エネルギーの電子群が磁場によって曲げられたときにその接線方向へ放射される強力な紫外線や X 線の光。

注 3)化学量論的に均質:

化学式にある組成比(今回の場合は K と Cs が 2:1 の割合)に一致してそれが均一であることを指す。

注 4)真空度:

真空の程度。真空ポンプなどを用いてつくられた真空状態について、残留気体の圧力で表す。

注 5)量子効率(Quantum Efficiency; QE):

ここでは、陰極に対して入射した光子数に対する放出した電子数の割合。

注 6)X 線光電子分光法(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS):

試料表面に X 線を照射し、試料表面から放出される光電子の運動エネルギーを計測することで、試料表面を構成する原子の元素組成や化学結合状態を分析する手法。

注 7)密度汎関数理論(Density Functional Theory, DFT):

様々な物質(元素)の電子系の空間的な結合やエネルギーなどをそれぞれの物質の基底状態の電子密度から計算することが可能であるとする理論。

【論文情報】

雑誌名:Scientific Reports(出版元:Nature Publishing)

論文タイトル:Improved robustness of sequentially deposited potassium cesium antimonide photocathodes achieved by increasing the potassium content towards theoretical stoichiometry

著者:Lei Guo(名古屋大学), Keisuke Shiohara(名古屋大学), Hisato Yamaguchi(米国・ロスアラモス国立研究所), Gaoxue Wang(米国・ロスアラモス国立研究所), Yuki Okabe(日本大学), Masashi Nakatake(あいちシンクロトロン光センター), Shoichi Takakura(名古屋大学), Masahiro Yamamoto(高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設), Shuichi Ogawa(日本大学)and Yoshifumi Takashima(名古屋大学)

DOI: 10.1038/s41598-025-87603-6

URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-87603-6>

【研究者連絡先】

名古屋大学シンクロトロン光研究センター

助教 郭 磊(かく らい)

TEL:052-747-6565 FAX:052-747-6563

E-mail:l.guo@nusr.nagoya-u.ac.jp

Press Release

米国・ロスアラモス国立研究所 研究員
山口 尚登(やまぐち ひさと)
TEL: +1 505-664-0382
E-mail:hyamaguchi@lanl.gov

高エネルギー加速器研究機構 応用超伝導加速器イノベーションセンター(iCASA)
教授 山本 将博(やまもと まさひろ)
TEL:029-864-5200 内線 PHS:4912
E-mail:masahiro@post.kek.jp

日本大学電気電子工学科
准教授 小川 修一(おがわ しゅういち)
TEL:047-474-2383
E-mail:ogawa.shuuichi@nihon-u.ac.jp

あいちシンクロトロン光センター
主任技術研究員 仲武 昌史(なかたけ まさし)
TEL:0561-76-8331
E-mail: masashi.nakatake@aichisr.jp

【報道連絡先】
名古屋大学総務部広報課
TEL:052-558-9735 FAX:052-788-6272
E-mail:nu_research@t.mail.nagoya-u.ac.jp

高エネルギー加速器研究機構広報室
TEL:029-879 -6047
E-mail:press@kek.jp

日本大学生産工学部庶務課
TEL:047-474-2201
E-mail:cit.shomu@nihon-u.ac.jp

公益財団法人科学技術交流財団あいちシンクロトロン光センター管理課
TEL:0561-76-8331 FAX:0561-21-1652