

Development of high voltage DC-gun with NEA-GaAs photocathode at Nagoya University

Masahiro Yamamoto^{1,A)}, Shoji Okumi^{A)}, Taro Konomi^{A)}, Naoto Yamamoto^{A)},
Atsushi Mano^{A)}, Akira Utsu^{A)}, Yasuhide Nakagawa^{A)}, Tsutomu Nakanishi^{A)},
Masao Kuriki^{B)}, Fumio Furuta^{B)}, Hiroshi Matsumoto^{B)}, Masakazu Yoshioka^{B)}

^{A)} Graduate School of Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya city, Aichi, 464-8602

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

High voltage DC electron guns using NEA-GaAs type photocathode are required to deliver a high bunch charge ($>6.4\text{nC}/1\text{ns}$) polarized electron beam for ILC and a low emittance ($\epsilon_{n,rms} < 0.5 \pi\text{-mm-mrad}$) beam for ERL. In order to suppress the field emission dark current across the gap between cathode and anode, a new pair of electrode (Mo-cathode and Ti-anode) for a 200 kV DC-gun was fabricated and it gave the much better high voltage performance than that made of stainless steel. As a result, a long stable operation at 200kV or a little bit higher bias voltage becomes possible. The details of such technical development are described in this paper.

NEA GaAs型フォトカソードを用いた低エミッタンス電子源開発の現状

1. はじめに

国際リニアコライダー計画(ILC)では、スピン偏極電子の利用は暗黒物質の候補とされる超対称性粒子の探索等に威力を発揮すると期待されており、基本設計書(RDR)では、電子源において1バンチ($\sim 1\text{ns}$ 幅)あたり約 6.4nC 、偏極度80%以上のマルチバンチビームが必要とされている。

また次世代放射光源計画(ERL)においても、電子源において低エミッタンスビーム($<0.5 \pi\text{-mm-mrad}$)の生成が必須であり、初期エミッタンスを小さく抑えられるNEA-GaAs型フォトカソード^{[1][2]}を用いた電子源開発は最も重要な課題の一つとなっている。

これらの電子銃開発に共通する現在の課題は、①高電圧・高電界環境下における電極間暗電流の低減化($<10\text{nA}$)、②NEA表面維持のため電子銃の極高真空化($\leq 10^{-10}\text{Pa}$)を図る事である。この2つの課題解決が実用機実現のための必須条件であるが、世界的に見ても特に平均電流の大きい($>$ 数mA)ERL用直流高電界型低エミッタンス電子銃の開発は未だ途上の状況にある。^[3]

2. 電子銃および周辺装置^[4]

本稿で報告する電子銃は、我々がこれまでリニアコライダー用偏極電子源として開発してきた図1に示す200keV電子銃である。

この電子銃の特徴は、ロードロック付き偏極電子源として世界最高レベルの高電圧印加が可能であり、

電子銃の高電圧部は2部の罫子より構成されている点にある。高圧電源(ニチコン製:最大出力250kV,1mA)は2つの罫子の中央部に接続され、罫子中央の内側よりカソード電極支持のためのステンレス製の管が伸び、先端にClean-Z材で作製され電解複合研磨仕上げされた電極が固定された構造となっている。そのため、SLC偏極電子銃^[5]とは異なり高圧印加時においても電子銃に接続されている活性化システムは接地電位の状態を保つことができる。

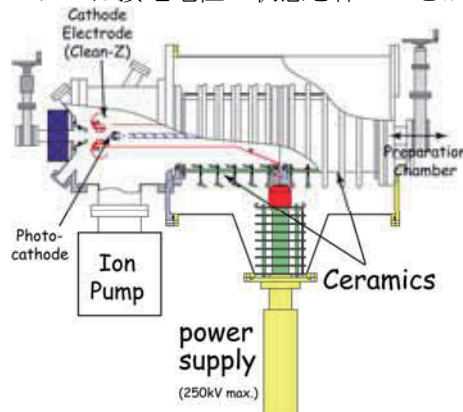


図1: ロードロック型200keV偏極電子銃

電子銃部の真空は、NEA表面の維持のため特に重要であり、chamber本体および他の真空内で使用する部品のほとんどは電解研磨が施され、排気系はイオンポンプ(360l/s)およびNEGポンプ(850l/s)により構成されている。また、使用する真空部品は全て

