

[09-P05]

Reduction of Field Emission Dark Current from a Clean Copper Surface

C. Suzuki, T. Nakanishi, S. Okumi, T. Gotou, K. Togawa, F. Furuta, K. Wada, T. Nishitani, M. Yamamoto, J. Watanabe, S. Kurahashi, K. Asano¹, H. Matsumoto², M. Yoshioka², and H. Kobayakawa³

Nagoya University, Department of Physics, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8602, Japan

1) Akita National College of Technology, Electrical Engineering Department

1-1 Iijima-bunkyo-cho, Akita-shi, 011-8511, Japan

2) KEK High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, 305-0801, Japan

2) Nagoya University, Department of Materials Processing Engineering, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, Japan

Abstract

Reduction of field emission dark current is a very important subject to achieve much higher gradient in an RF-gun, accelerating structures, so on. To find a solution for this problem, we started a basic study to reduce the field emission dark current from a clean OFC copper surface under the DC high gradient. Four types of surface treatments were tested for the electrodes, and the emission dark currents were measured. The best performance was obtained from the surface made by diamond turning method, which achieved 47MV/m of surface field gradients with very low dark current level of 1nA. This dark current depends only on the surface field gradient but not on the gap length.

銅表面の清浄化による電界放出暗電流の削減

1 はじめに

次世代の高エネルギー加速器や、自由電子レーザー用の加速器など、質の良いビームをできる限り短距離で加速する必要のある加速器にとって、電子銃及び加速管の加速勾配の向上は重要な課題である。しかし、数十MV/mという高い加速電界を空洞内に安定に維持し、放電を起こすことなくRFパワーを導入するためには、電界放出暗電流をできる限り削減しなければならない。

そこで我々は、銅表面からの電界放出暗電流を削減する方法を確立し、高電界特性の優れた空洞製作を可能にするための基礎研究を開始した。どのような表面処理、洗浄方法が高電界性能の改善に効くのかを明らかにするための研究である。RF-Gun空洞や加速管の製作以外にも、クライストロンなど銅を用いた高電界デバイスに対して広く応用が可能な手段を見いだしたいと考えている。

2 実験方法と装置

電界放出暗電流削減のための実験として、4つの異なる表面処理工程を経た銅電極を製作し、

- ①走査型電子顕微鏡(SEM)およびオージェ電子分光法(AES)により表面の状態、および清浄度を評価、比較する。
- ②直流高電界試験をおこない、実際に電界放出暗電流を測定する。

という、2段階の評価をおこなった。これらの結果を踏まえて、各種処理表面の状態と高電界性能を対応させ、「どのような表面状態を生成すれば、優れた高電界性能が得られるのか」という普遍的な法則性を最終的には明らかにしたいと考えている。

①の結果については、98年度のリニアック研究会

にて報告しているが⁽¹⁾、今回は②の高電界試験において良い結果が得られたため、この結果と考察について報告する。

銅電極の高電界特性の評価には、直流高電界試験装置を使用した。この装置は、偏極電子銃用ステンレス製加速電極の高電界試験において、DC120kV印加時の暗電流を1nA以下に抑えることに成功し、偏極電子源フォトカソードの長寿命化に大きな前進をもたらした装置である⁽²⁾⁽³⁾。

今回製作した4種類の銅電極には、ダイヤモンドバイトによる超精密旋盤加工後の表面清浄化処理として、電解研磨(EP)、オゾン添加超純水洗浄(OUR)、超純水洗浄(UWR)がそれぞれ施されている。実験に使用した4種類の電極の処理工程を表1に示す。

(実験装置の詳しい説明および、銅電極の製作方法については、文献1を参照のこと。)

表1 電極の表面処理工程

表面処理	Diamond Turning	EP	OUR	UWR
① EP	○	5.1 μm		○
② EP+OUR	○	5.1 μm	30分	○
③ Turning	○			○
④ Turning+OUR	○		30分	○

