

REDUCTION OF DARK CURRENT BY AN ELECTRODE WITH MOLYBDENUM CATHODE AND TITANIUM ANODE

F. Furuta^{1,A)}, S. Okumi^{A)}, T. Nakanishi^{A)}, T. Gotou^{A)}, M. Yamamoto^{A)}, M. Miyamoto^{A)},
M. Kuwahara^{A)}, N. Yamamoto^{A)}, K. Naniwa^{A)}, K. Yasui^{A)}
H. Matsumoto^{B)}, M. Yoshioka^{B)}, K. Togawa^{C)}

^{A)} Department of Physics, Nagoya University, Nagoya 464-8602

^{B)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba 305-0801

^{C)} SPring-8/RIKEN, 1-1-1 Kouto, Sayo 679-5148

Abstract

A series of dark current measurements using two kinds of electrodes made of Molybdenum (Mo) and Titanium (Ti) have been done. A new analysis method is thought out to separate the primary field emission current from the observed dark current. The analysis shows that the primary field emission current from cathode surface is quite small for Mo surface, and the enhancement effect is small for Ti surface. From this analysis, it is strongly suggested that Mo is most suitable material for cathode and Ti for anode. This is verified by experiment using an electrode with Mo cathode and Ti anode, by which the field gradient of 130MV/m is achieved with total dark current below 1nA at gap separation of 0.5mm.

モリブデンカソードとチタンアノードを用いた電界放出暗電流の削減

1. はじめに

電子銃、クライストロン、加速管、RF空洞などの高電界デバイスにおいて、また超低エミッタンスビーム生成やより高い電界の実現とその安定性の改善を目指す上で、金属表面からの電界放出暗電流の削減が求められている。暗電流の増加は初期放電、真空度悪化、さらには真の放電を引き起こすなど、機器に致命的なダメージを与える恐れがあるためである。

我々は暗電流の削減とメカニズムの解明を目指しKEKに小型の直流高電界試験装置を設置し、ステンレス鋼、銅、チタン(Ti)、モリブデン(Mo)表面からの暗電流測定を行った。その中で、(1)暗電流の大きさは電極の材質や性質、表面処理に強く依存すること^[1]、(2)測定される暗電流にはFowler-Nordheim理論に説明される「電界放出電流」のみではなく、それに誘発される「増幅電流」も含まれることなどを確認してきた。

今回、我々の測定データに対し独自の解析を行い、暗電流から増幅電流の影響を取り除いた電界放出電流の抽出を行うことが出来た。さらに、その結論に基づいて作成したMoカソードとTiアノードからなる電極の高電界試験を行った。それらの結果について報告する。

2. 実験装置と電極作成

直流高電界下(～200MV/m)における電界放出暗電流の基礎研究用に作製された高電界試験装置の概要と電極形状を図1に示す。チェンバー材質に超清

浄ステンレス鋼(NK-CleanZ)を用いるなど、徹底した装置の清浄化がなされており、ベーキング後の到達真空度は 6×10^{-12} Torrである。

表面電界強度は電極間距離(gap幅:0.5～20mm)と印加電圧(0～-100kV)によって調節でき、電界強度は同じであるがgap幅は異なる条件下での暗電流測定が行える。電極間で発生しアノード側に流れた暗電流は微小電流計(分解能:1pA)によって測定される。

