

[F16p07]

## Reduction of Field Emission Dark Current from Copper surface Studied for Fabrication of RF-gun cavity

C. Suzuki, F. Furuta, T. Nakanishi, S. Okumi, T. Gotou, K. Togawa, H. Ida, K. Wada  
K. Asano<sup>1</sup>, H. Matsumoto<sup>2</sup>, M. Yoshioka<sup>2</sup>, and H. Kobayakawa<sup>3</sup>

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

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

### Abstract

The field emission dark current is a most serious problem for a long lifetime operation of a photocathode-type RF-gun. To find a solution for this problem, a plan to construct an RF-gun cavity with an extremely low dark current has been started as an international collaboration of CERN / KEK-Nagoya / SLAC. As a part of this collaboration, we started a study to reduce the dark current from a clean OFC copper surface at the DC voltage for a basic study. Two types of surface treatment were done to the electrodes, and the emission dark currents were measured under high field gradients up to 30MV/m. By the first test of electro-polished electrodes, field gradient was increased up to 17MV/m with dark current level below 1nA. The field gradient could be increased up to 24MV/m with the same dark current level by rinsing the same sample with OUR. The usefulness of OUR are also confirmed from a surface analysis which showed impurities (C, P and Cr) of the first sample were removed by OUR treatment.

### 超低暗電流 RF-GUN空洞実現に向けた、銅表面からの電界放出電流の削減

#### 1 はじめに

高周波加速型電子銃 (RF-gun) は従来の直流電圧型電子銃よりはるかに短い加速距離で電子ビームを相対論的エネルギー領域へと加速することができる。このため、電子の空間電荷力によるビームの発散を極力抑え、高輝度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可能な電子源として、次世代高エネルギー加速器や自由電子レーザー用の入射器として世界各地で開発研究が進められている。

我々のグループは、このRF-gunにさらに偏極電子生成機能を持たせた“Polarized RF-gun”を開発することを目標にCERN, SLACとの国際共同研究を開始した。高い偏極度を有した電子ビームを生成するためには、フォトカソードとしてGaAs系の半導体表面に負の電子親和性 (NEA) を持たせた結晶を使用する必要がある。しかしこのNEA状態は、表面汚染に対してきわめて敏感であり、清浄な真空環境が得られなければ、すぐに偏極電子を取り出すことが不可能となってしまう。直流電圧型の偏極電子銃では、加速電圧100kV印可時 (加速勾配5MV/m) に真空度を $10^{-11}$  Torr台に保ち、10nA以下の暗電流が達成されなければ、実用に耐えうるだけのフォトカソードの寿命が得られないことがわかっている<sup>(1)</sup>。RF-gunでは加速勾配が100MV/mにも達するため、フォトカソードにとってさらに過酷な状況となることが当然予測される。高電界下において電界放出暗電流の増加や微少放電の発生は、電子衝撃による真空度の悪化や、半導体表面へのイオンボンバードメントを引き起こし、NEA表面状態の劣化、量子効率の低下を招

き、最悪の場合はカソードそのものが使用不可能となる。このため、Polarized RF-gunでは優れた高電界特性を持った銅の加速空洞を作り、放電や暗電流を十分に抑制しうるか否かが実用化の成否の鍵を握っている。

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、洗浄方法が高電圧性能の改善に効くのかを明らかにし、実際のRF-Gun空洞の製作以外にもクライストロンや加速管などの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 電界放出暗電流の原因と削減方法

理想的な金属表面からの電界放出暗電流は、強電界により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<sup>(2)</sup>。しかし、実際には理想の場合よりも遥かに低い電界強度から電界放出暗電流は観測される。これは表面に何らかの電界を増倍するものが存在すると考え、理論式からのずれを電界増倍係数 $\beta$ を導入することにより高電界特性を評価する。電極の材質、形状、表面処理によって高電界特性はさまざまに変化するが、直流高電界下での銅表面は十数MV/m程度の電界強度で $\beta$ 値は150~350程度となることが報告されている<sup>(3)</sup>。高電界性能を著しく劣化させる原因として、高電界デバイスの表面に他の金属や絶縁性不純物が存在する