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

200°C以上のベークが可能であるもので構成し、200°C、100~150時間程度のベーク実施の後、 $\sim 1 \times 10^{-9}$ Paの極高真空が得られている。

3. NEA表面dark lifetime測定

フォトカソード寿命は測定条件により異なるため、その評価には注意が必要である。ここでは、電子銃の基本性能（真空度とその残留ガス成分、高電圧印加時に電極間で発生する暗電流）より決まるビーム無負荷状態におけるフォトカソード寿命 (NEA表面 Dark lifetime) 測定について報告する。

測定結果を図2に示す。測定時における電子銃の真空度は $1.4 \sim 1.8 \times 10^{-9}$ Paであり、印加電圧は電界放出暗電流が10nA以下に抑えられる140kVにおいて試験を進めた。この試験に使用したフォトカソードはGaAs-GaAsP歪み超格子である。^[6]

NEA活性化直後から測定開始後約160時間までは電極への電圧印加は5kVのみの状態であり、その後は常時140kV印加(5kV測定時のみ降圧)の状態での測定した。260~280および320時間以降は、電子銃口のゲートバルブを開けビーム移送系(真空度: 3.6×10^{-8} Pa)と接続した状態で測定を行っている。

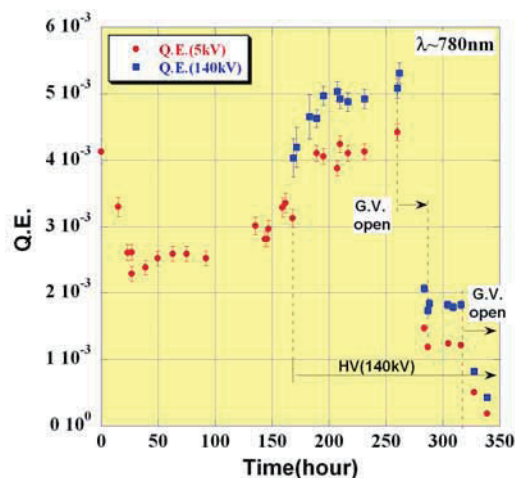


図2 : Dark Lifetime 測定の結果

フォトカソード装着直後はNEA活性化時に蒸着したCsが過剰状態となっており、その影響から量子効率が低下しているが、徐々に回復しその後ほぼ元の値まで戻る。暗電流10nA以下の条件下においても量子効率は維持され、電子銃部の真空および高電圧印加時の10nA以下の暗電流はNEA表面に対してほとんど悪影響を与えないことがわかる。これに対しビーム移送系と接続した場合、電子銃の真空度の悪化は 2.1×10^{-9} Paに留まったが、量子効率は著しく低下した。

この結果から、電子銃(印加電圧140kV)におけるNEA表面維持についての基本的性能には問題ないが、設計仕様である印加電圧200kV時の暗電流は問題であり、さらにビーム移送系の真空はNEA表面の維持の点では電子銃と同じレベルの極高真空の生成が重要であると言える。

4. 対策

高電圧印加時の暗電流の問題、およびビーム移送系の真空がもたらすフォトカソード寿命への悪影響の問題を解決するため、以下の2つの対策を施した。

4.1 チタンおよびモリブデン電極の作製

我々が独自に進めてきた電界放出暗電流のこれまでの基礎研究の結果^[7]からチタン陽極とモリブデン陰極の組合せが最も優れており、この結果の応用を本電子銃の電極作製によって試みた。