電極に関して、Ti電極はJISグレード2の純チタンを表面バフ研磨したもの、Mo電極は単結晶高純度モリブデン(純度5N)を超合金バイト切削後にダイ

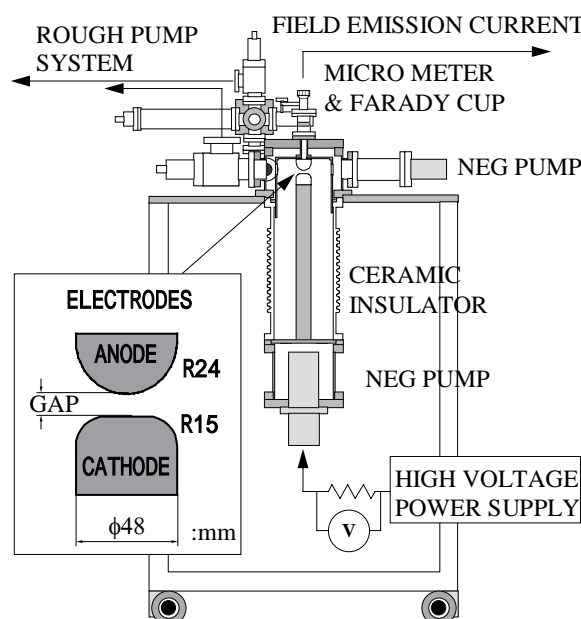


図1：直流高電界試験装置

¹ E-mail: furuta@spin.phys.nagoya-u.ac.jp

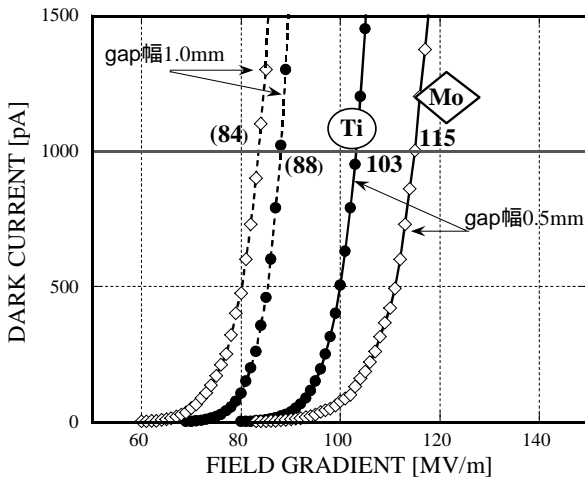


図2：暗電流測定結果
数値は暗電流1nAに対応する電界強度
()内はgap幅1.0mmの時の値

ヤモンドペースト研磨をしたものに、最終洗浄法としてどちらも高圧超純水洗浄を施して試験した。

3．暗電流のgap幅依存性

図2にTi、Mo電極のgap幅0.5mm（実線）と1.0mm（破線）における暗電流測定結果を示す。gap幅を広げると共に暗電流が増加していることが分かる。電界強度80~83MV/m付近の暗電流値を比較すると、Tiでは1pA程度であったのが100pA以上に、Moでは1pAから1nA近くまで増えている。また、gap幅が狭い時にはMoの方がTiよりも高い電界強度まで暗電流を低く抑えられるものの、gap幅を広くした時には逆にTiの方がMoよりも暗電流は小さくなる。

測定される暗電流にgap幅依存性が表れる原因は本来の「電界放出電流」成分の他に、それを源とした、電子やイオンの電極表面衝撃によって誘発される「増幅電流」成分が加わるためと考えられる。

Fowler-Nordheim (FN) 理論で説明される電界放出電流は金属表面の電界強度のみで大きさが決まるが^[2]、増幅電流の大きさには、印加電圧と金属の持つ二次電子放出係数やイオンスパッタ率が影響する。gap幅を広げると電界強度を同じにするには印加電圧を増やす必要がある。このとき電極に衝突する電子やイオンのエネルギーが増大するため誘発される二次粒子も増えて増幅電流成分が大きくなると考えられる。表1に既に知られている二次電子放出係数やイオンスパッタ率の大きさを示したが、MoはいずれもTiより大きな値をもち、結果として大きな増幅効果を持つと予想される。

表1：二次電子放出係数と
600eVのAr⁺イオン入射に対するスパッタ率

	Ti	Mo
Secondary electron yield	0.9@280eV	1.25@375eV
Sputtering rate (atoms/ion)	0.58	0.93

