

高耐圧セラミック管の開発に向けた多結晶窒化アルミニウムの表面帯電特性 SURFACE CHARGING CHARACTERISTICS OF POLYCRYSTALLINE ALUMINUM NITRIDE FOR DEVELOPMENT OF HIGH VOLTAGE RESISTANT CERAMIC

小倉暁雄^{#, A)}, 山本将博^{B)}, 山納康^{C)}

Akio Ogura^{#, A)}, Masahiro Yamamoto^{B)}, Yasushi Yamano^{C)}

^{A)} University of Tsukuba

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Saitama University

Abstract

At the International Linear Collider, a photocathode electron gun capable of delivering a stable, high-average-current beam is required. High-intensity laser irradiation raises the photocathode surface temperature, leading to degradation of quantum efficiency and operational lifetime. Improving the withstand voltage of the inverted-type ceramic insulator that supports the DC high-voltage terminal is also essential. In this study, we focus on polycrystalline aluminum nitride, which combines excellent insulating properties with high thermal conductivity, and obtain fundamental data on its charging behavior. Our measurements show that the surface potential near the cathode increases with applied voltage, suggesting a high risk of discharge initiation.

1. はじめに

国際リニアコライダーの開発が進められており、光陰極電子銃として大電流ビームが要求されている。目標とするビーム電流量は 6 A/cm^2 となっており、Child-Langmuir equation から、電極間距離 6 cm とした時、印加電圧は 200 kV 程度になる。更なる大電流、低エミッタンス化のためには、直流電圧を高める必要がある。

これまでの直流光陰極電子銃では、高電圧端子が大気側にあるため、それを支持するセラミック管(アルミナセラミックス、以下アルミナ)も大気に露出している構造となっていた[1]。大気側の放電を抑制するために、現在はSF₆(六フッ化硫黄)ガスを充填して絶縁性能を維持している。SF₆ガスは高い絶縁性能と消弧能力を持っているが、強力な温室効果ガスであるため、近年ではその使用が禁止されつつあり、その代替手段が必要となっている。米国 Jefferson Laboratory は、アルミナが大気に露出している従来構造から、アルミナを真空チャンバー内に入れ、商用の高圧ケーブルを使って電圧を供給する Inverted型構造を提案した[2]。これにより、アルミナの大気側絶縁の検討が不要になるため、SF₆ガスを大幅に削減可能となったが、高電圧化にはまだ課題が残っている[3]。また大電流ビーム生成のためには、陰極表面に高強度でレーザー照射する必要がある。その際に発生する熱によって、光陰極の量子効率・寿命が低下するという課題があり[4]、安定したビーム電流を維持するためには、光陰極の冷却・放熱機構が必要となる。

本研究では、近年注目されている多結晶窒化アルミニウム(以下、AlN)に着目した。AlNは、支持絶縁体として使用されてきたアルミナと同等の絶縁性と、アルミナと比べて約6倍の熱伝導率を有していることから[5]、放熱・高耐圧性が必要とされる加速器構造体への応用可能性を有している。しかし、その帯電・耐圧特性に関する詳細

な報告は少ない。そこで本研究では、真空下で AlN に高電圧を印加した時の表面帯電に関する基礎的なデータ取得を目的とする。また、従来のアルミナと比較した時の特徴についても報告する。

2. 実験装置・方法

2.1 実験試料と装置

本実験で使用した試料はアルミナ(純度 99.6%)、AlN (AN170P)である。試料サイズは、 $10 \text{ mm} \times 47 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ である。

真空下で高電圧を印加する装置の概略図を Fig. 1 に示す。試料がアクリルホルダーに固定されており、試料の上下に電極がある。上部電極(陽極)には銅箔テープ、下部電極(陰極)には導電性ダイヤモンド針を用いた。ダイヤモンド針の先端曲率半径は $20 \mu\text{m}$ であり、先端に電界が集中するため、放電位置の特定が容易な構成とな

