

CeB₆ カソードの仕事関数測定装置の開発状況について

DEVELOPMENT STATUS OF THE OFFLINE WORK FUNCTION MEASUREMENT SYSTEM FOR CeB₆ CATHODES USED IN THE ELECTRON GUN OF SACLA.

馬込 保^{*A)}、渡川 和晃^{B)}、稲垣 隆宏^{B)}、原 徹^{B)}、田中 均^{B)}
Tamotsu Magome^{*A)}, Kazuaki Togawa^{B)}, Takahiro Inagaki^{B)}, Toru Hara^{B)}, Hitoshi Tanaka^{B)}

^{A)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute

^{B)}RIKEN SPring-8 Center

Abstract

A CeB₆ thermionic cathode is used for the electron gun of the X-ray free-electron laser, SACLA. A CeB₆ thermionic cathode is typically usable for an operation time of one year due to decrease in emission currents. For future development of our facilities, it is necessary to investigate this cathode degradation and to prolong the lifetime of the CeB₆ thermionic cathode. Since work function is the most dominant factor in emission current, we need to measure work function of the CeB₆ thermionic cathode during this degradation. As a prototype, we have been developing an offline measurement system for work function of the CeB₆ thermionic cathode. The developed system adopts the photoelectron yield spectroscopy using excitation lights from 410 to 709 nm in wavelength generated by a nanosecond tunable Nd:YAG laser system. In this paper, we report the development status of the work function measurement system.

1. はじめに

SPring-8 SACLA は、CeB₆ 製の熱カソードを電子源に採用した X 線自由電子レーザー (X-ray free-electron laser: 以降 XFEL と略記) 施設である。XFEL の安定した発振のために電子源からのエミッションカレントは一定であることが望ましいが、この CeB₆ カソードからのエミッションカレントは、数週間の時定数で減少してしまう。現在は、適宜 CeB₆ カソードの温度を上げることでエミッションカレントの減少分を補填しているが、カソード加熱用のヒータ電源の容量制限や、その他の諸条件を考慮して、おおよそ 1 年程度で新しい CeB₆ カソードとの交換を行っている。

XFEL ではレーザー発振源となる電子バンチに精細な取り扱いが要求されるため、CeB₆ カソードを交換するたびに、煩雑な調整作業を行う必要がある。また、SACLA 電子銃は二重化されておらず、今後、SPring-8 の蓄積リングへの入射も視野に入れていることを考えると、エミッションカレントの減少を防止し、長期間安定して CeB₆ カソードを使用可能にすることは、必須の事項であるといえる。このような背景から、CeB₆ カソードの劣化、すなわち、エミッションカレントの減少の原因を in situ で調査し、その長寿命化を検討することとなった。

劣化現象は様々な要因が絡んでくると想定され、多角的な視点からの特性評価が必要となる。我々は、その第一ステップとして、エミッションにおいて第一義的な CeB₆ カソードの仕事関数の変化を測定することとした。

理想的には実機、あるいは実機を完全に模擬できる電子銃テストベンチを利用して調査を行うべきではある。しかしながら、直ぐに利用するのは得策で

はない。経験のない測定方法を確立し運用するには多数の試行錯誤が必要であるが、実機や電子銃テストベンチは取り回しが悪い。また、加速電圧に高電圧パルスを使用していることや、発生する放射線量も多く、かなりのノイズ対策も必要となる。そこで、実機や電子銃テストベンチを利用する前段階として、カソードを見込むポートも多く、小型で取り扱いやすいオフラインの測定装置を開発することにした。

本件では、このオフラインの仕事関数測定装置の開発状況について報告する。

2. 測定方法

CeB₆ カソードは、SACLA 運転中は約 1500°C に加熱されている。このような高温の表面からの放熱の影響を受ける構成部品を持つことなく仕事関数を測定できる光電子収量分光法 [1] を本測定装置では採用する。加熱された CeB₆ カソードは一定のエミッションカレントを放出している。この熱的なエミッションカレントのもとで、光によって励起されたエミッションカレントを弁別して測定するため、励起光にパルスレーザー光を使用する。

