

An Experimental Study to Reduce the Field Emission Dark Current from the Clean Copper Surface Prepared for an RF-Gun Cavity

C. Suzuki, T. Nakanishi, S. Okumi, T. Gotou, K. Togawa, C. Takahashi, H. Ida, F. Furuta, K. Wada
H. Matsumoto¹, M. Yoshioka¹, and K. Nishitani²

Nagoya University, Department of Physics Furo-chou, Chikusa-ku, Nagoya, 406, Japan

1) KEK High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

2) ATC Co., Ltd. 36-7 Namiki-cho, Hachioji-shi, Tokyo, 193, Japan

Abstract

The field emission dark current is the most serious problem for the long life-time operation of the photocathode-type RF-gun. It is especially true, if the GaAs with an NEA (Negative Electron Affinity) surface shall be used as the photocathode of RF-gun to produce the spin polarized electrons. To find the solution for this problem, a plan to construct an RF-gun cavity with an extremely low dark current has been started by an international collaboration of CERN / KEK-Nagoya / SLAC. As a part of this collaboration, the study is started to reduce the DC dark current from the clean copper surface. As the first step, various surface treatment methods will be examined by making the test samples from Class-1 OFHC copper and the impurities of surfaces can be inspected by SEM and AES. The methods are osonized pure water rinsing, high pressure pure-water rinsing and electro-polishing, etc. Then, as the second step, the dark current from the clean copper surface will be measured using the special test-apparatus which was already build and can supply the ultra-high-vacuum and the high DC field gradient for this test.

RF-Gun 空洞用の清浄Cu表面から電界放出される暗電流の削減

1 はじめに

次世代リニアコライダーにおいて、素粒子反応の生成率を上げ、物理的に重要な事象を測定するためには、 10^{34} /cm²/s 近いミノシティーが必要である。このために電子源は、大電流のマルチバンチビームを低エミッタンスで生成することが要求される¹⁾ ($>10^{10}$ electrons/bunch, 50~85 bunch, $<10^{-5}$ rad m)。

これには、直流電界加速型電子銃より、カソードで生成された電子ビームを素早く相対論的エネルギー領域に加速できる高周波加速型電子銃 (RF-GUN) のほうが有利である。しかし、加速勾配が 100MV/mにも達するRF-Gunでは、空洞内の微少放電や電界放出電流を十分に抑制できなければカソードの寿命劣化が顕著となり、実用化の際の大きな問題となる。特に我々が最終目標としている偏極RF-Gunにおいては、GaAs系半導体の負の電子親和性 (NEA) を暗電流により発生する不純物から守ることが成否の鍵を握っている。²⁾

そこで我々はCu表面からの電界放出電流を削減し高電界特性の優れた空洞の制作へむけて基礎研究を開始した。これは、どのような表面処理、洗浄方法が高電圧性能の改善に効くのかをあらかじめ実際のRF-Gun空洞に適用するのが目的である。ゆえに基礎研究とはいえ単結晶の銅の使用や、真空炉内での高温熱処理といったRF-Gun空洞への適

用が難しいものは採用していない。

電極表面に他の金属や、絶縁性不純物が存在すると、激しい電子放出点となり、高電圧特性を著しく劣化させる。³⁾ このため空洞の徹底した清浄化による不純物の排除は優れたRF-Gun空洞を制作し実用化するためには不可欠である。この点を踏まえ、実験方法としては2段階の評価をおこなう予定である。

1: サンプルにたいして各種表面処理をほどこし、SEMおよびオージェにより清浄度を評価、比較する。

2: 直流高電界試験用の電極を制作し電界放出電流を測定することにより各種表面処理の高電圧特性を評価する。

2 電極表面評価試験

素材として $\phi 10 \times t 10$ のサンプルを用意する。これらにたいして以下のような処理をそれぞれのサンプルにおこない処理後の表面を調査、比較し各処理後の清浄度を評価する。

用意するサンプルとして

- ・ 旋盤加工のみ
- ・ 旋盤加工+オゾン超純水洗浄
- ・ 旋盤加工+高圧超純水洗浄
- ・ 旋盤加工+電解研磨

(研磨量 $\sim 10\mu\text{m}$ および $30\mu\text{m}$ の2種)
・旋盤加工+電解研磨+オゾン超純水洗浄

とし、これらの清浄度を調査し有望とみられる手法を高電界試験用電極の洗浄に採用する予定である。以下に製作の手法を説明する。

<素材および機械加工>

母材としてはClass-1 OFHC CopperをHIP処理 (Hot Isostatic pressing) したものを用意し、粗加工後に超精密旋盤加工をおこなう。HIP処理は 800°C のアルゴン雰囲気中で高圧圧縮処理 ($1200\sim\text{kg}/\text{cm}^2$) をおこない粒界の隙間を小さくするのが目的である。これは機械加工中に使用する切削油が粒界からしみ込み高電界性能の劣化と真空中でのガス放出を防ぐためである。