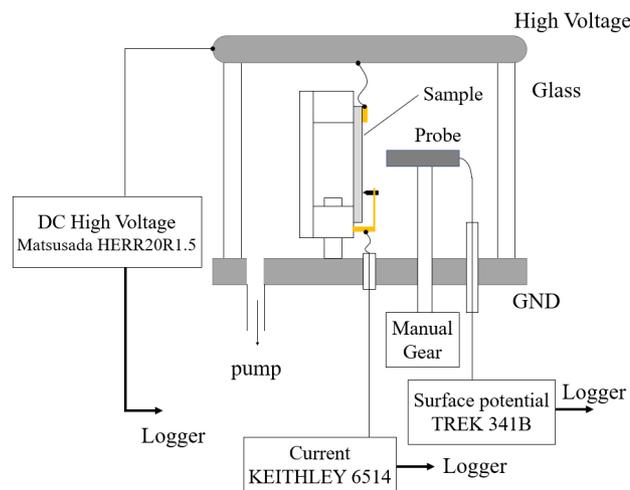


Figure 1: The measurement configuration.

[#] ogura.akio.gn@u.tsukuba.ac.jp

っている。電極間距離は約 30 mm とした。試料表面の電位分布を測定するために、振動容量型の非接触表面電位計 (Trek 341B) を使用した。サンプル正面にプローブがあり、外部のマニュアルギアで上下方向に動作する。表面電位の測定間隔は 0.5 mm とし、 10^{-3} Pa 台での真空中で測定を実施した。

2.2 実験方法

アルミナ、AIN 試料の表面電位分布を測定する手順は以下の通りである。

1. 電圧印加前の初期電位分布を測定。その際、印加電圧は 0 V にしている。
2. +1 kV を 5 分印加後、印加電圧を 0 V にし、表面電位分布を測定。
3. 2 と同様の測定を +3 kV、+5 kV、+7 kV、+10 kV に対しても実施。
4. +10 kV に対しては 10 分、15 分、30 分間を追加で印加し、それぞれの表面電位分布を測定。

電圧を印加している際は、微小電流を測定する。また表面電位計のプローブは退避させている。

3. 実験結果および考察

3.1 アルミナの表面電位

電圧を印加しない初期電位、1-7 kV まで印加した後

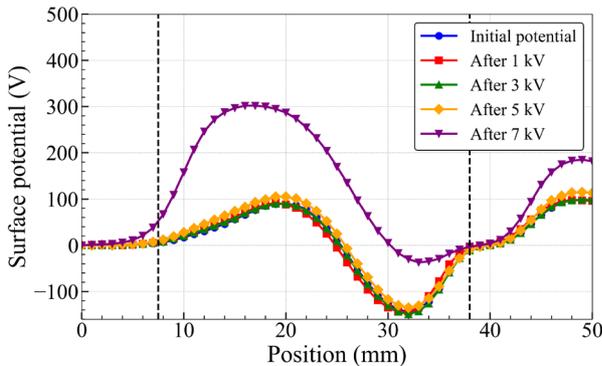


Figure 2: Surface potential profiles of the alumina after initial charging and applying 1 kV, 3 kV, 5 kV, and 7 kV.

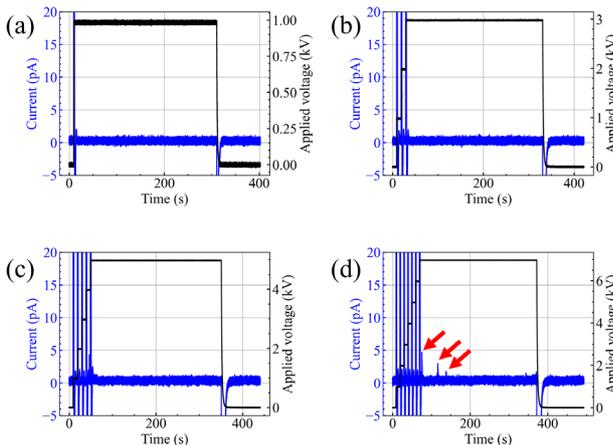


Figure 3: The time evolution of the current and voltage of the alumina under applied voltages of (a) 1 kV, (b) 3 kV, (c) 5 kV, and (d) 7 kV for a duration of 5 minutes.

