

R&D STATUS OF A HIGH-BRIGHTNESS ELECTRON GUN FOR FUTURE ERL LIGHT SOURCES

Ryoichi Hajima^{1*}, Ryoji Nagai¹, Hokuto Iijima¹, Nobuyuki Nishimori¹,
Yosuke Honda², Toshiya Muto²

¹ERL Development Group, JAEA, Tokai, Ibaraki 319-1195 Japan.

²Accelerator Laboratory, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

Abstract

Development of a high-brightness electron gun for future light sources utilizing energy-recovery linacs is in progress. A 250 kV-50 mA DC gun with a GaAs photocathode has been developed. We recently had the first beam from the gun. Apparatuses for beam diagnosis to measure emittance and bunch length are under construction.

ERL 放射光源のための高輝度大電流電子銃の開発の現状

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) の技術に基づく光源として、コヒーレント X 線・フェムト秒 X 線の発生が可能な X 線放射光源 [1]、大強度線源 [2] などが提案され、これら次世代放射光源に必要な要素技術の開発、さらに、技術実証のためのコンパクト ERL [3] の建設に向けた取り組みが、国内複数期間の協力のもてで推進されている [4][5]。本稿では、ERL 型次世代放射光源のための要素技術のひとつである高輝度大電流電子銃について、研究開発の現状を報告する。

われわれが立案した電子銃開発の計画は以下である。まず、JAEA-FEL の物品を利用して 250 kV-50 mA 電子銃の開発を立ち上げ、大電流 DC 電子銃に必要な技術を獲得するとともに、NEA フォトカソードの作成・性能測定を進める。その後、次世代放射光源の入射器に必要な 500 kV 級の電子銃の開発に進む。

これまでに、250 kV 電子銃の組み立てを完了し、ファーストビームの引き出しに成功した。今年度からは、500 kV 電子銃の設計と製作に着手している。

2. 250 kV-50 mA 電子銃の構成

250 kV-50 mA 電子銃の高電圧発生部は、コックロフト・ウォルトン回路とセラミック管を水平に保持し、絶縁ガス (SF6) タンクに収納する構成である。フォトカソード (GaAs 基板) はロードロックチェンバーで真空中に導入した後、ランプヒーターにより加熱洗浄さ

れる。次に隣接したプレパレーションチェンバーに移送し、カソード表面に Cs と O₂ を交互に付着することで NEA (Negative Electron Affinity) 表面を得る。このようにして作成されたフォトカソードをカソード電極に移送し、電子銃の運転に供する。

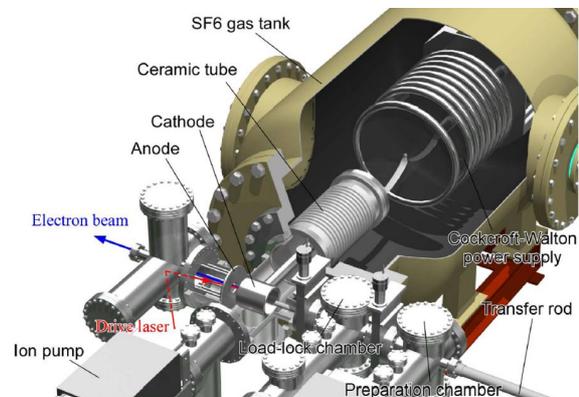


図 1: 250 kV-50 mA 電子銃

NEA 表面の作成と維持には、極高真空が必要なことから、ロードロック、プレパレーション、本体チェンバーは、ガス放出速度が一般的なステンレスに比べて 2-3 桁小さいチタン合金 [6] を材料としている。

ビーム引き出し後のエミッタンス補償用のソレノイド磁石は、カソード面における磁場をキャンセルするような設計を施している。PARMELA によるシミュレーションでは、カソードから放出される電子パンチの時間波形を Gaussian と仮定すると、ソレノイドによるエミッタンス補償を行った場合の最小エミッタンスは、電荷量 77 pC に対して 0.59 mm-mrad、7.7 pC に対して

* E-mail: hajima.ryoichi@jaea.go.jp

0.11 mm-mrad となる [7]。

3. NEA 表面の作成とビーム引き出し試験

GaAs 表面に Cs と O₂ を交互に付着させながら量子効率 (QE) の高い状態を作る方法 (Yo-Yo 法) により、NEA 表面の作成を行った。図 2 は、Yo-Yo 法による NEA 表面の作成の例である。これまでの NEA 作成実験では、635 nm のレーザ波長に対して 4% 程度の量子効率を得られている。JLAB などでは 500 nm レーザで 10% の量子効率を得られているのに比べると、われわれのカソードの量子効率には改善の余地があると思われる。真空中に導入する前の化学洗浄 (エッチング)、真空内での加熱洗浄、Cs と O₂ の導入速度などを最適化することで量子効率の改善を行う予定である。