3. 測定装置

測定装置は真空チャンバー部、パルス信号処理部、および、レーザー部からなる。装置概要を図 1 に示す。

3.1 真空チャンバー部

真空チャンバー部内部には、カソードアセンブリが設置されている。カソードアセンブリは、実機と同型 [2,3] であるが、実機と異なりカソードとウェーネルトが接地されている。(実機では高電圧パルス(強度 -500 kV、幅 3 μs、印加周波数 60 Hz)が印加されている)。カソードヒータには、定電圧・定電流電源 (Takasago, GPO16-100R) が接続されている。

カソードアセンブリの対面にこれと平行に円板状

* magomago@spring8.or.jp

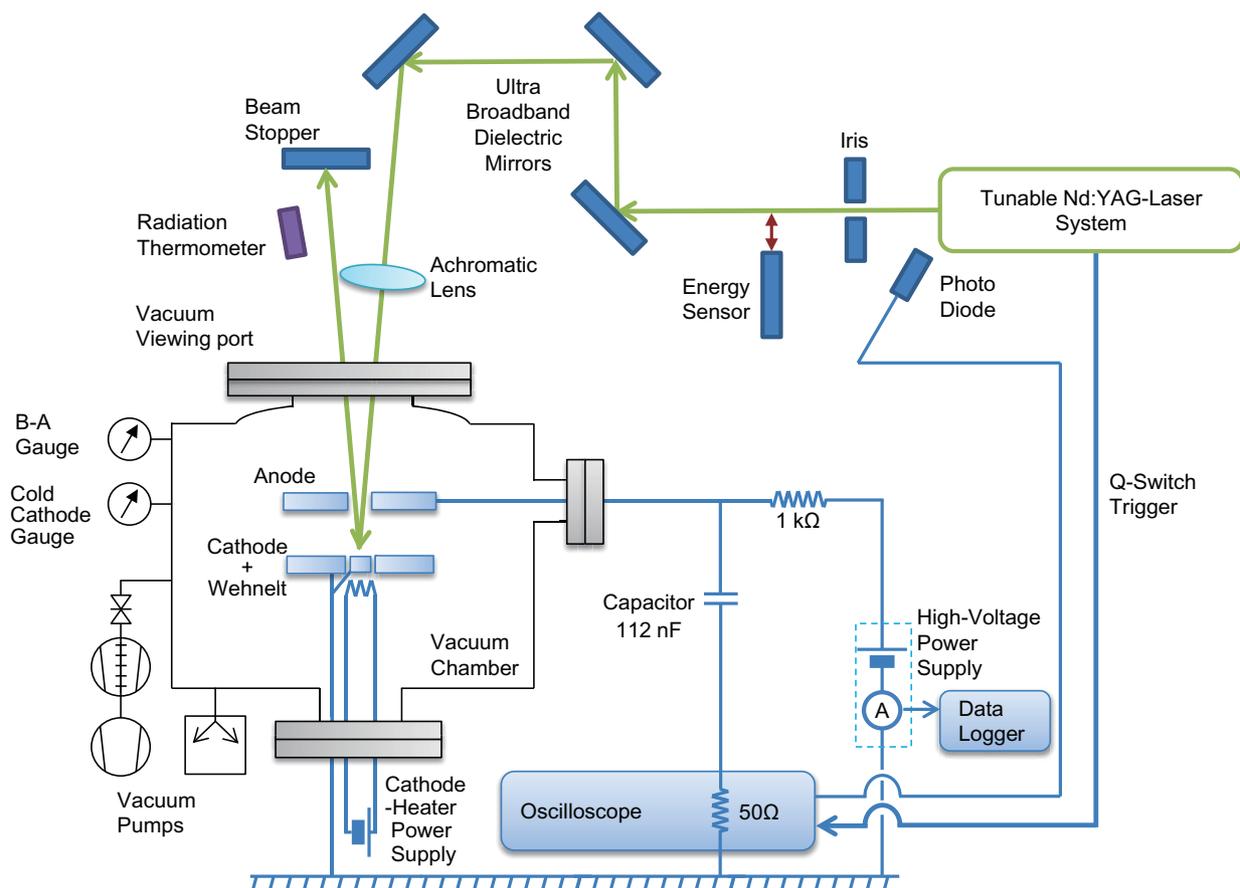


Figure 1: Schematic diagram of the experimental setup.