のアルミナ表面電位を Fig. 2 に示す。7.5 mm の黒点線は銅箔テープの先端、38 mm の黒点線はダイヤモンド針の先端を表している。電圧を印加する前から僅かに帯電しており、1-5 kV においては、初期電位と殆ど変わっていないことが分かる。7 kV 印加後、表面電位分布が変化している。この原因について、Fig. 3 の電圧・電流の時間変化と対応させて考える。

Figure 3 から分かるように、電圧 (黒線、右軸) は 5 分間一定に保たれている。印加電圧は、10 秒ごとに 1 kV ステップで増加させた。Figures 3(a)-(c) は印加電圧 1 kV、3 kV、5 kV の場合であり、電流 (青線、左軸) はほぼ流れておらず、絶縁体であることを示している。一方、Fig. 3(d) では、70 s、120 s、140 s 付近 (赤矢印) でスパイク状の電流波形が見られる。この現象は、陰極 (ダイヤモンド針) 先端に集中した電界によって放出された一次電子がアルミナ表面に衝突し、二次電子などと呼ばれる増殖を繰り返しながら最終的に陽極 (銅箔テープ) に到達したことにより発生したものである。この二次電子などが発生した際、絶縁体の表面は正に帯電するため [6]、Fig. 2 のように 7 kV で正帯電が進んだと考えられる。

Figure 4 は、10 kV を 5 分間、10 分間、15 分間、30 分間印加した後の表面電位を示している。参考までに、初期電位と 7 kV 印加後の表面電位も追加した。10 kV を 5 分間印加することで急激に表面電位が増加し、そこから

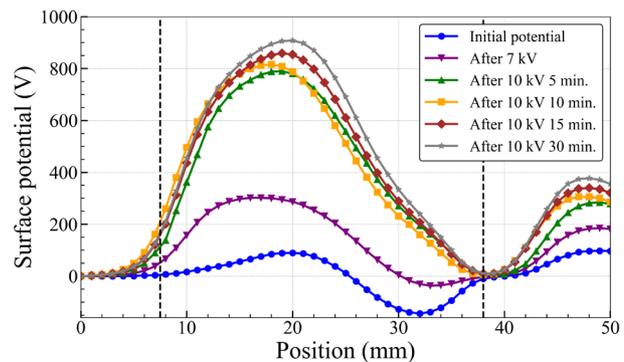


Figure 4: Surface potential profiles of the alumina after applying 10 kV for durations of 5 min, 10 min, 15 min, and 30 min.

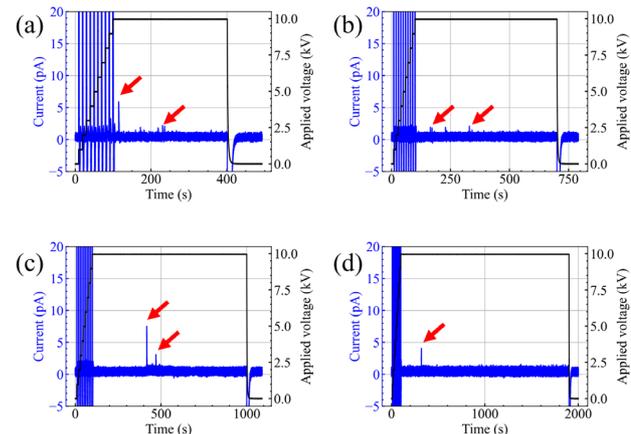


Figure 5: The time evolution of the current and voltage of the alumina under an applied voltage of 10 kV for durations of (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 15 min, and (d) 30 min.

は徐々にピーク値が増大している。Figure 5 は 10 kV 印加時の電圧・電流の時間変化を示しており、全ての電流波形において赤矢印で示している時間で二次電子などが発生していることが分かる。Figure 4 の表面電位分布のピーク値変化と対応が取れており、二次電子などによる正帯電が原因と考えられる。

3.2 AlN の表面電位

初期帯電と 1-7 kV を印加した後の表面電位を Fig. 6 に示す。アルミナの時と同様、7.0 mm の黒点線は銅箔テープの先端、38 mm の黒点線はダイヤモンド針の先端を表している。アルミナの結果 (Fig. 2) と比較して異なるのは、1 kV を印加した直後から陰極 (ダイヤモンド針) 側に正のピークが立ち始め、印加電圧を大きくしていくに従って、そのピーク値が増加する点である。Figure 7 に電圧・電流の時間変化を示す。これもアルミナの結果 (Fig. 3) と比較すると、アルミナでは電圧が印加された直後にほぼ 0 pA になるが、AlN では徐々に電流が減少している。アルミナと同様、7 kV で微小放電が発生した。アルミナの結果 (Fig. 2) では、7 kV 印加時に発生した微小放電によって銅箔テープ側が正に帯電したが、AlN では

