

SACLA 電子銃カソードの仕事関数その場測定

IN-SITU WORK-FUNCTION MEASUREMENT OF THE SACLA ELECTRON GUN CATHODE

馬込保^{#, A, B)}, 渡川和晃^{B)}, 田中均^{B)}

Tamotsu Magome^{#, A, B)}, Kazuaki Togawa^{B)}, Hitoshi Tanaka^{B)}

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

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

A CeB₆ thermionic cathode is used for the electron gun of the X-ray free-electron laser, SACLA. The CeB₆ cathode is typically usable for an operation time of one year or less due to the decrease of emission current. In order to prolong the emission lifetime, it is necessary to reveal the physical mechanism which governs the emission degradation phenomenon on/in the cathode crystal. Because a work function (WF) of thermionic cathode is one of the main factors which determines the emission current density, precise monitoring of the WF *in-situ* operational condition is essential for tracking the status of the cathode surface. Recently, we tested the *in-situ* work function measurement in the electron-gun test equipment compatible with the SACLA gun by means of photoelectron yield spectroscopy using excitation laser lights from 410 to 709 nm and succeeded in obtaining the work function of 2.37 ± 0.01 eV at the CeB₆ temperature of 1494°C. This method can be applied to the *in-situ* work-function tracing of the operating electron gun cathode.

1. はじめに

SACLA は単結晶 CeB₆ 熱カソードを電子源に使用した世界でも類のない安定した X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設である[1, 2]。しかしながらエミッション電流の減少のため、長寿命であるべき熱電子カソードを 1 年弱で交換しなければならないというカソード寿命問題を抱えており、未だ未解決の状態が続いている[3-5]。本電子銃は SACLA のみならず SPring-8 蓄積リングへの電子ビーム入射にも使用されているため、カソードの劣化問題を解決することは SPring-8/SACLA 加速器全体にとって極めて重要な課題となっている。

我々はエミッション電流の支配的な物理量であるカソードの仕事関数を *in-situ* でモニターすることで、この劣化現象の解決の糸口を見つけることに挑んできた。パルス駆動である SACLA 電子銃での *in-situ* 測定を実現するために、ナノ秒パルスレーザー光電子収量分光法を提唱し、まずは取り扱いの容易なオフラインの仕事関数測定装置における模擬環境にてその妥当性を検討してきた[6-8]。同収量分光法にて新品カソードの仕事関数を正確に測定できたものの、正しい仕事関数の測定値に到達するまで長いもので数日以上を要し[8]、特に中古カソードに顕著に見られた仕事関数測定値の緩やかな増減を解明、抑制するには至らなかった。

我々はこの挙動が模擬環境に特有な事象に起因するものと判断し、これらを解消すべく模擬環境ではなく実機の環境、すなわち SACLA と同じ運転環境をもつ電子銃テストスタンドのカソードにて同収量分光法による仕事関数の *in-situ* 測定を行うことにした。本稿では仕事関数測定実験の詳細および今後の予定について報告する。

2. 実験手法

単色光を温度 0 K の金属表面に照射すると、ある閾値 (仕事関数) より高い光子エネルギーを照射した場合に光電子が発生する。有限温度では金属電子のフェルミ分布が広がっているため閾値よりわずかに低い光子エネルギーの単色光でも光電子が発生する。

計測した光電子電荷から光電子発生量子効率 (Quantum efficiency: QE) を算出し、閾値近傍を含む範囲で光子エネルギーを走査すると、QE のスペクトルが得られる。これを光電子収量スペクトル (Photoelectron yield spectrum: PYS) と呼ぶ。得られた PYS に理論式をフィットして仕事関数を導出する方法を光電子収量分光法という。

本稿での測定対象である SACLA 加速器用電子銃がパルス駆動であることから、照射する単色光はパルス光である必要がある。本稿ではこの理由からナノ秒パルスレーザーを入射光に採用し、この測定方法をナノ秒パルス光電子収量分光法と呼んでいる。PYS にフィッティングする理論式には R. H. Fowler が導出した関係式がよく利用されるが[9]、本稿では光子エネルギーの走査可能範囲・計算精度の向上という観点から適用する理論式として以下の式(1)を利用する。詳細は文献[8]を参照されたい。

$$QE(h\nu) = \frac{(k_B T)^2 D}{4\sqrt{\varepsilon_F} \sqrt{\varepsilon_F + \phi_{eff}}} \left[\frac{-Li_2\left(-\exp\left(\frac{h\nu - \phi_{eff}}{k_B T}\right)\right)}{h\nu} \right] \quad (1)$$

$$\phi_{eff} = \phi - \frac{e}{2} \sqrt{\frac{eE_s}{\pi\varepsilon_0}} \quad (\text{Schottky effect})$$

