

200keV 偏極電子銃の NEA フォトカソード長寿命化試験

和田公路^{1,A)}、山本将博^{A)}、中西疆^{A)}、奥見正治^{A)}、五藤俊明^{A)}、鈴木千尋^{A)}、古田史生^{A)}、西谷智博^{A)}、
宮本延春^{A)}、桑原真人^{A)}、廣瀬友規^{A)}、水野龍^{A)}、松本浩^{B)}、竹内康紀^{B)}、吉岡正和^{B)}

^{A)} 名古屋大学大学院理学研究科

〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

高輝度低エミッタンス偏極電子ビームを生成する 200 keV 偏極電子銃は、リニアコライダーに必要不可欠である。偏極電子を引き出すには半導体フォトカソード表面に負の電子親和性 (NEA) を持たせる必要があり、ビームを長期間安定に取り出すためには NEA 表面を極めて清浄な状態に保たなければならない。NEA 表面を劣化させる原因の一つは、加速電極間の電界放出暗電流によって引き起こされるガス放出である。この問題に対してステンレス電極表面の超清浄化技術と、窒素ガスを用いた HV Processing を用い、加速電圧 200 kV 印加時において暗電流を 1 nA 以下という極めて低い値に抑えることができた。この結果を踏まえ、NEA 表面の長寿命化に向けた試験を行った。

1. はじめに

現在、スピン偏極電子ビームは、研究分野を問わず数多くの研究機関での実験に実際に使用されている^[1]。また、次世代の電子陽電子リニアコライダーにおいても、超対称性粒子の探索実験などに重要な役割を果たすことが期待されている^[2]。

GaAs 型半導体にそのバンドギャップエネルギーに相当する波長の円偏光レーザーを照射することにより、偏極伝導体電子を生成できる。この偏極電子は、負の電子親和性 (NEA) を持たせた半導体表面から真空中に放出させることができる。この時必要となる NEA 表面は、半導体の p 型表面層のバンドベンディングと、超高真空中で Cs 及び O₂ を蒸着することによって形成する Ga⁻-Cs⁺ の電氣的二重層^[3]との加算的效果によって得られる。

リニアコライダーはこれまでにない高いルミノシティ ($\sim 10^{34}$ cm⁻²s⁻¹) を要求している。これを実現するために偏極電子源では、低エミッタンス (~ 10 mm mrad (r.m.s.)) で、高輝度マルチバンチ (2×10^{10} e⁻/bunch、バンチ幅 0.7 ns、バンチ間隔 2.8 ns、バンチ数 72 bunch/pulse、パルス周波数 150 Hz) ビームを生成する必要がある。これはピーク電流に換算すると 5 A に相当する。既存の 70 keV 偏極電子銃では空間電荷制限によってピーク電流が 1.6 A に制限されるために、このような高いピーク電流のバンチを引き出すことは不可能であった。そのため、リニアコライダー用の高電界偏極電子銃として、新たに 200 keV 偏極電子銃の開発を始めた。