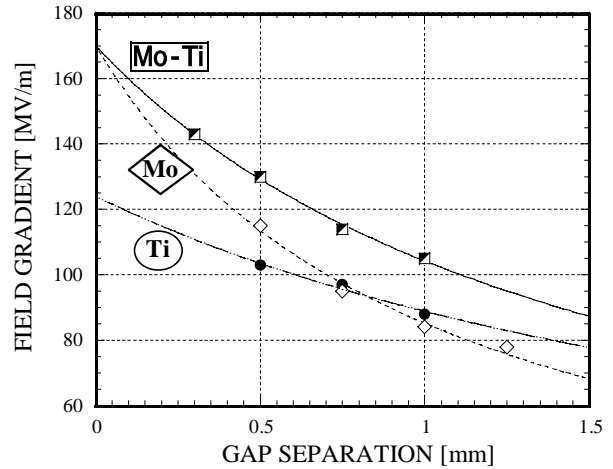


図3：電界強度 vs. gap幅
暗電流1nAに対応する電界強度

4．電界放出電流の抽出

電界放出暗電流の増幅効果は、電界強度はそのままにし、gap幅を狭めて印加電圧を小さくすることによって無視できるようになると考えられる。これを利用して電界放出電流成分の抽出を行う方法を考案した。図3は、TiとMo電極の暗電流1nAに対応する電界強度とgap幅の関係をプロットしたものである。Moカソード+Tiアノード電極 (Mo-Ti) による実験結果も併せて示したがそれについては後に触れる。

図3のgap幅依存性を次式で近似し、増幅効果が無いとみなせるgap幅0mmへの外挿を行う。

$$E_i(d) = E_{oi} / (1 + \alpha \cdot d) \quad \dots (1)$$

ここで、 d はgap幅[mm]、 $E_i(d)$ はgap幅 d mmで暗電流 i Aに対応する電界強度[MV/m]、 E_{oi} は $d=0$ の切片、は物質と表面状態に依存する定数で、増幅傾向[1/mm]を表す。

gap幅0mmでの全暗電流は電界放出暗電流に等しい。従って図3で求めた切片は、カソード表面からの電界放出電流が1nAに達する電界強度を意味しており、今回試験したTi、Mo電極に対しては、それぞれ124MV/m、170MV/mという結果が得られた。

1nA以外の暗電流レベルに対しても同様のプロットと外挿を行い、gap幅0mmの切片をそれぞれ求め電界強度と電流値の関係として図4にプロットした。Moが電界放出電流を高い電界強度まで低く抑える点でTiより優れている事がはっきりとわかる。

FN理論では理想に近い金属表面からの電界放出電流密度は電界強度が同じであれば金属の仕事関数に反比例する。TiとMoの仕事関数はそれぞれ4.33eV、4.6eVであり、図4の結果と理論は矛盾しない。また、近似式(1)の妥当性はdata-fitに用いたパラメータが暗電流値によらずほぼ一定の値(Ti)=0.4±0.02、(Mo)=1.0±0.04)を持ったことにより証明されている。

これらの解析から、MoはTiよりも電界放出電流が少なくカソード材料として最適であること、またTiはMoよりも増幅効果が少なくアノード材料に適していることがそれぞれ強く示唆された。

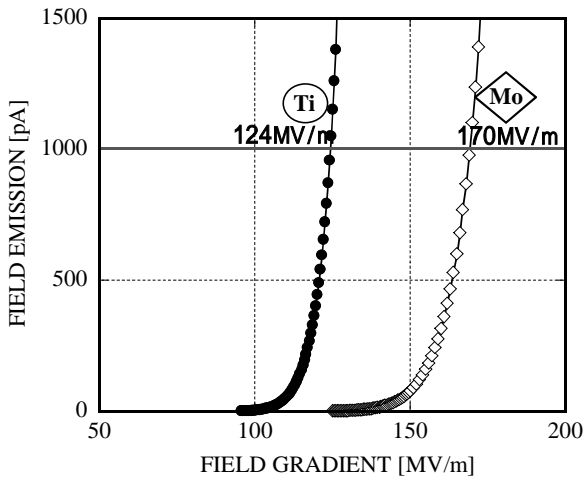


図4：抽出された電界放出電流

5. MoカソードとTiアノードによる試験

上記の示唆に基づいてカソードにMo、アノードにTiを用いた電極による暗電流測定試験を行った。その結果を図5に示す。比較のためTi、Mo電極の結果も併せて示す。アノードをMoからTiに変えることでgap幅0.5mm、電界強度115MV/mで1nAだった暗電流を、80pAと10分の1以下に削減する事に成功した。暗電流1nAに対応する電界強度で比較すると、130MV/mというこれまでで最も高い到達電界を得た。またgap幅依存性データから電界放出電流成分を抽出したところ、Mo電極の結果と一致した。暗電流1nAレベルに対する外挿結果を図3に示したが、外挿した切片がMoとMo-Tiで完全に一致している事が分かる。この一致は、我々が仮定した近似式の信頼性を示すものと言える。近似に用いたパラメータは (Mo-Ti)= 0.6 ± 0.01 であった。増幅の度合いを示す値がMo電極よりは小さいもののTi電極よりは大きいことから、増幅機構にはアノードのみならずカソード側の影響も無視できないことも分かる。