ただし、 $h\nu$ は入射光子エネルギー、 k_B はボルツマン定数、 T はカソード温度、 D はカソード表面からの脱出確率、 ε_F はフェルミエネルギー、 ϕ_{eff} は実効的な仕事関数、 Li_2 は 2 重対数関数、 ϕ はカソードの仕事関数、 e は素電荷、 E_s

[#] magomago@spring8.or.jp

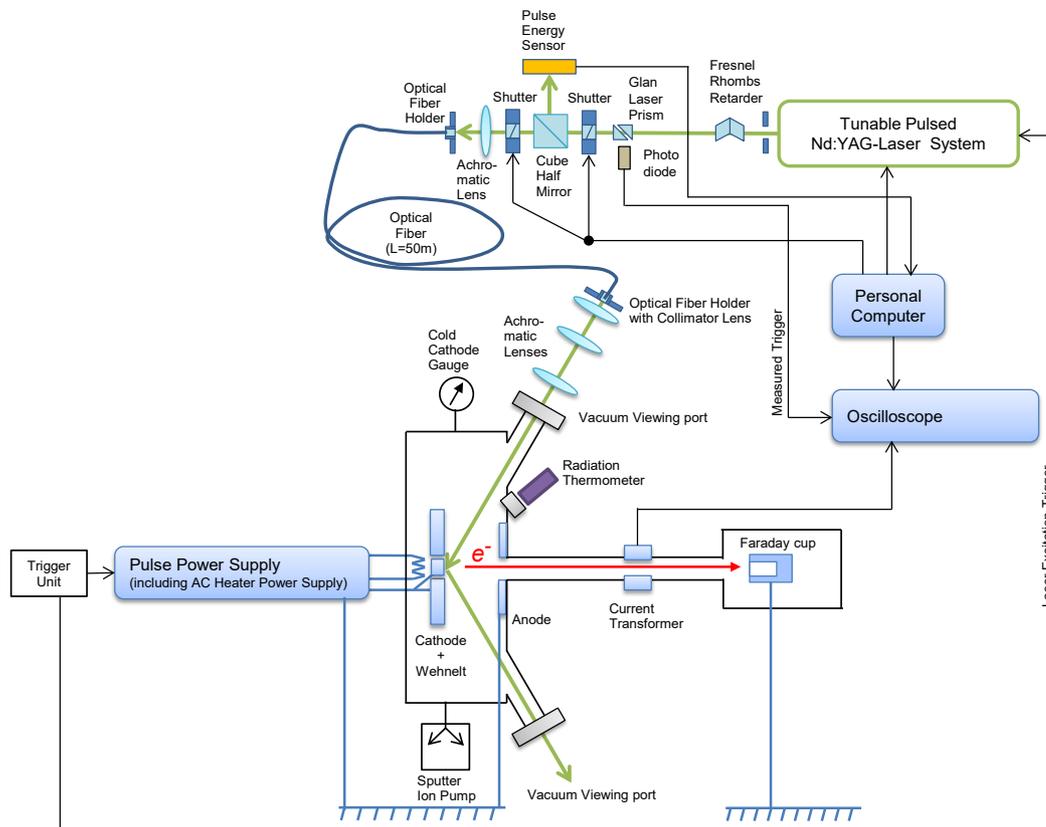


Figure 1: Schematic diagram of the experimental setup.

