

[P 1–35]

D.C. High Voltage Test of Stainless Steel Electrodes for a Polarized Electron Gun

C. Suzuki, T. Nakanishi, S. Okumi, M. Tawada, K. Togawa, C. Takahashi
H. Matsumoto¹, M. Yoshioka¹, Y. Takeuchi¹, and K. Nishitani²

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

1) National Laboratory for High Energy Physics 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

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

Abstract

In order to keep a high quantum efficiency in a GaAs type polarized electron gun, it is required to keep a ultra high vacuum and to achieve a very low dark current during a high voltage operation. A D.C. high voltage test system was constructed to study these subjects using an electrodes with simple shape. The electrodes were made by a ultra-clean stainless steel to eliminate impurities on its surface. The surface treatment and the rinsing methods were also selected carefully to make the surface as clean as possible. In the experiment, no field emission current was observed from a 1 cm gap electrodes up to -120kV of operation voltage, which correspond to the electric field gradient of 11MV/m. The maximum field gradient was increased up to 34MV/m, where the field emission current of 88 pA was observed from the cathode surface, and the field enhancement factor obtained from the Fowler Nordheim plot was 40.

偏極電子源用ステンレス電極の直流高電圧印可試験

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、 $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ 近いルミノシティが必要である。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)。また、リニアコライダーでは、偏極電子ビームを減偏極させることなく加速できるということが、素粒子実験の際に大きな武器となりうる。偏極電子ビームの有用性は、SLCでのWeinberg Angle 精密測定より明らかである。²⁾ 次世代のリニアコライダーが目指す 500GeV~1TeV のエネルギー領域では、超対称性粒子の探索をはじめ、さまざまな物理的に重要な実験に偏極電子が大きな役割を果たすことが期待されている。¹⁾

我々のグループは、上に述べたビームパラメータを満たし、実用に耐える十分な寿命を持った高輝度偏極電子源の開発を目的に研究をおこなっている。偏極電子を生成し DC 100kV で加速する試作装置として、偏極電子源 2 号機 (NPES-2) を開発中であるが、初期の試験において、CWレーザーを照射し μA オーダーのフォトカレントを連続的に取り出したときのカソードの寿命が、数時間程度しか持たないという問題が明らかとなった。³⁾ この克服が本研究の動機のひとつである。

GaAs型フォトカソードから大電流を引き出すためには、負の電子親和性 (NEA) を持たせた結晶

表面に強い電界をかける必要があり、これにともない必然的に放電暗電流が生じる。放電暗電流の増加は、電子衝撃による真空度の悪化や、結晶へのイオンボンバードメントを引き起こし、NEA表面状態を劣化させ量子効率を低下させる。これが、フォトカソードの寿命問題であり、放電暗電流を低いレベルに抑えることは高輝度偏極電子源実用化への重要な課題である。

電極表面に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。⁴⁾ そこで我々は、この放電問題にたいする根本的な解決法を見つけるために、チェンバーの徹底した高純度化と清浄化による不純物の排除をおこない、超高真空の生成と放電暗電流の削減を追求し、得られた結果を電子源の設計、製作に還元するための装置を製作した。⁵⁾ この超高真空・直流高電界試験装置では、材質、表面処理、洗浄方法にたいして現在求め得る限りの技術を応用し、その有効性を明らかにするのが目的である。

2 実験装置の概要

この超高真空・直流高電界試験装置では、放電暗電流を極限まで削減するために、数々の新技術が導入されている。電極表面に存在する不純物を徹底的に削除するという意図のもとに、材質そのものに含有される不純物を低減させることから始め、出来る限り清浄な表面を達成するための処理を選び、施した。具体的には、チェンバーおよび

電極に対し、以下のような方法を採用した。⁵⁾

○ 材質：超清浄ステンレス鋼 NK Clean Z 材は Si, Mn, P, S, といった不純物元素の混入比を下げ、非金属介在物の表面 1mm^2 あたりの存在個数を、通常の $30\text{個}/\text{mm}^2$ から $0.3\text{個}/\text{mm}^2$ にまで低減させたステンレスである。電極表面に酸化物、炭化物、といった不純物が存在すると、高電界下で電子放出点として振る舞うため、出来る限り清浄な材質を選択した。

○ 表面処理：バフ研磨と電界溶出作用とを同時におこなう電解複合研磨は表面粗度 (R_{MAX}) で $0.1\ \mu\text{m}$ 以下と電解研磨による $0.5\ \mu\text{m}$ を上回る仕上げが達成できる。ピットには、不純物がたまりやすく高電圧特性を劣化させる原因となるため、優れた鏡面化の可能な電解複合研磨を採用した。

また、電極以外のチェンバーに対してはクロム酸化膜処理により、表面の不動態化をおこない水分子の活性化エネルギーを 0.08eV まで下げ、排気速度と到達真空度の向上を目指している。(電解研磨表面の活性化エネルギーは 0.15eV 。)