超純水抵抗値 18 MΩ*cm、洗浄時間 5 minutes

オゾン濃度 : 3 ppm

3 実験結果

前述した4つの電極 ①EP、②EP+OUR、③Diamond Turning、④Diamond Turning+OURにたいする高電界試験結果を示す。

3-1 高電界性能の比較

図1は電極間距離（ギャップ）を1mmに固定し、電界強度に対する電界放出電流値を測定した結果をまとめたものである。各電極の高電界性能を、電界放出暗電流が1nAとなる表面電界強度を目安として比較する。ちなみに、電極において最も高電界が印加される面積はφ3mm程度である。

- ◎超精密旋盤加工後に超純水洗浄を施した電極は、4.7 MV/mという非常に高い到達表面電界強度を示した。
- 電解研磨後にオゾン洗浄を施すと、電界放出暗電流値が減少し、到達表面電界強度が向上した。
(1.7 MV/m → 2.4 MV/m)
- 超精密旋盤加工後にオゾン洗浄を施すと、到達表面電界強度が大幅に減少した。
(4.7 MV/m → 2.3 MV/m)

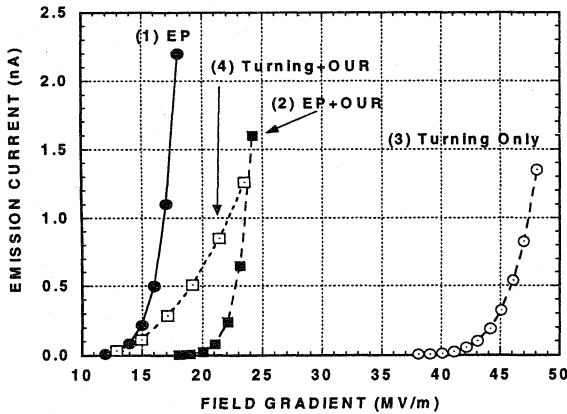


図1 電界強度に対する電界放出暗電流値（ギャップ1mm）

次に、図1の結果をFowler-Nordheimの理論式⁽⁴⁾にフィットさせ電界増倍係数 β を算出した結果を表2にまとめる。電界増倍係数 β は、理想的な金属表面からのずれを表し、 β が小さいほど高電界性能が良い。（理想的な金属表面では $\beta = 1$ となる。）

- ◎超精密旋盤加工電極において、 $\beta = 56$ という非常に低い β 値が得られた。これは銅の高電界性能としては、清浄化銅空洞のRF試験によって得られた最小値とほぼ同じレベルの値であり⁽⁶⁾、DCにおける対向電極型試験の β 値としては、我々の知る限り最も小さい値である。

- 電界研磨後にオゾン洗浄を施すことにより高電界性能が向上し β 値も減少した。（ $\beta = 357 \rightarrow 137$ ）
- 超精密旋盤加工後にオゾン洗浄を施すと、高電界性能が劣化し β 値も増加した。（ $\beta = 56 \rightarrow 790$ ）

表2 各電極の高電界特性のまとめ（ギャップ1mm）

	表面処理	Field Gradient @ 1 nA	Beta
①	EP	1.7 MV/m	357
②	EP+OUR	2.4 MV/m	137
③	Turning Only	4.7 MV/m	56
④	Turning+OUR	2.3 MV/m	790

3-2 ギャップ変化による高電界性能の変化

ギャップ長を0.5mm~3.0mmの間で変化させ、それぞれのギャップにおける電界放出電流値を測定した。ギャップ長を変えることによって、表面電界強度を一定に保ったまま、電極間に印加される全電圧を変えることができる。つまり、全電圧の大きさが暗電流値におよぼす影響を評価することができる。

例：4.8 MV/m → ギャップ1.0mm、全電圧4.8 kV
 ギャップ0.5mm、全電圧2.4 kV

測定された電界放出電流特性の例として、電解研磨と超精密旋盤加工電極の結果を図3に示す。Fowler-Nordheimの理論式によれば、電界放出電流値は、表面電界強度のみによって決まり、電極間に印加される全電圧の大きさには影響を受けないはずである。しかし図3の結果から、①EPでは暗電流値が表面電界強度では決まらずに、全電圧の影響を大きく受けていることがわかる。（電圧が高くなるにつれて、暗電流値が増加している。）よって、電解研磨電極では、電界放出電子以外の暗電流成分が電極間に流れていると考えられる。