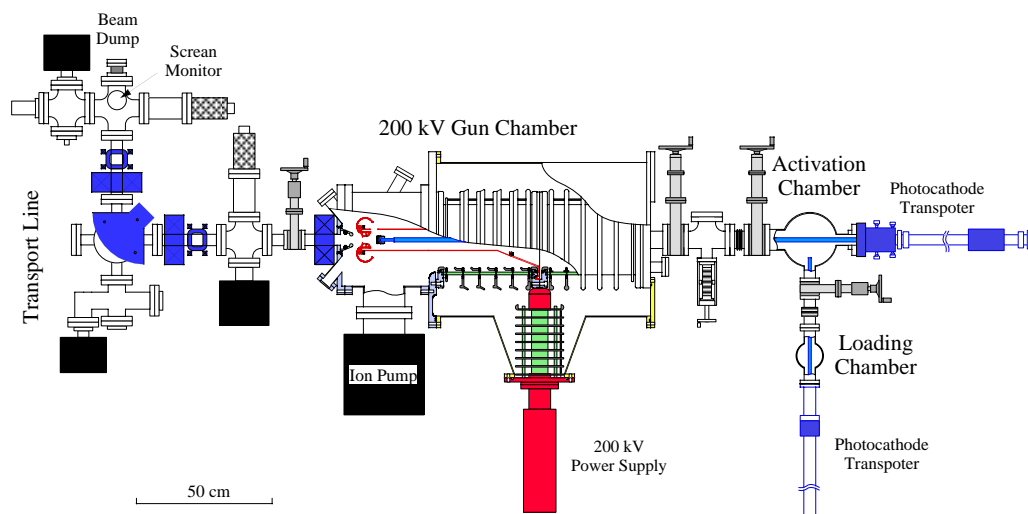


図 1 : 200 keV 偏極電子源の概観

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

電子銃の高電界化に伴って増大する加速電極間の電界放出暗電流は、フォトカソード周囲に大量のガスを放出させる。また、そのガスの一部は電子ビームとの衝突によってイオン化し、フォトカソードへ向かって加速、衝突する（イオンバックボンバードメント）。NEA 表面は電氣的に中性なガスの付着とイオンバックボンバードメントにより、急速に劣化してしまう。従って、暗電流の低減は高電界偏極電子銃の実用化の鍵となる。

2 . 200KEV 偏極電子源

2.1 ロードロック機構

新しく開発した 200 keV 偏極電子源の概観を図 1 に示す。この装置はゲートバルブで区切られた 3 つのチェンバーから構成される。ロードロック機構によって、フォトカソードは超高真空を破ることなく 3 つのチェンバー間を速やかに移動できる。フォトカソードはまず大気中から導入チェンバーへ挿入され、原子状水素によって清浄化（AHC）される^{[4][5]}。次に、活性化チェンバーへ移送され、高周波誘導加熱法によるヒートクリーニング（HC）を経て、NEA 活性化処理が施される。そして最後に、電子銃の加速電極中央部に装着される。

加速電極への Cs の付着、蓄積は暗電流増大の原因となるが、ロードロック機構の採用により、NEA 活性化時のフォトカソードへの Cs 蒸着を電子銃とは隔離した活性化チェンバーで行うことができる。これにより、電極の高電界化に伴って不可避に増大する暗電流を低いレベルに抑えることができた。

2.2 高電圧系

ロードロック機構を常にグランド電位で操作できるように、高電圧は 2 つのセラミックの中央部に印加する。また、絶縁破壊を回避するため、1 つのセラミックを 5 段に分割し、5 つの 500 M Ω 分電圧抵抗によって 200 kV を各段 40 kV ずつ等配する。高電圧部はタンクで密閉し、水分を含んだ内部の大気は乾燥窒素で置換し、さらに 3.6 atm まで加圧することで、セラミック沿面放電や、コロナ放電を抑圧しながら 200 kV を印加することができる。

2.3 加速電極

フォトカソードとアノード間の距離は 35 mm である。励起レーザーをフォトカソード径 18 mm の全面に照射した場合、シミュレーションコード EGUN によって計算した 200 kV 印加時の空間電荷制限値は 30 A であった。これにより、この電子銃はリニアコライダーのピーク電流の要求に余裕を持って応えることができる。

実用化できるレベルで NEA 表面寿命を得るには、暗電流を ~ 10 nA 以下に削減しなければならないことが報告されている^[6]。そのため、カソード電極上の最大表面電界をできるだけ低く抑える必要がある。

カソード電極形状の最適化はシミュレーションコード POISSON を用いて行い、その結果 200 kV 印加時の最大表面電界を 7.8 MV/m に抑えることができた。

電極の製作では、不純物が極めて少ないステンレス NK-CleanZ を母材とし、さらに電極表面の電界複合研磨と、温超純水による洗浄により、暗電流の原因となる非金属性不純物を徹底的に排除した^[7]。

2.4 超高真空

清浄な NEA 表面を維持するために、超高真空は不可欠であるが、3 つのチェンバーの中でもフォトカソードを装着する電子銃の超高真空は特に重要である。超高真空生成のためのペーキングでは、セラミックの熱的応力による破壊を防ぐため、注意深い温度昇降調節 (± 4 /hour) が必要である。200 で 100 時間ペーキングを行い、360 l/s のイオンポンプと、850l/s の NEG ポンプで本排気したところ、 3.5×10^{-11} torr の超高真空を得ることができた。