○ 洗浄：各コンポーネントに対して温超純水洗浄 (70°C , $18.2\ \text{M}\Omega \cdot \text{cm}$) をオーバーフローにておこなった。これは、活性な純水を常に使用し、溶解力の強い状態を保つためである。

○ 組立環境：埃などの再付着を防ぐため、クラス1のクリーンルームで全ての組み立てをおこなった。なお、最終洗浄も同じクリーンルーム内でおこなわれている。

超高真空・直流高電界試験装置の全体図を図1に示す。試験装置ではあるが、容積 $26\ \text{l}$ 、真空内表面積 1.1m^2 と実際の電子源と変わらない大きさを持っている。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。

電極はマイクロメーターヘッドにより真空中を可動し、 $0\sim 2\text{cm}$ 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 (\sim 数十 MV/m) での実験をおこなうことができる。したがって、偏極電子源に限らず、クライストロンや RF-GUN などのさまざまな高電圧デバイスの性能改善に向けての研究が可能である。

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、これをピコアンペアターにより測定する。

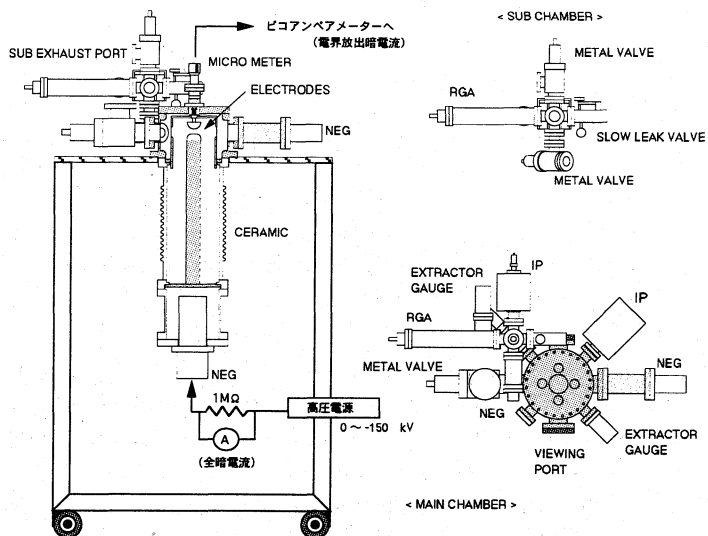


図1 超高真空・直流高電界試験装置

絶縁管漏洩電流、コロナドームから大気への放出電流をも含めた全暗電流の測定は、高圧ケーブルに直列に挿入した $1\ \text{M}\Omega$ の抵抗の両端の電圧を、高圧に浮かせたテスターで読みとる。この方法では、 0.1nA の全暗電流の測定が可能である。

電極の形状は、カソードが直径 48mm の円柱の角を $R15\text{mm}$ で丸めたもの、アノードは直径 48mm の半球形である。電極に対して、最高レベルの電解複合研磨 ($0.5\ \mu\text{m}\ \text{Al}_2\text{O}_3$ 砥粒) を施した後、SEM による表面調査により通常の電解複合研磨と比べて、十分均一で不純物のない表面が得られていることを確認した。

3 全暗電流の測定 ~直流高電圧印可試験

装置全体を 250°C でベーキング、本排気後、電極間距離を 1cm に設定し、直流高電圧印可試験を行った。 -122.5kV までセラミック絶縁管のプロセッシングをおこなった後の -120kV 安定印可試験の結果が図2である。

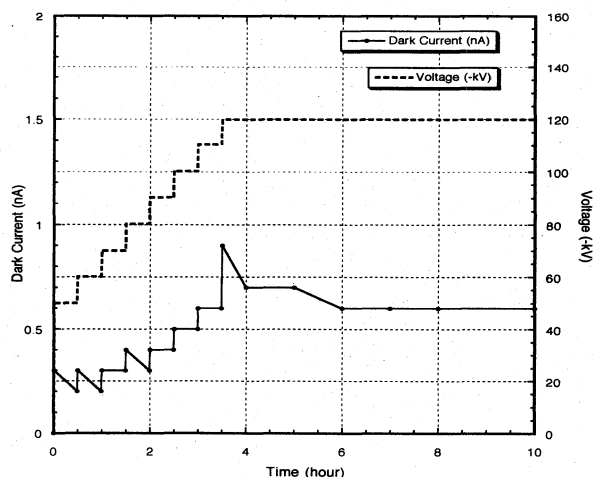


図2 120 kV gap 1 cm 安定印可試験

エクストラクターゲージによる真空度は、 3.6×10^{-11} Torr を示し、全暗電流は 0.6 nA であった。また、図3はこのときのカソード表面上の電界強度の分布をシミュレーションにより求めたものであり、最大で 11 MV/m となっている。通常、偏極電子源では NPES-2 で 5 MV/m (100 kV 印可時)、SLC の GUN で 7 MV/m (120 kV 印可時) の最大電界強度となっているが、今回の実験ではこれらを越える電界強度でも電界放出暗電流は検出されず、さらに高い電圧での安定印可が可能である。

