

グリッド付き熱カソードを用いた低エミッタンス電子銃システム

LOW-EMITTANCE ELECTRON GUN SYSTEM WITH GRIDDED THERMIONIC-CATHODE

安積隆夫^{#, A, B, C}, 稲垣隆宏^{A, B}, 大竹雄次^B, 谷内努^B, 西森信行^C, 馬込保^{A, B, C}, 柳田謙一^B, 田中均^{A, C}
Takao Asaka^{#, A, B, C}, Takahiro Inagaki^{B, C}, Yuji Otake^B, Tsutomu Taniuchi^B, Nobuyuki Nishimori^A,
Tamotsu Magome^{A, B, C}, Kenichi Yanagida^B, Hitoshi Tanaka^{A, C}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{C)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

Abstract

The 3-GeV linear accelerator for a soft x-ray free-electron lasers (SX-FEL) requires an electron gun capable of delivering highly stable and bright electron beam. A new low-emittance gridded thermionic gun embedded in a 238-MHz rf cavity has been developed for this purpose. The 238-MHz rf cavity accelerates the electron beam generated from the 50-kV thermionic-gun up to 500 keV to avoid emittance dilution due to space charge effect at low energy. We built a gun test stand to verify the high beam performance, i.e., a normalized emittance of less than 4 mm mrad with a bunch charge of 1 nC, as predicated by CST and PARMELA codes. Our proof-of-performance experiments demonstrated that a projection emittance of 1.7 mm mrad was obtained as a core part, representing 60% of all extracted electrons. This measured emittance agreed well with the simulation value of 2.0 mm mrad.

1. はじめに

次世代放射光施設[1]は、2023年の利用運転を目指し、現在、建屋建設、ならびに加速器構成機器の製作が進められている。高輝度蓄積リングへの入射用 3 GeV 線型加速器は全長 110 m で、低エミッタンス電子銃を備えた入射部と 20 台の高電界 C バンドユニットから構成される。3 GeV 線型加速器は、蓄積リングへの入射以外に、軟 X 線自由電子レーザー (SX-FEL) への拡張を計画している。全長 25 m のアンジュレータを線型加速器の後方に設置した場合、SX-FEL 発振に要求されるピーク電流は 3 kA で規格化スライスエミッタンスは 2 mm mrad である[2]。

アパーチャの狭い高輝度リングへの入射や SX-FEL の効率的な運転のためには、低エミッタンス電子ビームの生成が必要であり、これまで大規模なレーザーシステムを備えた光陰極型 RF 電子銃や 500 kV 熱電子銃[3]が使われてきた。このうち、500 kV 熱電子銃は、カソード寿命や安定性の点で優れているが、500 kV の高電圧パルス発生のための大型電源や 1 ns ビームパルス切出しのための高速ビームチョッパーを備えなければならないのが、小、中規模施設にとっては大きな負担である[4]。

こうした点を踏まえ、省コストでかつ保守性に優れた 500 keV 低エミッタンス電子銃システムを新たに開発した[5]。本電子銃は、50 kV の印加電圧で駆動する熱電子銃と 238 MHz 高周波空洞で構成される。電子銃カソードには市販のグリッド付き熱カソード

が装着され、600 ps 幅の電子パルスを生成し、直後に設置した 238 MHz 高周波空洞にて加速することで 500 keV の電子ビームを生成する。

多くの加速器施設で使用されているグリッド付き熱カソードは、高堅牢性、長寿命、高安定といった優位性をもっている。また、カソード・グリッド間の電圧制御により 1 ns 以下のパルスビームが容易に生成できる。しかしながら、グリッド付き熱カソードで生成されるビームは、グリッド近傍で生じる電場歪み (レンズ効果) とビーム自身の空間電荷効果により、エミッタンスは 10 mm mrad 以上となり、低エミッタンス電子銃としては不向きとされてきた。