3 . 高電圧印加試験

フォトカソードとして Bulk-GaAs を電子銃に装着し、高電圧印加時における暗電流を測定した。その結果が図 2 の”Before Processing”と示したものである。120 kV 辺りから暗電流が立ち上がり、200 kV 印加時には暗電流が 10 nA を遥かに超えることが予測された。この暗電流は NEA 表面にとって致命的になる。そこで、N₂ ガスを用いた HV Processing^[8]を行った。まず、純度 99.9999 % の窒素をリーカブルバルブから $\sim 1 \times 10^{-6}$ torr までリークさせ、高電圧を印加した。そして、暗電流の減少を確認しながら、より高い電圧

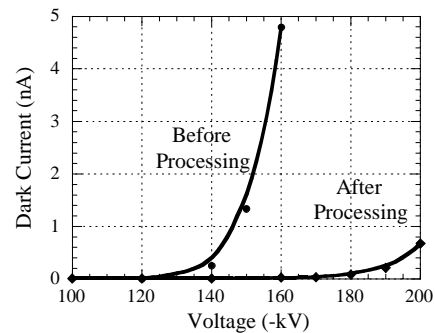


図 2 : N₂ HV Processing 前後での暗電流

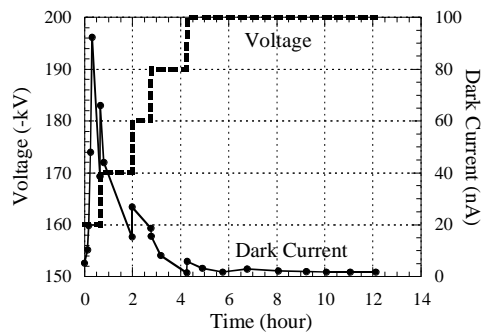


図 3 : N₂ HV Processing による暗電流の削減

を徐々に印加していった(図3)。その結果、わずか数時間程度で暗電流を劇的に減らすことができた。その後、超高真空にして暗電流を測定した。その結果を図2の”After Processing”に示す。200 keV 印加時においても暗電流が 1 nA 以下に削減できており、このときの真空度の悪化はわずか 2×10^{-12} torr であった。

4. NEA 表面寿命試験

NEA 表面劣化の主な要因は、超高真空中におけるガスの付着と、イオンバックボンバードメントである。特徴的なのは、前者は NEA 表面全体が劣化するのに対し、後者はビーム軸に沿ってイオンが生成するため、NEA 表面の劣化がビーム軸付近の局所的な範囲に限られることである^{[9][10]}。さらに、ガスの起源にも下記のようにいくつか考えられる。

超高真空中に最初から残留しているガス。

高電圧印加時の暗電流によって、電極から放出されるガス

電子ビームのハローがアノード電極やチェンバー内壁に衝突し、放出されるガス。

NEA 表面の劣化が実際にどのような機構で引き起こされているのかを明らかにすることは、今後の指針を明確にする上で非常に重要である。そこで、NEA 活性化した Bulk-GaAs フォトカソードを電子銃に装着し、量子効率 (QE) の寿命測定を行った。QE は NEA 表面の状態を表す指標となる。励起用レーザーには He-Ne レーザー (レーザー径 1.2 mm) を使用した。

まず、基礎データとして超高真空中での寿命を Dark Lifetime として測定した。NEA 活性化前に行う結晶表面の清浄化には、AHC ($\sim 400 \times 30$ min.)、及び HC (450×2 hour) を行った。測定では、NEA 表面を汚染する要素をできるだけ排除するため、測定時のみ電圧を印加し、レーザーを照射した。その結果を図4に示す。最初の ~ 20 時間まで QE が上昇しているのは、結晶表面に過剰に付いた Cs が残留ガス中の O_2 を取り込んで、より良い NEA 状態を形成するためと考えられる。その後、さらに残留ガスが付着し、60時間程度で初期 QE の半分まで QE が低下した。 N_2 ガス HV Processing の影響で、 O_2 、 H_2O 、 CO_2 といった、NEA 表面に悪影響を及ぼすガスが電子銃に留まっている可能性がある。