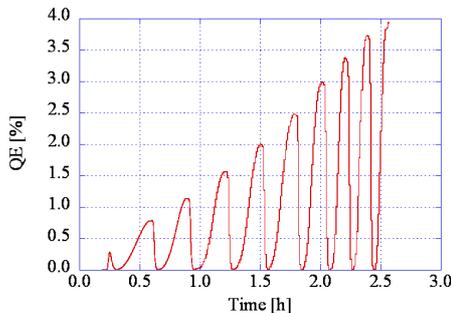


図 2: Yo-Yo 法による NEA 表面の作成

作成したフォトカソードを本体チェンバーに移送し、2008 年 6 月 20 日にファーストビームの発生に成功した。ローパワー用のファラデーカップをアノード下流に設置し、カソードに -150kV を印加し、約 2mW の He-Ne レーザをカソードに照射したところ約 $1\mu\text{A}$ のビーム電流を測定した。大電流のビーム引き出しは、水冷ビームダンプを設置した後に行う予定である。

4. ビーム診断ラインの構築

フォトカソード DC 電子銃で発生した電子バンチを計測するためのビーム診断ラインの設計を終え、構築を始めている。ビーム診断ラインは図 3 に示すように、エミッタンス測定用のダブルスリット、バンチ長計測用の偏向空洞、大電流ビームダンプ (水冷) から構成される。エミッタンス測定、バンチ長測定については、別途報告している [8][9]。ビームダンプからのアウトガスが電子銃本体に影響しないよう、ビームダンプまでの距離を十分にとり、偏向磁石で曲げた後にダンプする設計としている。

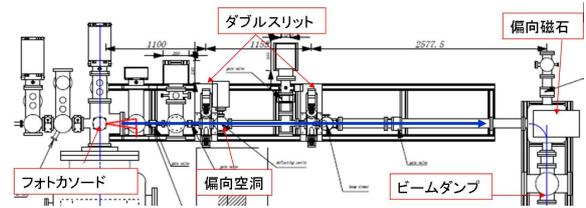


図 3: ビーム診断用ラインの構成

5. 電子バンチ初期分布の整形

フォトカソード電子銃では、ドライブレーザのパルス空間・時間領域で整形することでエミッタンスを小さくできることが知られている。これは、空間電荷によるエミッタンスの増大がバンチ中の電子分布に依存するためである。レーザパルスの整形では、デフォーマブルミラーによるビーム断面の整形 (空間) やパルススタッキングによる波形整形 (時間) が可能であり、このような空間整形と時間波形整形を組み合わせることで、カソードから発生する電子バンチの 3 次元分布を最適化しエミッタンスを小さくすることが、フォトカソード RF 電子銃で研究されてきた [10]。

われわれは、同様の手法の ERL 電子銃への適用を検討している。フォトカソード DC 電子銃を含む ERL 入射器において、時間波形整形の効果を調べるためのシミュレーション (PARMELA) を行った。500 kV 電子銃と 7MeV 入射加速器 (2 セル、2 台) の構成を仮定し、電荷量 77 pC、カソードにおける電子の実効温度 35 meV、最終バンチ長 2.3 ps の条件で、電子バンチ波形の初期値をガウシアン分布 (rms 17 ps) とフラットトップ分布 (全幅 32 ps) とした場合のエミッタンスを計算した。図 4 に示されるように、バンチの初期波形を矩形に整形することで、Gaussian の場合に比べて、約半分の大きさのエミッタンスが得られた。フォトカソード DC 電子銃においても、時間波形整形がきわめて有効であることがわかった。

ところで、このような時間波形整形を行うには、カソードの時間応答が十分に速くなければならない。GaAs のような半導体カソードの時間応答は、レーザの吸収深さ、生成されるキャリア (電子/ホールペア) の拡散速度、キャリアの寿命などのパラメータに依存する。Cornell 大学で行われた最近の研究でも、時間応答がカソード材料と量子効率に依存する実験結果が示されている [11]。われわれの電子銃においても、偏向空洞を用いたカソードの時間応答特性の測定を行い、カソード材料の最適化を含めて、波形整形による高輝度電子発生を目指した研究を予定している。