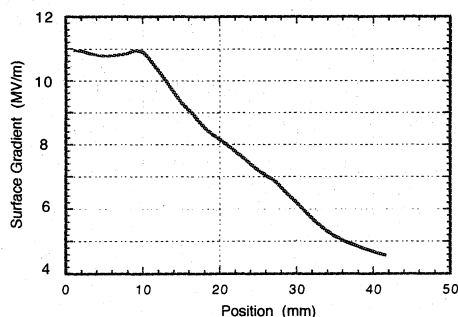


図3 カソード表面上の電界強度分布
(座標は、カソードの中心をゼロとし、半径方向をプラスにとる。)

4 電界放出暗電流の測定 ～電極特性試験

次に、電極間距離を 1 mm まで縮め電界放出電流をとらえることにより、電極の高電圧特性の測定をおこなった。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。⁴⁾ 実験においては、何らかの電界を増倍する構造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。 β 値は、電極からの電子放出のしやすさを示し、1に近いほど理想的な表面に近いと考えられ、電極の高電圧特性を表す重要な指針となる。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が、直流電圧下では通常 $150 \sim 350$ 程度となることが報告されている。⁶⁾ 仕事関数 ϕ (eV) を持った理想的な金属表面に、電界強度 E (V/m) を加えたときに観測される電流値 I (A) は、電子放出点の面積を S (m^2) とした時 Fowler-Nordheim の式によって表される。 β 値を導入し、この式を I/E^2 と $1/E$ の関係として表すと次式のようになる。

$$\log\left(\frac{I}{E^2}\right) = -6.53 \times 10^9 \frac{\phi^{1.5}}{\beta E} - \log\left(\frac{\phi}{1.54 \times 10^{-6} \times 10^{4.52\phi^{0.5}} \times S \beta^2}\right)$$

実験結果をこの式でフィットするとグラフは右

下がりの直線となり、勾配から β 値を算出することができる。

図4に、実験結果を F-N プロットによって表したものを示す。はじめに、電界放出電流を測定したときのプロットが (a) であり、さらにカレントコンディショニングを続けて3日後に得られたプロットが (b) である。 34 MV/m での電流値は、 3600 pA から 88 pA へと減少し、電界強度を 38 MV/m まで上げ、最終的に得られた β 値は 40.0 であった。

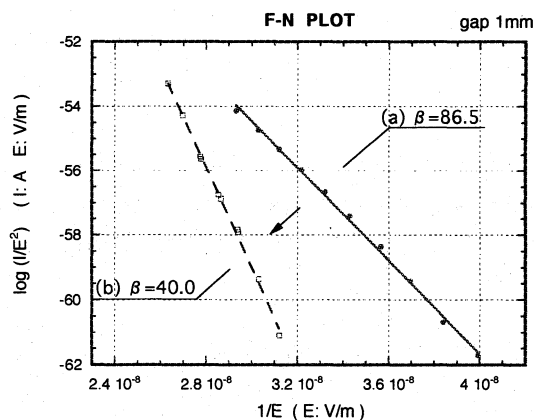


図4 F-N Plot

5 まとめ

今回の実験では、gap 1 cm 、 -120 kV (11 MV/m) において、全暗電流 0.6 nA 、真空度 3.6×10^{-11} Torr を達成した。さらに、電極間距離を縮め、gap 1 mm 、 -34 kV (34 MV/m)、の時、電界放出暗電流 88 pA 、電界増倍係数 $\beta = 40$ を得た。

これは、材質の選択からはじめた不純物の徹底した排除が十分に効果を発揮し、暗電流の絶対値を減らすことにつながっていると思われる。清浄で均一な表面を達成し、その後も汚染されることなく良い状態を保ち得たことが、暗電流放出点の増加を防ぎ、優れた電極性能を示す β 値および微少な暗電流に結びついていると考えられる。

今回の試験装置の製作で採用した方法は、すべて実際の電子銃に適用可能なものであり、将来のより高電界型電子銃実用化への指針となるはずである。

参考文献

- 1) JLC Group, KEK Report 92-16 December 1992
- 2) SLD Collaboration, SLAC-PUB-6456 March 1994
- 3) 本研究会 渡川らの発表を参照のこと
- 4) R. V. Latham, High Voltage Vacuum Insulation: Physical Basis
- 5) C. Suzuki et al., Proceedings of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan
- 6) R. V. Latham and N. S. Xu, Vacuum volume 42 number 18 (1991)