一方③Turningの結果では、全電圧の影響はほとんどなく、表面電界強度によって電界放出暗電流値が決定されている。つまり、③Turningでは、Fowler-Nordheimの式で規定される理想的な金属に近い表面が生成されたことがわかる。

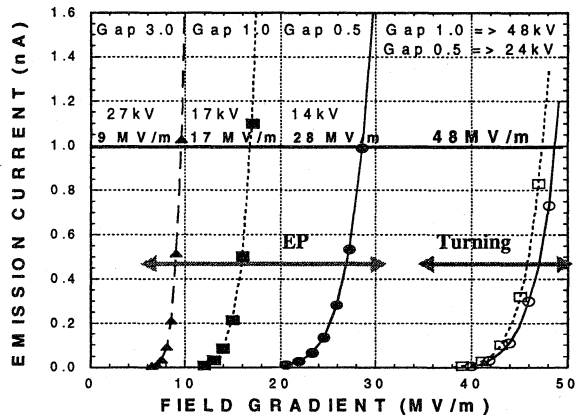


図2 電界研磨とダイヤモンドバイト加工の電界放出暗電流特性

次に、各ギャップ長において測定された表面電界強度—電界放出電流値特性を、Fowler-Nordheimの理論式にフィットさせ、それぞれの電界増倍係数 β を算出した結果を図3にまとめる。暗電流値が全電圧の影響を受けるのならば、ギャップ長が大きくなるほど高電界性能は劣化し、これにつれて β 値は増加するはずである。そこで、ギャップ長を0.5~3.0mmの間で変化させたときの β 値変化($\Delta\beta$)を各電極について評価すると、次のような特徴が見られた。

- ◎超精密旋盤加工および超精密旋盤加工後オゾン洗浄を施した電極では、ギャップ長を増加させても暗電流値の増加は見られなかった。（ $\Delta\beta = 0$ ）

- 電解研磨では、ギャップ長を大きくした時の電界放出暗電流の増加が最も激しかった。

($\Delta\beta = 418$)

○電界研磨後にオゾン洗浄を施すと、ギャップ長を増加させた時の電界放出暗電流値の増加量が減少した。
($\Delta\beta = 418 \rightarrow 64$)

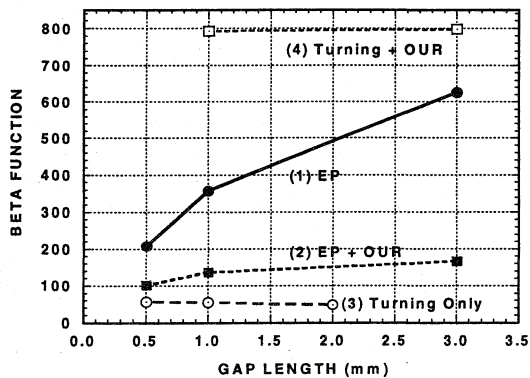


図3 電極間距離を変化させた時の電界増倍係数の値

4 実験結果の考察

ここでは、なぜ超精密旋盤加工では全電圧効果があられず、表面電界強度のみによって暗電流値が決まり、電解研磨では全電圧効果が大きくあらわれたのかについて考察する。

4-1 2次イオン電流の発生

全電圧効果は、

- ①カソードから放出した電子がアノードへ衝突。
 - ②電子衝撃により発生したイオンが電極間電界によって加速。(イオンが得るエネルギーは全電圧に比例。)
 - ③対向電極への衝突により2次電子および2次イオンを生成する効果と考えることができる⁽⁴⁾。
- そこで、4種類の電極に対して、電界放出暗電流増加時の真空度変化をまとめた(図4)。それぞれの電極についての傾向は以下の通りであった。