サンプルの表面粗度の達成目標は $R_a\sim 1.0\mu\text{m}$ である。このような鏡面仕上げをする意味は物理的な形状による電界増幅をおさえるというよりも、表面の凹凸に不純物が入り込むのを防ぐためである。

しかしこの機械加工後の表面をSEMにより調査した結果、不純物の巻き込みが多く見られた。特性X線による元素分析では炭素、シリコンのほかにアルミニウム、チタンといった金属の存在が確認された。銅はステンレス等にくらべ柔らかい金属であり堅い金属は簡単に埋め込まれてしまう。これらは高電界化で電子放出点になるばかりでなく通常の洗浄で落とすのは困難である。最終機械加工は銅専用の超精密旋盤にておこなったためこれらの金属は粗加工の段階で銅材に埋め込まれたと考えられる。清浄な銅空洞を製作するためには粗加工の段階から気を配る必要があることを示唆している。

<オゾン水洗浄>

オゾン水洗浄は、オゾンのもつ強い酸化作用による有機物の分解除去と酸化膜形成による不動態化をおこなう。比抵抗 $18.2\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ の超純水にオゾン数をppm添加しオーバーフローにより洗浄する。もともとは半導体の洗浄において使用されその効果がしられていたが⁴⁾、KEKのグループにより 508MHz の超伝導空洞の洗浄に適用され最大加速電場 $E_{\text{acc}}\sim 14.4\text{MV}/\text{m}$ を達成し高電界性能の改善に効果をあげている。⁵⁾

炭素系の汚れを積極的に取り除く方法として効果が期待される。

<高圧洗浄>

高圧洗浄は超純水や純水を $80\sim 90\text{ kg}/\text{cm}^2$ の圧力で噴射し、被洗浄物の表面を積極的にたたくことで付着した汚れを取り除く方法である。この手法もL-Bandの超伝導空洞に使用され、メガソニック洗浄と併用し高性能の超伝導空洞を作り出すことに成功している。⁶⁾ また、それほど圧力は高くないが ($\sim 30\text{kg}/\text{cm}^2$) S-Bandの銅空洞の洗浄にも適用され $334\text{MV}/\text{m}$ という高い表面電界を達成している。⁷⁾

表面の付着物や軽く埋め込まれた不純物を能動的に取り除くのに効果があると期待される。

<電解研磨>

電界研磨は金属の表面を溶解し鏡面化する手段として確立された方法である。表面を実際に数十ミクロン溶かすため異物の除去能力は非常に大きい。今回この方法が候補にあがったのは、銅表面に高圧洗浄でとれない程度にまで強くうめこまれた不純物が存在した場合を想定してである。前述したような数ミクロン程度の金属片が表面に残留していると、これらが高電界下で電子放出点となり、その後の洗浄による不純物の除去効果が見えないおそれがある。これを避けるためにさまざまな洗浄と組み合わせることで表面の清浄度を評価するのが目的である。

<評価方法>

各種洗浄、表面処理後の評価はSEM+特X線分析装置およびオージェ電子分析装置 (AES) にておこなう。

まず初期状態の確認用として超精密旋盤加工のみのサンプルを用意し、これを基準とする。

SEMでは面分析により表面上の不純物の多寡およびその元素の同定をおこない、処理後の清浄度を調査する。。またオージェでは点分析により微少な残留元素を検出し洗浄力の比較をおこなう。

3 高電界特性試験

次に、実際に各種表面処理を施した電極を製作し、これにたいして高電圧特性を電界放出暗電流値および β 値の大小で評価する。

電界放出電流は、理想的な金属表面に強電界が作用したとき、薄くなったポテンシャル障壁を、電子がトンネル効果によりすり抜けてくる現象であり、Fowler-Nordheimの式に従う。³⁾ 実験においては、何らかの電界を増倍するものが表面に存在すると考え、この理論式からのずれを電界増倍係数 β を導入することにより評価する。電極の材質、形状、表面処理によって β 値はさまざまに変化する

るが、直流電圧下では通常 150~350 程度となることが報告されている。⁸⁾

3.1 実験装置

高電圧特性の評価に使用する直流高電界試験装置^{9), 10)}の全体図を図1に示す。さまざまな材質や表面処理の違いによる高電圧特性の変化を研究するために、電極部はアノード、カソードともに交換可能である。