我々は、グリッド近傍のレンズ効果によるエミッタンス悪化が、グリッド・カソード間のパルス電圧に依存し、電圧調整することで平行ビーム生成が可能であることに着目した。このグリッド透明化条件では、規格化エミッタンスは 1 mm mrad 程度の一様分布ビームを生成できる。この条件下で生成された低エミッタンスビームは、238 MHz 高周波空洞で 500 keV まで加速することにより、空間電荷効果によるエミッタンス増大を回避することができる。

以上の低エミッタンスビーム生成スキームについて、粒子トラッキングシミュレーションを行い、2 mm mrad / 0.6 nC の低エミッタンスビームが生成可能であることを確認した。これを実証するため、計算結果に基づく電子銃システムの製作、およびビーム性能評価のための診断装置を構築し、ビーム生成試験を実施した[5]。本報告では、ビーム性能評価試験結果、とくにスリットスキャン法によるエミッタンス測定結果について報告する。

[#] asaka@spring8.or.jp

2. 電子銃システム

次世代放射光施設では、長期間に渡って安定な運転を行う必要があるため、本電子銃システムの構成機器は、技術的に確立され、実績のある要素技術を使用する。熱カソードは、入手が容易である市販のグリッド付き熱カソード (EIMAC Y-845, CPI 社製) を採用する。グリッド・カソード間には、高速パルス電圧を印加して、600 ps 幅の電子パルスビームを生成する。高電圧電源のコスト削減と小型化のため、アノード・カソード間電圧は 50 kV と比較的低い電圧設定とする。この場合、電子銃から生成されるビームは、ドリフトスペースで空間電荷効果によるエミッタンス悪化が懸念される。これを回避するため、電子銃出口 (アノード電極出口) から 238 MHz 高周波空胴の加速ギャップまでの距離はできる限り短くなるよう設計した。空胴のシャントインピーダンスを上げるためにノーズを設けると、ドリフトスペースは 200 mm となる。この区間のビーム輸送において、横方向の電子分布均一性を維持するために、磁気レンズを電子銃と空胴との間に挿入した。これによりビーム発散を抑え、非線形性空間電荷効果によるエミッタンス増大を回避できる (Figure 1)。

電子銃の 50 kV 高電圧パルスを発生させるため、耐電圧が 13 kV の SiC-MOSFET を用いたマルクス電源[6]を使用する。また、238 MHz 高周波空胴へ供給する RF 電力は最大 1.5 kW 出力の LD-MOSFET デバイスを使用した 42 kW パルス高周波増幅器[7]を用いる。これらは保守性に優れているだけでなく信頼性の向上、さらに省コスト化にも貢献する。

3. ビーム評価試験

3.1 電子銃テストスタンドの構成

電子銃システムの性能評価のため、Fig. 2 に示すビーム診断装置を構築した。238 MHz 高周波空胴の後方には、壁電流モニター (WCM)、ビームコリメータ (COL)、スリット (SL)、スクリーンモニター (SCM)、ファラデーカップ (FC) が装備される。エネルギープロファイルを観測するために 30° 偏向電磁石とその後方にスクリーンモニターを設置した。

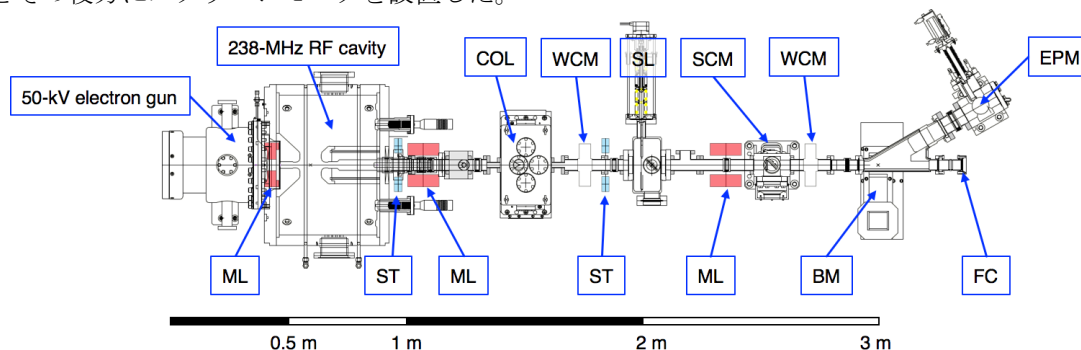


Figure 2: Layout of the gun test stand. The symbols ML, ST, WCM, FC, SCM, EPM, and BM represent a magnetic lens, a steering coil, a beam collimator, a beam slit, a wall current monitor, a Faraday cup, a screen monitor, an energy profile monitor, and a 30° bending magnet, respectively.