と、それらが電子放出点となることが報告されている<sup>(2)</sup>。このため表面を出来る限り清浄化する必要がある。実際に、我々のグループはステンレス電極に対して材質、研磨、洗浄にわたって徹底した不純物の排除をおこない、高電圧特性の改善に成功している<sup>(4)</sup>。銅はステンレスよりも軟らかく、製作時に不純物の埋め込みや、切削油などによる炭素系の汚染を受けやすいため、さらに注意が必要である。そこで、銅に対しても高電界特性を改善するため、実験方法として次に示すような2段階の評価を行った。

- 1: 各種処理を施した銅サンプルにたいして、走査型電子顕微鏡(SEM)およびオージェ電子分光法(AES)により表面の清浄度を評価、比較する。
- 2: 直流高電界試験用の銅電極を製作し、実際に電界放出暗電流を測定することにより各種表面の高電圧特性を評価する。

### 3 加工および表面処理

実験用のサンプルおよび電極の素材は、クラス1無酸素銅(純度99.996%)にHIP(Hot Isostatic Pressing)処理<sup>(5)</sup>したものを使用した。HIP処理は、切削油が粒界の隙間にしみ込み、高電界特性が劣化するのを防ぐために施した。機械加工はダイヤモンドバイトによる超精密旋盤加工をおこない、表面粗度  $Ra=0.05\mu\text{m}$  を達成している。表面処理として、超純水洗浄(UWR)、オゾン添加超純水洗浄(OUR)、電解研磨(EP)を採用した。実験に使用したサンプルおよび電極の各種処理工程を表1に示す。

表1: 表面処理の工程

Sample No.	Diamond Turning	EP	OUR	UWR
0: UWR	○	→	→	○
1: EP	○	5 $\mu\text{m}$	→	○
2: EP+OUR	○	5 $\mu\text{m}$	30分	○

UWR: 18 M $\Omega$ ·cm, 5 minutes      OUR: 3 ppm

### 4 オージェ電子分光法による表面分析

上記3つのサンプルに対して、オージェ電子分光法による表面の残留不純物分析をおこなった。これは、高電界特性と表面状態との関係をあきらかにするためである。図1に分析の結果を示す。

超精密旋盤加工では、機械油の残留をできるかぎり減らすためにエタノールによる切削加工をおこなったが、それでもなおこの表面分析では大きな炭素ピークが見られあまり清浄な表面は得られていないことが分かる。