はカソード表面上の電場の大きさ、および、 ϵ_0 は真空の誘電率である。

3. 実験装置

Figure 1 に実験装置の構成図を示す。レーザー発振器には Q-switch 型 Nd:YAG レーザーを励起光とする光パラメトリック発振器 (EXTRA, NT342A-10) を使用した。このレーザー発振器の出力特性を Table 1 に示す。レーザー発振器から出射されたレーザー光は手動アッテネータ (フレネルロム半波長板・グランレーザープリズム) を通過後、ハーフミラーに入射する。ハーフミラーによって反射されたレーザー光は、エネルギーメータによるパルスエネルギーの常時計測に利用される。一方、ハーフミラーを透過したレーザー光は球面アchromat レンズにて集光され光ファイバーにカップリングされる。将来の SACLA 実機への装填を念頭に、またレーザー光の全波長域において可能な限り大きいパルスエネルギーを搬送できるように、コア径が 1000 μm 、クラッド径が 1035 μm 、および長さが 50 m で高濃度の水酸基を含む石英マルチモード光ファイバーを利用した。

光ファイバーによって電子銃テストスタンド脇に搬送されたレーザー光は、コリメートレンズと 3 枚の球面アchromat レンズにより真空ビューポートを通して超高真空下の電子銃カソードへ入射される。入射角は 60°で、カソード直前のビーム径は約 3 mm であった。カソード表面で

の反射光は対称な位置の真空ビューポートを通して電子銃外部へ逃がした。

Table 1: Output characteristics of the optical parametric oscillator pumped with Q-switched Nd:YAG laser.

Wavelength	410-709 nm Tunable (accuracy ≤ 0.1 nm)
Maximum linewidth	5.5 cm^{-1} at 450 nm
Pulse duration (FWHM)	3.7 ns at 450 nm
Maximum pulse energy	10 mJ at 450 nm Tunable (1%-100%)
Beam diameter	5 mm at 450 nm
Polarization	Linear
Repetition rate	10 Hz

実際にカソードに吸収されるレーザー光は、カソードまでのパルスエネルギー、カソードを見込む立体角内に入射する割合、およびカソードの反射率によって決まる。これらの値は光電子収量測定の前に評価しておいた。真空ビューポートを含めた等価な光学系を光ファイバー出口に別途組み立て、カソードと等価な位置にエネルギーセンサーを設置した。これにより実際にカソードに照射さ

れるパルスエネルギーと常時計測用のエネルギーメータでの計測値との間に対応をつけた。波長に依存するが1:0.13~1:0.32のパルスエネルギー比であった。また、本光学系にてカソードと等価な位置に CCD カメラを取り付け、ビームプロファイルを計測した。計測されたビームプロファイルから、カソードに向かうレーザー光のパルスエネルギーの 80%がカソードに到達することを確認した。反射率は 836°Cでの測定結果[8]から、複素屈折率の温度依存性が無視できる仮定のもとで算出した。

Table 2: Properties of the Gun

Beam energy	500 kV
Peak current	1 A
Pulse duration (FWHM)	3 μ s
Repetition rate	60 Hz (adjustable)
Normalized emittance (rms)	0.6 mm mrad
Cathode	CeB ₆ single crystal
Cathode Surface Normal	<100>
Rated cathode temperature	1500°C (adjustable)

電子銃テストスタンドは SACLA 実機と完全互換のオフライン電子銃とその下流の機器からなる。電子銃の主な仕様を Table 2 に示す。今回は実機で未使用の新品カソードを電子銃に装填した。電子銃から出射された電子ビームは、磁気レンズ、ステアリングマグネットにより下流のカレントトランス(CT)モニターを通過しビームダンプとしても機能するファラデーカップに流れ込む。カソード温度は実機同様に、電子銃のコバルガラス製真空ビューポートを通して放射温度計で測定した。

電子銃の駆動用パルス電源へのトリガーを分岐し、レーザー発振器のレーザー発振トリガーとした。レーザー発振器の繰り返し周波数が 10 Hz に制限されているので、本測定では電子銃の繰り返し周波数も 10 Hz にした。

この実験装置を使用することで、以下のようにオフラインの仕事関数測定装置の模擬環境に起因する問題を一気に解消することができた。1) 光電子をアノードを通過させて CT モニターで計測することで、アノードからの電子刺激脱離をなくした。2) カソード温度を 836°C から 1500°C に上げることでカソード表面の再構成、およびカソード表面からの熱脱離の速度を向上することができた。