のステンレス製アノードが設置されている。アノードは直径 120 mm・厚さ 2 mm の円板であり、中央に水平方向 60 mm、垂直方向 10 mm の角穴を有している。カソードアセンブリとアノードの間隙は 10 mm である。高圧直流電源 (Matsusada Precision, HAR-15P20) がアノードに接続され、正の DC 高電圧を加速電圧として印加する一方、アノードに流れ込む直流電流を測定する。測定された電流値はデータロガー (Graphtec, GL7000) に収集される。

アノードの背面 (カソードと反対側) には ICF203 の真空ビューポートが装備されている。アノードの穴からカソードを覗き込むように設置された放射温度計 (Chino, IR-CA98CN/1.42(500–3500 °C)) でカソードの温度を測定する。

真空チャンバー部は、排気速度 200 L/s のスパッタイオンポンプ (ULVAC, PST-200AXII)、および、排気速度 480 L/s のターボ分子ポンプ (BOC EDWARDS, STP-451) で排気される。ターボ分子ポンプの背圧は排気速度 300 L/min のスクロールポンプ (ANEST IWATA, ISP250B) で排気される。ベーキングを行っておらず、到達圧力は 10^{-6} Pa 台前半である。内部の圧力は、コールドカソードゲージ (ULVAC, C-11) と B-A ゲージ (ULVAC, WIN-N3) でモニタする。

3.2 パルス信号処理部 [4]

アノードの高圧直流電源と直列に 1 k Ω の巻線抵抗 (TE Connectivity, ER581K0JT) が挿入されている。また、高圧直流電源に平行にコンデンサ (EXXELIA, TCF284) が 2 個並列で挿入されている。コンデンサは、周波数帯域 1 GHz のオシロスコープ (Tektronix・MDO4101C) にも接続 (DC カップリング・終端抵抗 50 Ω) されている。

オシロスコープをレーザ部からの Q-Switch トリガに同期させると、励起光により放出されたパルス状のエミッションカレントがオシロスコープに流れ込み電圧パルス波形として測定される。

3.3 レーザ部

レーザ部は、ナノ秒波長可変 YAG レーザ (EXTRA, NT342A-10)、および、レーザ搬送関連の光学部品からなる。ナノ秒波長可変 YAG レーザは、表 1 で示すパルスレーザ光を出射することができる。

出射されたレーザ光は、虹彩絞りで周辺部のハローを切り落とされた後、3 個の超広帯域誘膜平面ミラーで真空チャンバー部まで搬送される。搬送されたレーザ光は、球面アクロマットレンズで集光され、ICF203 の真空ビューポートからアノードの穴を通してカソード表面全体に照射される。

パルスエネルギーは、適宜レーザ光軸に挿入され

るエネルギーセンサー (COHERENT, J-25MB-LE) で測定する。また、虹彩絞りとレーザー本体筐体によるレーザー光の反射を見込む位置にフォトダイオード (THORLABS, DET025A) を設置し、その出力をオシロスコープに接続することでレーザーパルス波形を測定する。

Table 1: Beam Output Characteristics of Tunable Nd:YAG-Laser System

Tunable Range	410 nm – 709 nm (Accuracy ≤ 0.1 nm)
Maximum Linewidth	5.5 cm^{-1} @450 nm
Pulse Duration (FWHM)	3.7 ns@450 nm
Maximum Pulse Energy	10 mJ@450 nm (Tunable 1% – 100%)
Repetition Rate	10 Hz

4. 試験測定とその結果

開発中の本測定装置の評価・調整として、室温の CeB_6 カソードの仕事関数の測定を試みた。

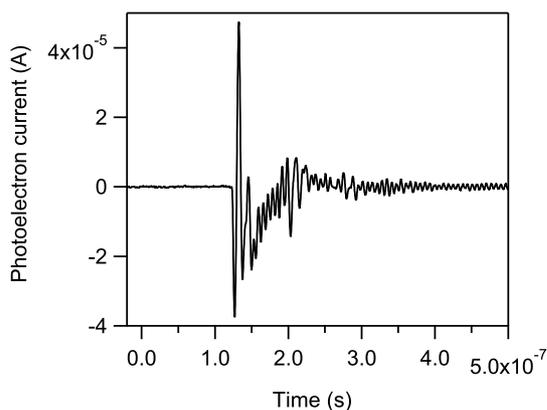


Figure 2: Laser-induced photoelectron current from the CeB_6 cathode. Cathode temperature was room temperature. Anode voltage was 3.0 kV. Pulse energy was 1.078 mJ. Wavelength was 410 nm.