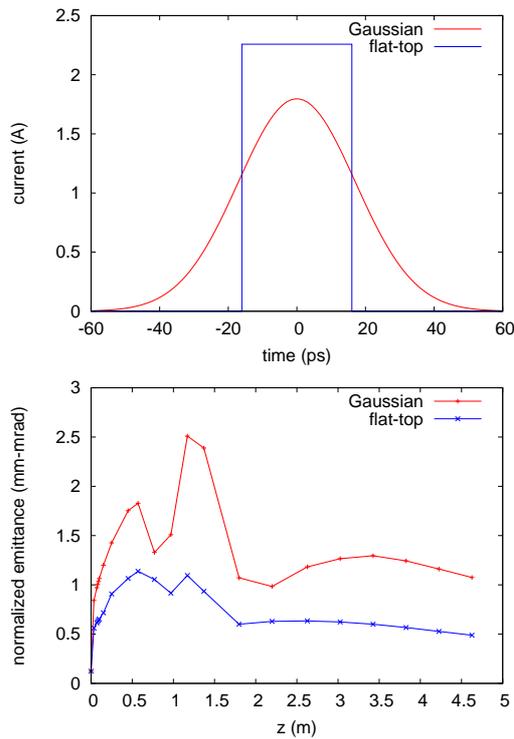


図 4: 時間波形整形によるエミッタンスの低減の計算例。
500 kV 電子銃、7 MeV 入射加速器の構成。

6. 500 kV 電子銃に向けて

250 kV 電子銃の開発と運転で得た知見を生かして、放射光源の実機で用いる 500 kV 電子銃の実現に向けた研究を開始している。これまでに運転実績のある DC(CW) 電子銃では、JLAB-ERL の 350 kV が最大電圧であり、これを上回る 500 kV 電子銃を実現するにあたっての最大の課題は DC 500 kV を安定に保持できるセラミック管の開発である。

セラミック管に必要な性能は、(1) 内面からの 2 次電子放出が少ないこと、(2) 一様な電位分布を実現し、チャージアップを抑止するために適度な電流が流れるだけの抵抗値を有すること、(3) 極高真空の阻害となるアウトガスが少ないことなどである。2 次電子防止には TiN コーティング (上記 250 kV-50 mA 電子銃) が、一様な電位分布の実現には内面への抵抗膜のコーティング (Cornell ERL 1 号機)、セラミック自体に抵抗成分を持たせる “bulk resistivity 方式” (Cornell ERL 2 号機、Daresbury ERL)、セラミックを多段分割し段間に高抵抗を接続する方式 (JAEA 250 kV FEL 電子銃、名古屋大 200 kV 偏極電子源) などの先例がある。

われわれは、500 kV 用セラミック管として多段分割方式を採用することとし、このためのガードリングの

設計を行っている。ガードリングの形状を変えながら、表面電位 (中心導体含む) が所定の値以下になるように、また、中心導体からの放出電子がセラミック表面を直接叩かないように、静電場解析と放出電子軌道解析を進めている。セラミック管は今年度中に製作する予定である。

7. まとめ

エネルギー回収型リニアックに基づく次世代放射光源のための高輝度大電流電子銃の開発を進めている。250 kV-50 mA 電子銃ではファーストビームの引き出しに成功し、エミッタンス・バンチ長測定のためのビーム診断用ラインの組み立てを進めている。今後は、カソードの初期エミッタンス、時間応答特性の測定を行い、カソード材料の最適化を行うとともに、大電流動作時の様々な問題 (カソード寿命など) の解決にも取り組む予定である。これらと並行して、放射光源の実機で用いる 500 kV 電子銃の設計と製作にも着手したところである。

500 kV 電子銃の開発では、広島大学の栗木雅夫、名古屋大学の中西彊、奥見正治、山本将博の各先生の協力を得ている。また、本研究の一部は、科学研究費補助金 (20360424) による。

参考文献

- [1] R. Hajima, Proc. APAC-07, pp. 11-14.
- [2] R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech. 45, pp. 441-451 (2008)
- [3] “コンパクト ERL の設計研究”, 羽鳥 他 (編), KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-023.
- [4] S. Sakanaka et al., Proc. EPAC-08, pp. 205-207 (2008).
- [5] 坂中章悟 他, “ERL 放射光源に向けた R&D の現状”, 本論文集.
- [6] H. Kurisu et al., J. Vac. Sci Technol. A21, pp. L10-L12 (2003).
- [7] 永井良治 他, 2007 年加速器学会年会論文集, pp. 673-675 (2007).
- [8] N. Nishimori et al., Proc. ERL-07, to be published.
- [9] 西森信行 他, “ERL 高輝度電子ビーム診断のための偏向空洞の特性”, 本論文集.
- [10] H. Tomizawa, Journal of the Particle Accelerator Society of Japan 3, pp. 251-262 (2006).
- [11] I.V. Bazarov et al., Phys. Rev. ST-AB 11, 040702 (2008).