次に、200 keV ビームを引き出した時の寿命試験を行った。NEA 活性化前の結晶表面清浄化には、AHC ($\sim 400 \times 20$ min.)、及び HC (430×2 hour) を行った。Dark Lifetime 測定時の条件とほぼ同じである。200 keV ビームは図1で示すように偏向電磁石で 90° 曲げられ、3つのソレノイドコイルで収束されながらスクリーンモニター直後のアルミニウム製円錐型ファラデーカップ (FC) まで導かれる。このようなシステムで、FC までの移送効率 $\sim 98\%$ を得ることができた。またこのとき、電子銃の真空度悪化は観測されなかった。このようにして行った測定の結果を図5に示す。引き出し電流の変化 (~ 10 nA, < 100 nA, < 700 nA) による QE の減少傾向の変化は見られず、このような低電流では Dark Lifetime 以上の QE

の減少傾向を確認することはできなかった。また、QE はフォトカソード全域に渡って一様に低下しており、中性ガスが原因で NEA 表面が劣化したことを示唆していた。

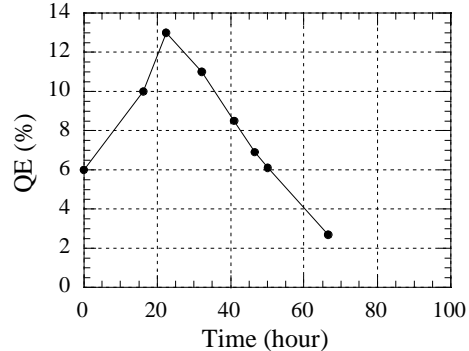


図4：超高真空中での QE の減少

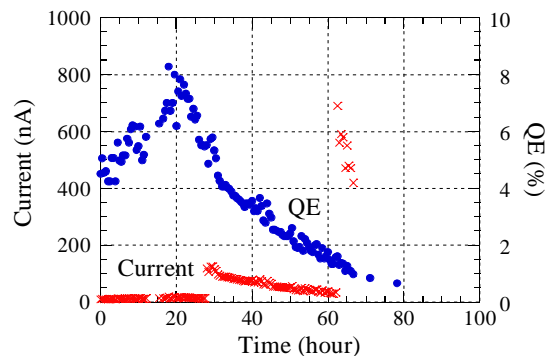


図5：200 keV ビーム引き出し時の QE の減少

5. まとめ

現状での NEA 表面を劣化させる主な要因は超高真空中の残留ガスであると考えられる。また、200 keV ビーム引き出し時に実際に問題になるであろう他の要因は、 $1 \mu A$ 以下の低電流では、Dark Lifetime に埋もれて確認することができなかった。従って、Dark Lifetime の向上が何より先決である。その後、さらに大電流の 200 keV ビーム引き出し時における NEA 寿命試験を行い、実用に耐えうる安定した 200 keV 偏極電子ビームの供給を目指す。

参考文献

- [1] Proceedings of Polarized Electron Source (PES2000) Workshop, Nagoya, Japan (2000)
- [2] T. Nakanishi et al. "Polarized Electron Source" JLC Design Study, KEK Report 97-01 (1997) p.36-48
- [3] T. Mizoguchi et al., SPIN 2000 proceedings, Osaka, Japan (2000)
- [4] C. K. Sinclair, 7th International Workshop on Polarized Gas Target and Polarized Beams, AIP Conference Proceedings 421, USA (1998) p.218-228
- [5] M. Yamamoto et al., This Proceedings (2002)
- [6] T. Nakanishi et al., Spin 96 Proceedings, Amsterdam (1996) p.712-716
- [7] C. Suzuki, Ph. D. Thesis, Nagoya University (2001)
- [8] R. Alley et al., Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A365 (1995) p.1-27
- [9] K. Aulenbacher et al., Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A391 (1997) p.498-506
- [10] C. K. Sinclair, PAC1999 Proceedings, New York (1999) p.65-69