アノード電圧が 3.0 kV、カソード温度が室温、レーザー光の波長が 410 nm、および、レーザー光のパルスエネルギーが 1.078 mJ の場合のレーザー光誘起の光電子電流パルスを図 2 に示す。縦軸が光電子電流で、横軸が時間である。レーザー光のパルス長と同等程度のパルス長を持つ多数のパルスが見られる。いずれのパルスのピークもレーザー光の波長が同じであれば、そのパルスエネルギーに比例して変化することが分かっている。

信号ケーブルの長さを変えることにより、203 ns のパルスは、127 ns に見られる最初のパルスの反射波であることが分かっているが、その他のパルスの由来はわかっていない。真空中の信号線のインピー

ダンス不整合もその原因のひとつと推定されるが、今後調査を行う必要がある。

本測定装置で使用したコンデンサや抵抗よりも、耐電圧が高く、高周波特性がよい部品に交換することも含めて、パルス信号処理部全体の最適化を行う必要もある。

ここでは、先頭の 127 ns のパルスを実の光電子電流パルスと仮定し、光電子収量スペクトルを取得した。図 3 に、アノード電圧が 3.0 kV、パルスエネルギーが 1 mJ、カソード温度が室温の場合の光電子収量スペクトルの 1 例を示す。縦軸は量子効率で、横軸は光子エネルギーである。

CeB_6 の仕事関数 2.39 eV [2] のあたりから、 Q_E が立ち上がっていることがわかる。しかし、光子エネルギーが 1.77 eV (700 nm に相当) での Q_E も僅かに立ち上がっており、簡素な系の光電子収量スペクトルと形状が一致しない。

光電子収量スペクトルの量子効率は、レーザー照射の強度、時間、および波長 (エネルギー) 掃引に依存することが判明している。カソード表面でのガスの吸着・脱離などの影響が懸念される。ベーキングやカソードのアニーリング等の対策を検討する必要がある。

今後はより高精度に光電子収量スペクトルを測定し、正確な仕事関数の導出を目指すつもりである。

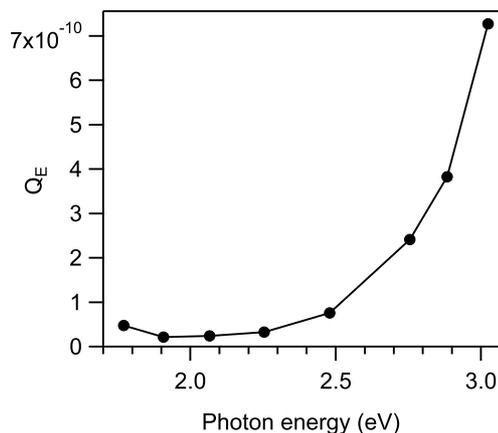


Figure 3: Photoelectron yield spectrum of the CeB_6 cathode. Cathode temperature was room temperature. Anode voltage was 3.0 kV. Pulse energy was 1 mJ.

5. まとめ

SACLA 電子銃の CeB_6 カソードでは、運転時間の経過に伴いエミッションカレントが減少するという劣化現象が見られる。我々は、現在この劣化現象を解明・防止し、長期間安定に使用できるカソードを開発するプロジェクトを進めている。その劣化現象解明の第一段階として、オフラインの光電子収量分光法による仕事関数測定装置を開発している。開発中の本測定装置に於ける初の測定として、室温のカソードの光電子収量スペクトルを測定することがで

きた。今後精度を高めて正確な仕事関数を測定し、カソード劣化現象の解明につなげていくつもりである。

参考文献

- [1] R. H. Fowler, *Physical Review* **38**, p.45-56 (1931).
- [2] K. Togawa *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10**, pp. 020703 (2007).
- [3] Kazuaki Togawa, *Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tokai, Japan, Aug.5-7, 2009, pp. 1178-1180. (in Japanese).
- [4] K. Torgasin *et al.*, *Phys. Rev. Accel. Beams* **20**, pp.073401 (2017).