4. 実験手順

レーザー光波長を 410 nm から 700 nm まで 3 回走査し、各波長について以下の操作を行い PYS を取得した。1) 計測パルスエネルギーを 40-90 μ J に調整しカソードに照射し CT モニターの出力信号を 512 回平均する。2) 引き続きレーザー光をシャッターで遮光した状態で CT モニターの出力信号を 512 回平均し、熱電子を含む測定系のバックグラウンドとする。3) バックグラウンドを引いた正味の光電子パルス起因の出力信号から QE を算出する。

最後に取得した PYS から仕事関数を算出する。

5. 実験結果・考察

Figure 2 に典型的な CT モニターで測定された電流信号を示す。レーザー光波長は 410 nm である。赤色曲線がレーザー光照射時の電流信号、緑色曲線がレーザー光遮光時の電流信号である。赤色曲線には大きなパルスとその左肩にある幅 4 ns のシャープなピークが見られる。緑色曲線との比較からシャープなピークは光電子起因であり、大きなピークは熱電子起因であると考えられる。熱電子起因のピークの幅は実際は 3 μ s であるが、オシロスコープのオフセットで 0.8 μ s 程度に短く見えている。光電子起因のシャープなピークを別として赤色曲線と緑色曲線は大きくずれている。この不一致はパルス電源のスイッチ ON のジッター、レーザー発振のジッター、およびベースライン自体の変動によると考えられる。

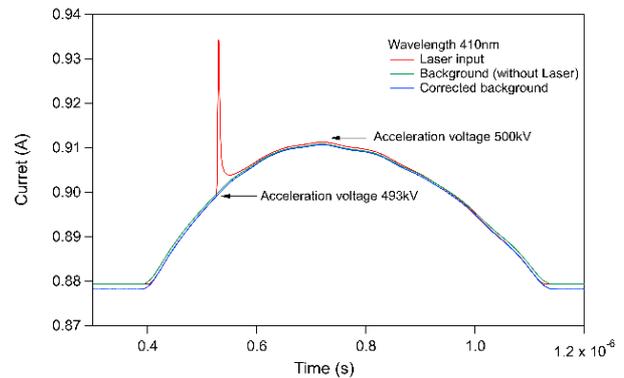


Figure 2: Total emission currents measured using a CT monitor.

レーザー照射の有無にかかわらず、レーザー照射前は熱電子起因のピークのみであり、したがって赤色曲線と緑色曲線の電流に差はないという考えのもと、光電子起因のピーク立ち上がりより前の時間(0.450-0.521 μ s)で赤色曲線との差分が 0 になるよう緑色曲線をフィッティングしたのが青色曲線である。

Figure 2 の赤色曲線から青色曲線を引いた電流信号を Fig. 3 に赤色曲線で示す。レーザー光と同じ形状のピークが見られるが、裾野が非常に長い。裾野の長さは CT モニターの応答関数によると思われる。このようなシャープなピークに対する応答関数を正しく求める必要がある。電荷総量がわかればよいので、下流のファラデーカップで計測することも可能である。その際は輸送効率の影響を十分に考慮しなければならない。ここでは第 1 次近似としてレーザー光のパルス全値全幅と同じ 100 ns のベースライン(Fig. 3 の緑色点線)より上側が正しい光電子起因の電流パルスであると仮定して QE を導出した。

Figure 4 に取得した PYS を示す。CT モニターの応答関数が分からない点を考慮し式(1)にオフセットを加えた関数をフィッティングしている。CeB₆ カソードの仕事関数は、Schottky 効果による低下分を補正して 1494°Cにて 2.37 \pm 0.01 eV と算出できた。信号処理についての課題はあるものの、算出された仕事関数は文献[2]、[8]ともほぼ一致しており妥当な値と考えられる。オフライン装置と異なり、適正な仕事関数が直ちに再現性良く測定できて

おり、電子銃テストスタンドの本測定前後の安定運転を考慮すると、定常的に適正な仕事関数が測定できると思われる。オフラインの仕事関数測定装置で見られた不具合は解消したと考えられる。

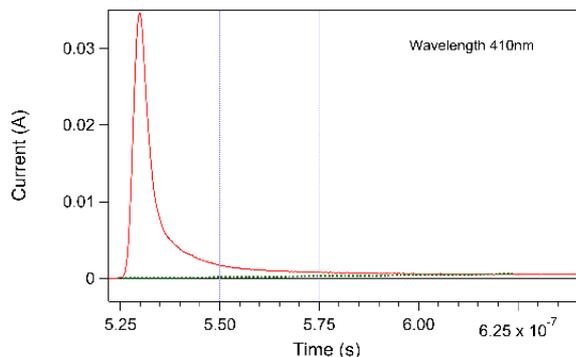


Figure 3: Enlarged view of the photoemission current.