電極作製の条件として、電子銃の構造からカソード電極は支持チューブのたわみを抑えるため軽量であることが要求される。これまで作成したステンレス電極はバルク材の切削と溶接により作製されたが、モリブデンは加工が難しく、材料が非常に高価であり、さらに電極のサイズ(直径162mm)から切削の際に必要な母材サイズが規格外の特注となることなどから、電極の大部分を板厚2mmのモリブデン板(純度 99.96%以上)より絞り加工によって形成し、切削加工を施したモリブデンおよびSUS部品との接合には電子ビーム溶接を用いる方法を採用した。

モリブデン同士の溶接では、溶融箇所にも局部的に発生する歪みにより割れが発生する問題に直面したが、溶接箇所の周囲が赤熱するまでビームを当て続けながら溶接を行う事によって、歪みの局所的な集積が抑えられ、割れの問題を回避することが可能となった。この結果、モリブデン電極の重さを1050gまで抑えることができた。

チタン電極については、従来の作製方法と同様に純チタン材 (JIS grade 2) からNC切削加工により削り出して作製した。

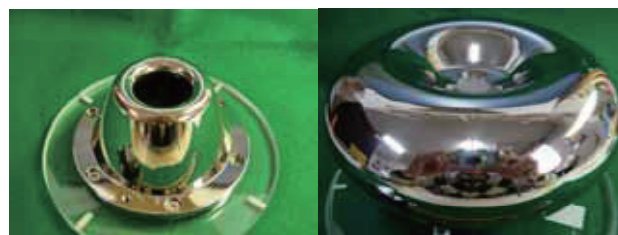


図3 : 研磨後のチタン陽極、モリブデン陰極

4.2 ビーム移送系の極高真空化

従来は、励起レーザー光をフォトカソードへほぼ垂直入射させるために最終反射ミラーを電子銃下流およそ600mmの位置の超高真空中に配置していたが、ミラーがビームラインと接近していることから、ビーム径数mm程度においてもビームがミラーに干渉する問題があった。そこで、真空中へミラーを配置せず正面よりビューイングポートを通してレーザー光を照射し、引出された電子ビームを偏向磁石により振分けられるよう移送系を変更した。

さらにビーム移送系の極高真空化のため、十分な排気速度を確保と、後方のビームダンプで発生する放出ガスがフォトカソードへ及ぼす悪影響の軽減化を図るために多段の差動排気となるよう移送系の各

所にイオンポンプおよびNEGポンプを配置した。

これにより、実際の運転に近い（寿命を決める主要な効果がイオンボンバードの影響となる）条件での試験を行う事が可能になると思われる。^{[8][9]}
このビーム移送系の改良は現在進行中である。

5. Ti-Mo電極の試験結果

5.1 真空度

電解複合研磨を施したチタン・モリブデン電極は、電子銃装着前にアセトンおよびエタノールによる脱脂超音波洗浄を行い、装着の後、200°C、140時間のベーキングを行った。その結果、到達真空度は 2.3×10^{-9} Paが得られ、交換前の真空度 1.4×10^{-9} Paとほぼ同等の極高真空が得られた。

5.2 高電界特性

フォトカソード挿入部へ研磨されたモリブデンPuckを装着し、チタン・モリブデン電極の高電界試験を実施した。コンディショニング時の放電電圧と放電回数の関係を図5に示す。