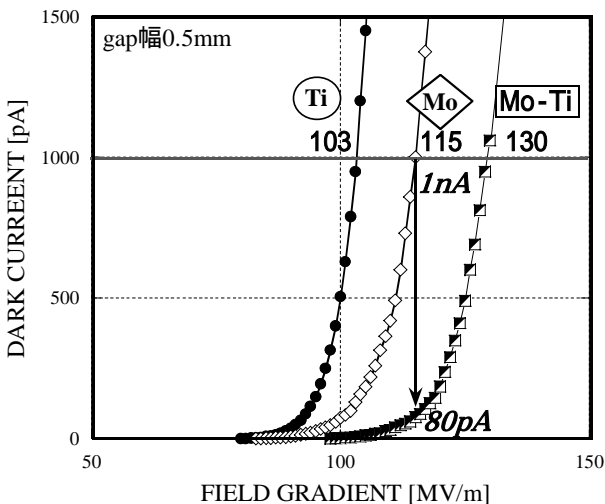


図5：暗電流測定結果
数値は暗電流1nAに対応する電界強度

6. 電界増倍係数 β

電界放出現象の理解には金属表面における局所的な電界増倍の強さを表す電界増倍係数 β も重要である^[3]。図6に暗電流測定結果をFNプロットして求めた β のgap幅依存性を示す。FN式の β にはないはずのgap幅依存性が表れているのは暗電流に増幅成分が含まれるためである。図でTiはgap幅依存性が小さくTiの暗電流には増幅成分が少ないことが良く分かる。また、gap幅0mmの β は図4の電界放出電流をFNプロットしたもので、それぞれ $\beta(\text{Ti})=22$ 、 $\beta(\text{Mo})=23$ である。この値は増幅成分を含まないので、FN式における真の β であると言える。

図6の β のgap幅依存性が直線で近似できるとすれば、実験値から求めた β のgap幅0mmへの外挿結果は、図4の結果から求めた β と良く一致する。2つの方法で求めた β が一致することは真の β の妥当性と我々の外挿法の信頼性を同時に示すものと言える。

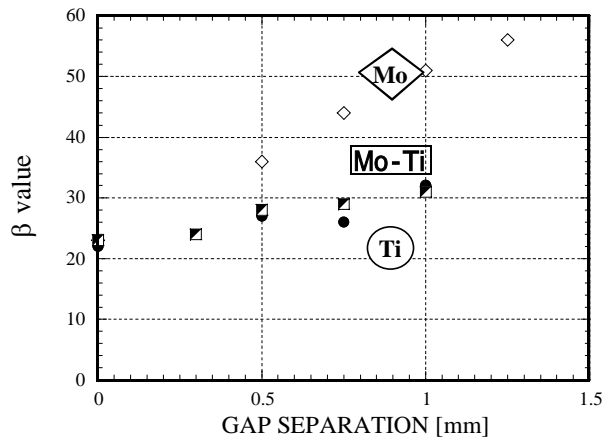


図6： β のgap幅依存性

7. まとめ

本研究において、暗電流のgap幅依存性データを解析することにより電界放出電流成分の抽出が可能であることを初めて示すことが出来た。TiとMo電極に対して、電界放出電流が1nAに達する電界強度はそれぞれ124MV/m、170MV/mであると見積もられ、また電界増倍係数 β はそれぞれ22、23が得られた。

さらにMoカソード、Tiアノードによる新しい電極により、gap幅0.5mmにおいて130MV/mまで暗電流を1nA以下に抑えることに成功した。これによってMoは電界放出電流が少なくカソード材に、Tiは増幅電流が少なくアノード材に適していることを実証できた。今後は電界増倍のメカニズムをさらに解明することが課題であると考えている。

参考文献

- [1] C. Suzuki et al., Nucl. Instr. and Meth. A 462 (2001) 337
- [2] R. H. Fowler and L. Nordheim, Proc. Roy. Soc. A 119 (1928) 173
- [3] R. V. Latham, High Voltage Vacuum Insulation: The Physical Basis, Academic Press London, 1981, Chap.2.