電解研磨後では、炭素ピークの減少が認められるが、研磨液の成分であるP、Crといった成分が表面に残留していることが分かった。

オゾン洗浄後では、炭素ピークはほとんど確認出来ないほどまで小さくなり、さらに研磨液の残留成分まで除去されていることが分かった。

これらの表面が実際の高電界特性にどのように影響するかを次のステップで検証する。

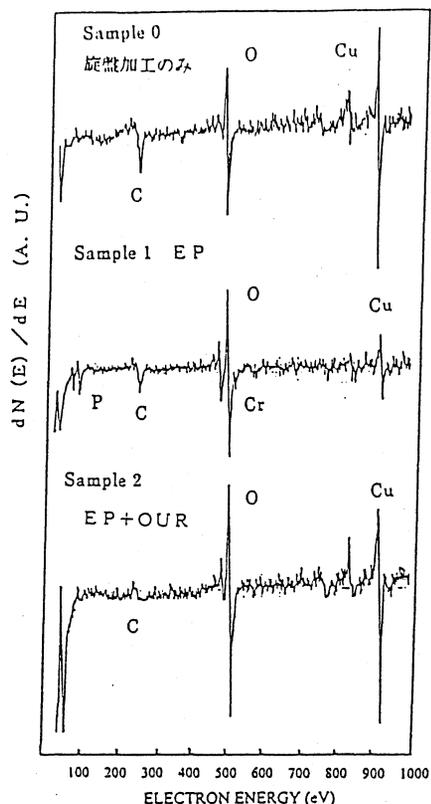
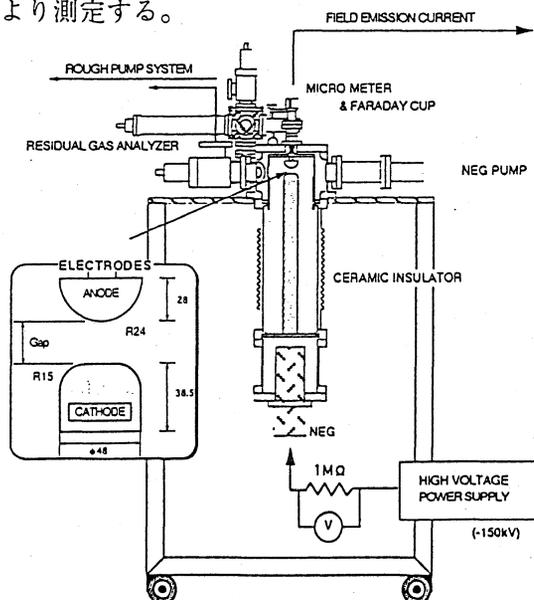


図1 オージェ電子分光による表面分析結果

### 5 高電界試験装置

高電圧特性の評価に使用する直流高電界試験装置<sup>(4)</sup>の全体図及び電極形状を図2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。また、電極間距離が可変であるため、実際の高周波空胴のような高電界強度(～数十MV/m)での実験をおこなうことができる。カソードからの電界放出暗電流は、アースと絶縁されたアノードにより受けとめられ、これをピコアンメーターにより測定する。



電極間距離	0~20mm	到達真空度	8x10 <sup>-12</sup> Torr
印可電圧	<-150kV	電流分解能	~1pA

図2 高電界試験装置図

## 6 高電界試験結果

最初の試験は電解研磨のみを電極に施し（表1のサンプル1と同処理）、2度目は同じ電極にさらにオゾン洗浄をおこない（サンプル2と同処理）、電界放出電流値の測定をおこなった。図3が測定結果であり、表面へ印可される電界強度を上昇させていった時の電界放出暗電流値を表している。電極間に印可される電圧の効果を調べるために電極間距離を3.0, 1.0, 0.5mmに変化させて測定している。図4はこの結果をFowler-Nordheimの式により評価したF-N plotであり、このグラフより電界増倍係数を算出した。

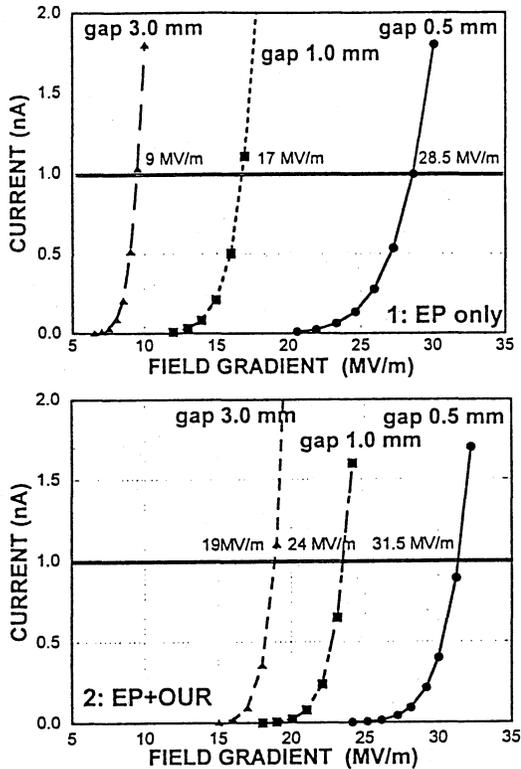


図3 表面電界を上昇させたときの電界放出電流値  
(上：電解研磨のみ 下：電解研磨+オゾン洗浄)