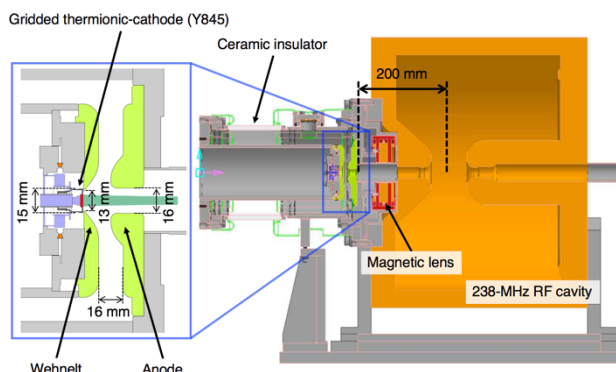


Figure 1: Schematic drawing of the low-emittance gridded thermionic electron gun embedded in the 238-MHz rf cavity. Shunt impedance of the 238-MHz rf cavity is 6.17 MΩ.

スクリーンモニタの蛍光板には、帯電防止のための金蒸着を施した厚さ 100 μm の YAG:Ce シンチレータを使用している。また、± 25 mm の視野範囲において、画像歪みなくビームプロファイルを観測可能となるように、CCD カメラにはテレセントリックレンズを装着する。

3.2 ビームプロファイル

電子銃のグリッド電圧は、シミュレーションで得られたグリッド透明化条件を設定する。また、磁気レンズ励磁量、および 238 MHz 高周波空胴の RF 電力・位相もシミュレーション結果を反映する。ビームエネルギーは、2 台の壁電流モニターから得られる信号の時間差からエネルギーを算出する。また、30° 偏向電磁石後のスクリーンモニターでエネルギープロファイルを観測し、エネルギー幅が最小となるように 238 MHz 高周波空胴の位相が微調整される。

以上の調整後、ビーム電荷量とビームエネルギーは、設計値と概ね一致する結果を得た。電荷量が 1 nC でエネルギーが 500 keV のビームについて、238 MHz 高周波空胴の後方に設置されたスクリーンモニターで観測される典型的なビームプロファイルを Fig. 3 に示す。ビームコア部の横方向強度分布において、一様性を保持していることが分かる。

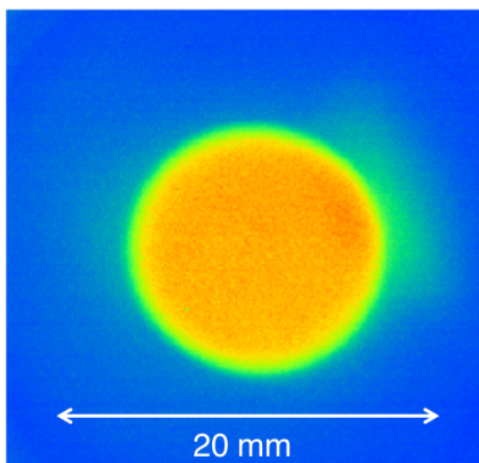


Figure 3: Beam profile image of 500 keV, 1 nC beam on the YAG:Ce screen.