◎Turning、Turning+OURでは、真空度変化が測定されない。

●EPがもっとも真空度の悪化が激しい。

○EP+OURでは、真空悪化の度合いが約1/5に減少する。

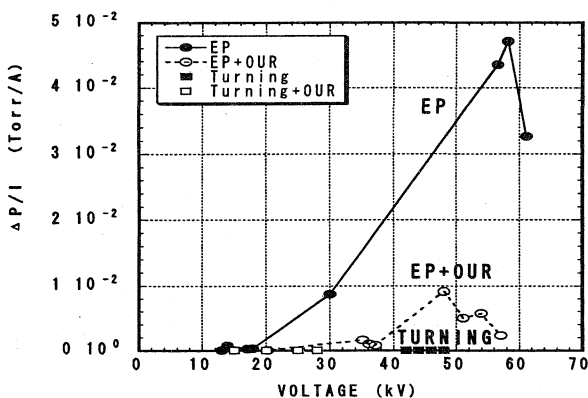


図4 各種表面処理電極の単位カレントあたりの真空度変化

この結果により、真空度の悪化とギャップを変えたときの β 変化($\Delta\beta$)とに相関関係があることが明らかとなった(表3)。つまり、全電圧の効果を大

きく受ける電極表面は、確かに電子やイオンの入射による2次粒子発生が多いと考えられる。一方、真空度悪化の見られない超精密旋盤加工後の表面は、暗電流増加時の2次イオン電流がほとんどないため、全電圧効果を受けなかったと推測される。

表3 電圧の効果と真空度変化の相関

表面処理	全電圧効果 ($\Delta\beta$)		真空度変化 ($\Delta P/I$)	
EP	大	418	大	4.8×10^{-2}
EP+OUR	減少	64	減少	1.0×10^{-2}
Turning	なし	0	なし	0
Turning+OUR	なし	0	なし	0

4-2 酸化膜からの解離分子

超精密旋盤加工と電界研磨で、このような2次粒子発生率の違いの出る原因のひとつとして酸化膜の性質が上げられるのではないかと推測している。

EP後の表面ではOH基のある酸化膜が表面に形成されることが指摘されており、これが電子衝撃やイオン衝撃によるエネルギーを得てCuOに変化する際にH₂O解離分子が生じる。⁽⁶⁾



27kcal/mol (約1.2eV)

この解離分子の発生が、暗電流増加時の真空度悪化およびそれにとまなう2次電流の増加をもたらした可能性がある。また、オゾン洗浄後の表面にはCuOが生成されることが報告されている⁽⁷⁾。この酸化膜成分の変化Cu(OH)₂→CuOによって、EP+OURでは真空悪化の原因となるCu(OH)₂成分が減り、2次イオン電流が減少したため、高電界性能が向上したと考えられる。一方、Turning、Turning+OURでは、EP処理は施していないため、Cu(OH)₂は表面に存在しないと考えられる。これによりEP、EP+OURで見られたような真空度変化および全電圧効果は見られなかったのではないかと推測している。

5 まとめ

超精密旋盤加工により、全電圧効果を受けずに、表面電界強度のみで高電界特性が決まる、理想に近い金属表面を得ることにはじめて成功した。また、電界放出暗電流には、電界放出電子成分とイオンカレント成分とがあり、ギャップを変化させることにより、イオンカレント成分の影響の過多を評価することが可能であることを示した。

参考文献

- 1) C. Suzuki et al., Proceedings of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, p133-135
- 2) JLC Design study, KEK Report 97-1, p36-48
- 3) C. Suzuki et al., Proceedings of the 21st Linear Accelerator Meeting in Japan, p349-351
- 4) R. V. Latham, 'High Voltage Vacuum Insulation'
- 5) H. Matsumoto, Proceedings of the International Linac Conference 1996, Geneva, p626-630
- 6) 金属表面物性、槇書店
- 7) 永井康陸、浅野清光、真空、38 (1995) 278-281