電界放出暗電流値が1nAとなる電界強度を比較してみると、ギャップ1mmのとき電解研磨のみでは17MV/mだがオゾン洗浄後には24MV/mへと高電界特性が改善され、電界増倍係数も $\beta=357$ から $\beta=137$ へと大幅に減少しており、オゾン洗浄による高電界特性向上の効果は明白である。表面分析によりオゾン洗浄後では、非常に清浄な表面が達成されていることが確認されており、この効果により高電界特性の改善が達成されたと考えられる。

図5は電極間距離を変えたときの $\beta$ 値の変化をプロットしたものである。電解研磨のみでは電極間距離を大きくしたとき、 $\beta$ 値もこれにつれて大きくなるが、オゾン洗浄後は $\beta$ 値があまり変化していないことがわかる。電極間距離が大きくなるほど、電極間に高い電圧が印可され、高いエネルギーを持った粒子が対向電極に入射するようになるため、電極への条件は過酷なものとなる。それにもかかわらず、オゾン洗浄後に $\beta$ 値が余り変化

しないようになるのは、電解研磨のみの時よりも高電圧に対して安定な表面が形成されていることを示唆している。

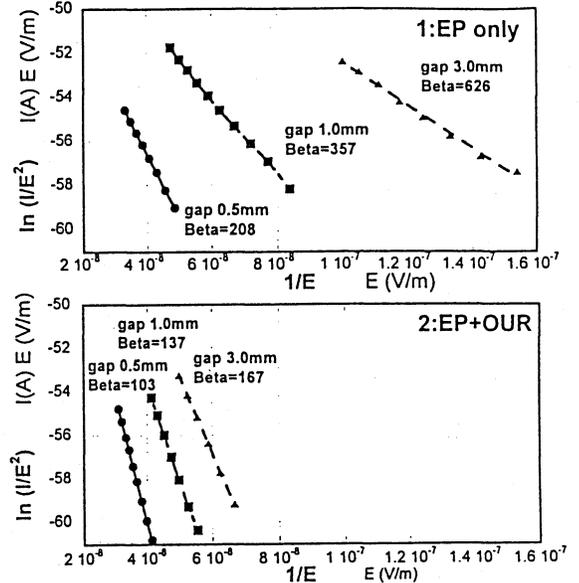


図4 電界放出電流のFowler-Nordheimプロット  
(上：電解研磨のみ 下：電解研磨+オゾン洗浄)

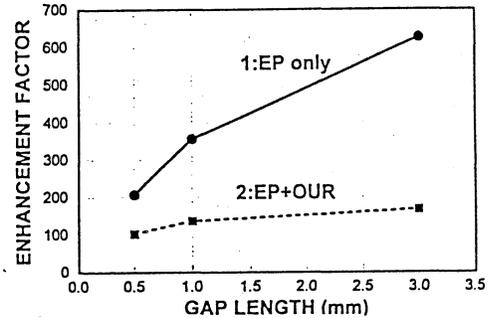


図5 電極間距離と電界増倍係数の関係

## 7 まとめと今後の指針

今回の実験では、電界研磨後にオゾン洗浄をおこなうことによりギャップ1mmのとき1nAレベルの電界放出暗電流値となる電界強度を17MV/mから24MV/mへと向上させ、電界増倍係数 $\beta$ を357から137へと減少させることができた。またオージェ電子分光法による表面分析では、オゾン洗浄後に炭素系の汚れのほとんどない非常に清浄な表面が達成されていることが確認された。今後は、比較のため超精密旋盤加工のみの電極と、これにオゾン洗浄を施した銅電極でさらに試験をおこなう予定である。また、チタン電極での試験の準備も現在進めており、さまざまな材質の高電界特性評価をおこなっていく予定である。

### 参考文献

- 1) T. Nakanishi et al., Proceedings of Spin96, September 6-7, 1996, Amsterdam, p712-716.
- 2) R. V. Latham, 'High Voltage Vacuum Insulation'
- 3) R. Latham and N. Xu, Vacuum volume 42 (1991), 1173-1181
- 4) JLC Design study April, p36-48
- 5) H. Matsumoto, Proceedings of the International Linac Conference 1996, Geneva, p626-630.