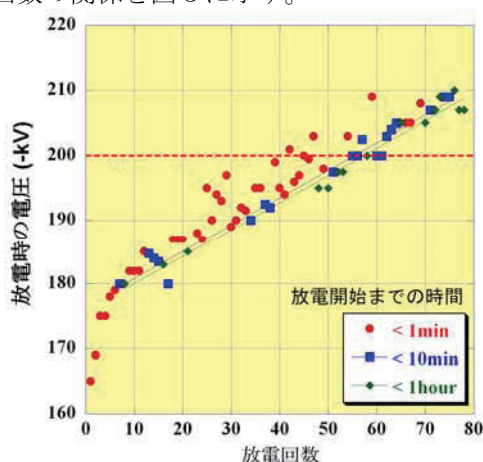


図5：Ti-Mo電極コンディショニングの経過

1回の放電につき放電開始電圧が約0.4kVずつ上昇する傾向が見られた。従来のステンレス電極においても放電によるコンディショニング効果が観測されたが、その傾向は不規則で著しく電界特性を悪化させる場合もあり、そのために200kVを常時安定に印加することが困難であった。しかし、このTi-Mo電極では電界特性の著しい悪化を伴うことなく放電開始電圧が上昇し、200kVを超えてもなおその傾向は続くことが確かめられた。また、放電に達するまでは暗電流の発生がほとんど見られず(<0.1nA)、放電は突如発生する。放電の際は、電子銃のビューイングポートより閃光が確認され、電子銃内部の真空度は一瞬 10^{-7} Pa台まで悪化するが10分程度で 10^{-9} Pa台まで回復する。

一般的に、陰極上に微小突起 (whisker) などが存在する場合、突起先端で電界が増倍されたかたちでFowler-Nordheim則に従い暗電流が観測されるが、今回の高電界試験では、暗電流の発生およびその増

加を観測する以前に放電が起きている。高真空下の放電要因はいくつか説があるが、陰極からの電界放出現象が直接寄与せずに放電に至ることを説明できる説としてクランプ説^[10]が挙げられる。これは電極に付着している微粒子が帯電し、反対側の電極へ加速衝突する。そして衝突した電極表面の局所的な温度上昇により蒸気の発生やガス放出が起き、これが起点となり生成されるイオン・2次電子が放電を起こす説である。しかし、この場合においてもコンディショニングによって定期的に放電開始電圧が上昇する理由は不明であり、現時点ではまだ完全な理解には至っていない。いずれにせよ、高電界特性は改善され、放電開始電圧約210kVまでのコンディショニングを進めた後、200kVにて200時間以上、暗電流10nA未満の状態を維持している。

6. まとめ

高電圧・高電界化のためTi-Mo電極の作製を行い、これらを従来までのステンレス電極と交換し高電界試験を行った。その結果、暗電流10nA以下の状態で長期にわたって200kV印加が可能となった。コンディショニングによる放電電圧の上昇はまだ上限に達しておらず、印加電圧200kV以上の条件においても安定運転を行える可能性がまだ十分あると言える。

さらに、NEA表面dark lifetime試験を行い、電子銃のみでなく電子銃近傍のビーム移送系についても同等の極高真空が不可欠であることを確認し、移送系の極高真空化の準備を進めている。

7. 謝辞

モリブデン電極の作製において、東成エレクトロビーム株式会社 指田達也氏、日造精密研磨株式会社 佐藤憲二氏、名古屋大学全学技術センター 伊藤有男氏をはじめ多くの方々のご協力を頂きました。深く感謝致します。

なお本研究は、KEK共同開発研究「低エミッタンス(偏極)電子源の開発」の支援により行われました。

参考文献

- [1] S. Pastuszka et al., J. Appl. Phys. **88**, 6788 (2000).
- [2] N. Yamamoto et. al., J. Appl. Phys. **102**, 024904 (2007)
- [3] C. K. Sinclair, Nucl. Instrum. and Meth. A **557** 69-74 (2006)
- [4] K. Wada et al., AIP Con. Proc. **675**, 1063-1065 (2003).
- [5] R. Alley et al., Nucl. Instrum. and Meth. A **365** 1-27 (1995)
- [6] 宇治原徹 他 “ GaAs/GaAsP歪み超格子偏極電子源の結晶性改善による高性能化” 信学技報 106, pp. 79-84, (2006)
- [7] F. Furuta, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A **538** 33-44 (2005)
- [8] J. Grames et al., AIP Con. Proc. **915**, 1037-1044 (2007)
- [9] R. Barday et al., AIP Con. Proc. **915**, 1019-1024 (2007)
- [10] 放電ハンドブック ,電気学会, 1974