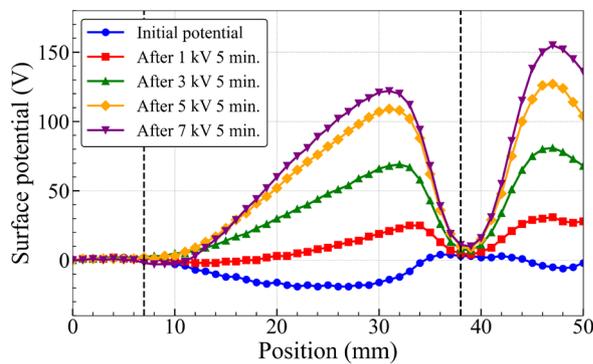


Figure 6: Surface potential profiles of aluminum nitride after initial charging and applying 1 kV, 3 kV, 5 kV, and 7 kV.

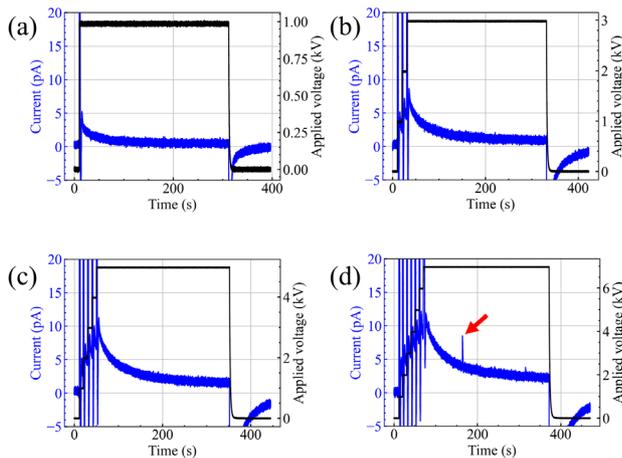


Figure 7: The time evolution of the current and voltage of the aluminum nitride under applied voltages of (a) 1 kV, (b) 3 kV, (c) 5 kV, and (d) 7 kV for a duration of 5 minutes.

ダイヤモンド針側のピーク値が僅かに増加するのみで、銅箔テープ側に大きな変化は見られない。

Figure 8 は、アルミナと同様に 10 kV を印加した後の表面電位を示している。10 kV を 5 分間印加した後の表面電位は負となり、ピーク値は -650 V 程度である。その後、10 kV を 10 分間追加で印加するとピーク値は減少するが、正帯電ではなく、広い範囲で負帯電していることが分かる。更に 15 分、30 分と追加で印加すると、負帯電が僅かに増加していく。Figure 9 は、電圧・電流の時間変化を示しており、アルミナの電流波形 (Fig. 5) と比較して、全てのグラフで微小放電が多数発生している。また Fig. 9(a) の 370 s 付近 (赤矢印) では、ガス反応を伴うフラッシュオーバー放電が発生した。詳細は示さないが、フラッシュオーバー放電時に印加電圧が瞬間的に低下し、再び 10 kV に回復している様子が記録されている。このフラッシュオーバー放電が発生した原因は、陰極付近の電界が増強されたことによるものと考えられる。Figure 6 から分かるように、印加電圧を大きくしていくに従って、陰極付近の表面電位が大きくなっている。アルミナの結果 (Fig. 2 と Fig. 4) では、陰極付近の表面電位の増加は見られない。Figure 6 に見られる陰極側の表面電位の変化の原因に

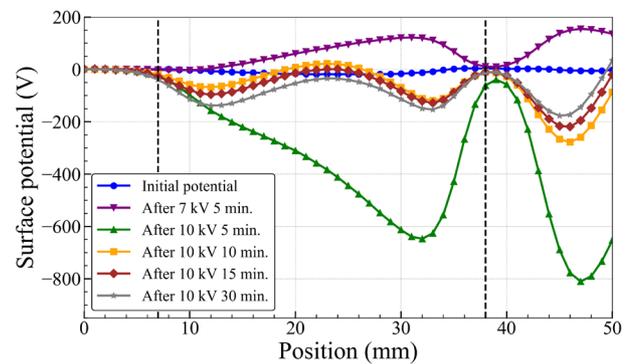


Figure 8: Surface potential profiles of the aluminum nitride after applying 10 kV for durations of 5 min, 10 min, 15 min, and 30 min.