3.3 エミッタンス測定

スリットスキャン法により 238 MHz 高周波空洞で 500 keV に加速された後の電子ビームのエミッタンスを測定した。238 MHz 高周波空洞のギャップから 1.2 m 下流に設置した可動スリットにより、0.1 mm 幅でビームが切り出される。この切り出されたビームは、さらに 474 mm 後方のスクリーンモニターにて、ビームの角度発散分布画像を取得する。スリット位置を変えて画像取得し、これを x - x' 位相空間分布に再構成した結果を Fig. 4 に示す。スキャン範囲は 20 mm、スリット可動ステップは 0.25 mm である。

ノイズ除去、ならびにビームコア部分のエミッタンスを評価するため、ビーム分布の 90%、60%、ガウシアンフィッティングによる解析をおこなった。その結果、規格化エミッタンスは 4.3 mm mrad (90% core part)、1.7 mm mrad (60% core part)、3.1 mm mrad (Gaussian fitting) であった。シミュレーションで予測された規格化エミッタンスは 3.3 mm mrad (100%)、2 mm mrad (60%) であり、とくにビームコア部分においては、概ね一致している。本測定で得られたビームパラメータを Table 1 にまとめる。

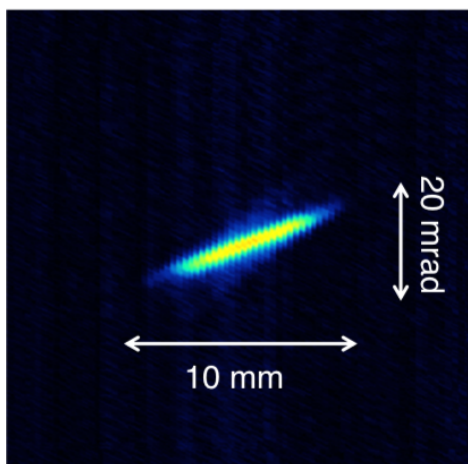


Figure 4: Phase-space of the 500 keV, 1 nC beam.

Table 1: Beam Parameters at the Exit of the Electron Gun System

Charge	1 nC
Energy	500 keV
Energy spread	4.2 % (60% core part)
Norm. emittance (rms)	4.3 mm mrad (90 % core part)
Norm. emittance (rms)	1.7 mm mrad (60 % core part)
Norm. emittance (rms)	3.1 mm mrad (Gaussian fit)

4. まとめ

市販のグリッド付き熱カソードを用いた低エミッタンス電子銃システムを製作し、性能評価試験を実施した。電子銃システムから出力される 500 keV ビームに対して、スリットスキャン法によるエミッタンス測定を行った結果、規格化エミッタンスが 1.7 mm mrad (60% core part) となり、設計性能を満たしていることを確認した。

これまで、グリッド付き熱カソードはグリッド近傍のレンズ効果によるエミッタンスへの影響から、低エミッタンス電子銃として不向きとされてきた。しかしながら、グリッド透明化条件を与えるウェネルト、アノード電極形状、電場強度の最適化により、低エミッタンスビーム生成が可能となることを実証した。

3 GeV 線型加速器の入射部では、本電子銃システムから生成される 500 keV 低エミッタンスビームを 476 MHz サブハーモニックバンチャーでバンチ圧縮後、可変式コリメータでビームコア部を切り出すことによりビーム電荷量を調整する。今後、入射部を構築し、電子集群、加速試験をおこなう予定である。

参考文献

- [1] N. Nishimori *et al.*, “Accelerator system of high brilliant 3GeV light source project”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan, July 31 -August 3, 2019, pp. 153-156.
- [2] T. Asaka *et al.*, “Basic design 3-GeV linear accelerator for a next-generation SR source”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan, July 31 -August 3, 2019, pp. 771-775.
- [3] K. Togawa *et al.*, “CeB₆ electron gun for low-emittance injector”, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 020703 (2007).
- [4] T. Asaka *et al.*, “Low-emittance thermionic-gun-based injector for compact free-electron laser”, Phys. Rev. Accel. Beams **20**, 080702 (2017).
- [5] T. Asaka *et al.*, “Low-emittance radio-frequency electron gun using a gridded thermionic cathode”, Phys. Rev. Accel. Beams **23**, 063401 (2020).
- [6] C. Kondo *et al.*, “Development of 50 kV pulse generator using high voltage SiC-MOSFET for electron gun”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan, July 31 -August 3, 2019, pp. 679-682.
- [7] S. Fukuoka *et al.*, “Development of 238-MHz 42-kW solid-state pulse RF amplifier”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan, July 31 -August 3, 2019, pp. 283-287.