図2に電極部の拡大図を示す。電極の形状は、カソードが直径 48mm の円柱の角を R15mm で丸めたもの、アノードは直径 48 mm の半球形である。電極はマイクロメーターヘッドにより真空中を可動し、0~2cm の範囲で電極間距離を変えることにより、さらに高い電界強度 (~数十MV/m) の実験をおこなうことができる。したがって、実際の高周波空洞のような高い電場勾配の再現が可能である。アノード側が半球形となっているのはアノードを稼働させたときに軸が垂直からずれても電界分布にあまり影響がないようにするためである。

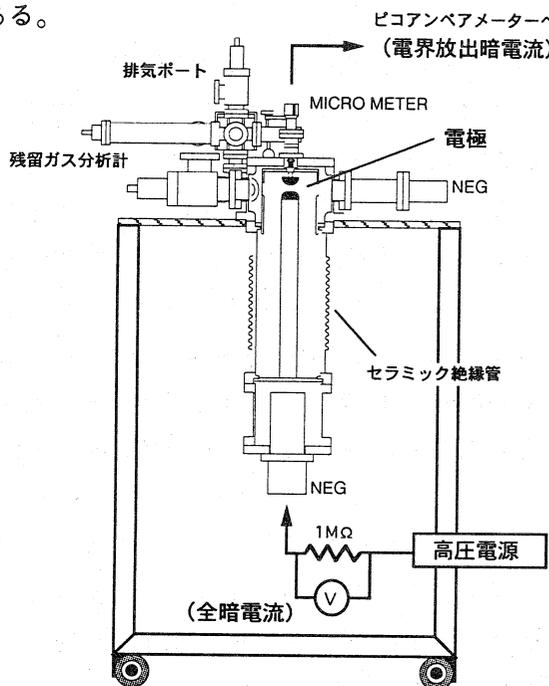


図1 超高真空・直流高電界試験装置

カソードからの電界放出電流は、アースと絶縁されたアノードにより受けとめられ、これをピコアンペアメーターにより測定する。

3.2 電極の製作

この試験装置用電極を比較のため2種類製作し実験をおこなう。表面調査用サンプルと同様のClass-1 OFHC CopperをHIP処理したものを母材として使

用、超精密旋盤加工とする。今回は銅を用いる試験としては最初のため、電極製作の前段階としてカソード型のサンプルを本番用とまったくおなじ手順で製作し、表面粗度の測定およびSEMによる表面調査をおこなう。

この調査により金属系の不純物が十分少ないと判断された場合はオゾン水洗浄により有機物の洗浄除去の効果をみる予定である。オゾン水洗浄した電極としなかった電極を用意し電界放出電流値およびβ値を比較しその洗浄効果を評価する予定である。

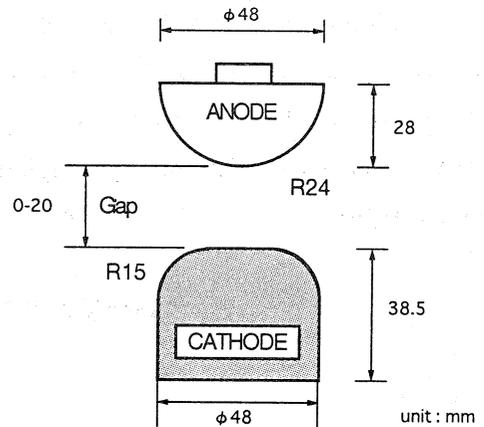


図2 高電界試験用電極

5 まとめ

現在は電極および表面調査用サンプルを機械加工により製作している段階である。製作が完了しだい洗浄、評価し、8月中に高電界試験をおこなう予定である。

参考文献

- 1) JLC Design study April 1997
- 2) M. Yoshioka et al., Proceedings of the 19th Linear Accelerator Meeting in Japan, p25-27
- 3) R. V. Latham, High Voltage Vacuum Insulation :Physical Basis
- 4) 大見忠弘, ウルトラクリーンULSI技術, 培風館
- 5) K. Asano et al., KEK Preprint 95-191 January 1996
- 6) M. Ono et al., Proceedings of the 21st Linear Accelerator Meeting in Japan, p38-40
- 7) H. Matsumoto, Proceedings of International Linac Conference 1996
- 8) R. V. Latham and N. S. Xu, Vacuum volume 42 number 18 (1991)
- 9) C. Suzuki et al., Proceedings of the 21st Linear Accelerator Meeting in Japan, p349-351
- 10) T. Nakanishi, Spin 96 Proceedings, p712-716