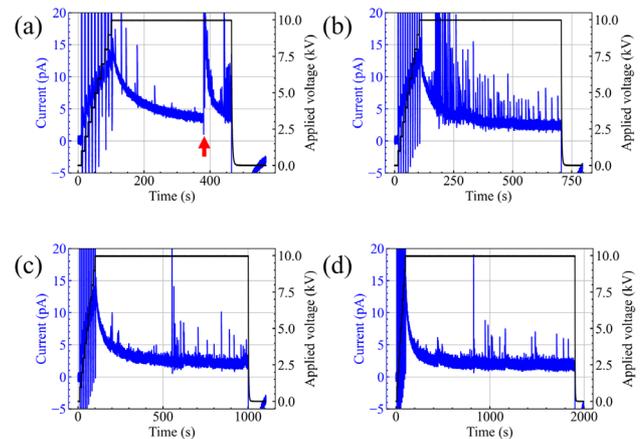


Figure 9: The time evolution of the current and voltage of the aluminum nitride under an applied voltage of 10 kV for durations of (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 15 min, and (d) 30 min.

については、AlN の分極特性、界面電荷の蓄積によるものなのかは分からないが[7]、絶縁破壊を引き起こすフラッシュオーバー放電を誘発してしまう恐れがあるため、高電圧を印加するセラミック管として使用する際には注意が必要である。

Figure 8 で示すように、AlN に 10 kV を印加後、表面電位が負となっているにも関わらず、Fig. 9 で微小放電が発生し続けている。二次電子なだれによる微小放電の場合、絶縁体表面の正帯電が進むはずであるが、今回の結果は逆になっている。今後の検討課題である。

4. まとめ

国際リニアコライダの光陰極電子銃におけるセラミック管の検討として、高絶縁性・高熱伝導性を有する窒化アルミニウムの表面帯電特性について調べた。二次電子なだれによる微小放電が発生していないにも関わらず、陰極近傍の表面電位が増加していく傾向が見られた。この傾向は、従来のアルミナセラミックスでは見られなかった。この表面電位の変化によって、陰極の電界を増強してしまい、10 kV 印加時にはフラッシュオーバー放電が発生したと考えられる。今後は、フラッシュオーバー放電後の負帯電や、負帯電での微小放電の発生メカニズムといった点について明らかにしていきたい。

謝辞

本研究で使用した試料(アルミナ、窒化アルミニウム)は、株式会社 MARUWA の平野様、小林様からご提供

いただきました。また本研究は、日米科学技術協力事業(研究課題名:Higher voltage technology for compact dc photoguns)のもと実施されました。この場を借りて、お礼を申し上げます。

参考文献

- [1] T. Nagai *et al.*, “High-voltage testing of a 500-kV dc photocathode electron gun”, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 033304 (2010).
- [2] P. A. Adderley *et al.*, “Load-locked dc high voltage GaAs photogun with an inverted-geometry ceramic insulator”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **13**, 010101 (2010).
- [3] C. Hernandez-Garcia *et al.*, “High voltage studies of inverted-geometry ceramic insulators for a 350 kV DC polarized electron gun”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **23**, 418 (2016).
- [4] Z. Ding *et al.*, “Temperature-dependent quantum efficiency degradation of K-Cs-Sb bialkali antimonide photocathodes grown by a triple-element codeposition method”, *Phys. Rev. Accel. Beams* **20**, 113401 (2017).
- [5] <https://www.maruwa-g.com/products/>
- [6] O. Yamamoto *et al.*, “Observation of current and luminescence during the surface charging in vacuum”, *T. IEE Japan*, **121-A**, 841 (2001).
- [7] R. Ochi, “Characterization and control of surface and interface on AlGaIn/GaN heterostructures for transistor applications”, Ph. D. dissertation, Hokkaido University, Hokkaido, Japan.