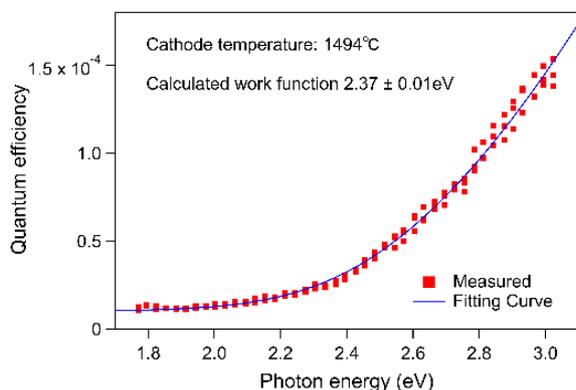


Figure 4: Photoelectron yield spectrum of hot CeB₆.

4. まとめと今後の予定

実機と完全互換である SACLA 電子銃テストスタンドにおいて、10 Hz 定常運転中に高温 CeB₆ カソードの仕事関数を *in-situ* で測定し、カソード温度 1494°Cにて仕事関数 2.37 ± 0.01 eV を得た。この値は新規カソードの仕事関数として過去に他の手法で測定した値と矛盾しない値であった。

光電子パルスバックグラウンドである熱電子パルスからより精密に弁別するためには以下の対策が必要である。1) 電子銃テストスタンドのパルス電源のジッター、レーザー発振のジッター、およびベースラインの変動による影響をさらに低減する。2) 電子パルス(幅 4 ns)に対するCTモニターの応答関数をより正しく評価する。3) 輸送効率の影響も考慮しつつ、下流のファラデーカップで電荷量を測定する。

今後は新旧のカソードの仕事関数の比較を通してカソ

ード寿命決定の主要因の特定とその長寿命化への対策を行うとともに、SACLA 電子銃への実装を検討する。また、仕事関数のカソード温度依存性等の評価を行い、CeB₆ カソードに関する知見をさらに広げる予定である。

参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region”, *Nature Photonics* 6 (2012) pp. 540-544.
doi:10.1038/NPHOTON.2012.141
- [2] K. Togawa *et al.*, “CeB₆ electron gun for low-emittance injector”, *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* 10, 020703 (2007).
doi:10.1103/PhysRevSTAB.10.020703
- [3] K. Togawa *et al.*, “Toward lifetime extension of the thermionic gun cathode at SACLA”, *Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2016)*, August 8-10, 2016, Chiba, Japan, pp. 473-475, MOP049,
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP049.pdf
- [4] K. Togawa *et al.*, “Operational experiences and issues of the CeB₆ electron gun”, *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018)*, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, pp. 893-895, THP042,
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/THP0/THP042.pdf
- [5] K. Togawa, “Lifetime improvement of the CeB₆ thermionic cathode at the X-ray free-electron laser facility SACLA by avoiding backward-accelerated electrons”, *The 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC2023)*, May 7-12, 2023, Venice, Italy, unpublished.
- [6] T. Magome *et al.*, “Development status of the offline work function measurement system for CeB₆ cathodes used in the electron gun of SACLA”, *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018)*, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, pp. 896-899, THP043,
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/THP0/THP043.pdf
- [7] T. Magome *et al.*, “Improvement of the in-site work function measurement system for CeB₆ cathodes used in the electron gun of SACLA by impedance matching of the signal line”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, July 31-August 3, 2019, Kyoto, Japan, pp. 830-832, THPI037,
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THPI/THPI037.pdf
- [8] T. Magome *et al.*, “Precise measurement of the work function of a hot CeB₆ thermionic cathode through photoelectron yield spectroscopy using a tunable pulsed laser”, *Journal of Applied Physics* 133, 165107 (2023).
doi:10.1063/5.0139366
- [9] R. H. Fowler, “The analysis of photoelectric sensitivity curves for clean metals at various temperatures”, *Physical Review* 38 (1931), pp.45-56.
doi:10.1103/PhysRev.38.45