

LaB₆ と CeB₆ の光陰極運転に関する報告は既になされているが[4-11]、それぞれ異なる条件下で実験されており、それらの測定結果を直接比較する事はできなかった。本研究ではこれらの材料の光電子放出特性を同じ実験環境下で測定・比較し、熱陰極材料光陰極の材料選定のための基礎的知見とすることも目的とした。LaB₆とCeB₆ はほぼ等しい仕事関数を有するが、熱電子放出の温度特性は大きく異なる。この違いは Table 1 に示した代表的な材料特性の一つである Richardson 定数[12]で表される。陰極の温度が絶対温度 T の際の熱電子放出の電流密度は Richardson-Dushman の式

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{k_B T}\right) \quad (1)$$

で表すことができ、 A が前述の Richardson 定数である。また ϕ は仕事関数、 k_B はボルツマン定数である。この式より、同じ陰極温度でLaB₆がCeB₆の約8倍の熱電子放出を生じる事が分かる。本研究では熱電子励起を光電子励起の補助として利用する手法を実施するため、同じ陰極温度における量子効率の向上はLaB₆の方が高くなることが予想される。一方でCeB₆はLaB₆よりも低蒸発率で炭素汚染耐性が高く熱陰極運転時の寿命が長い、光陰極運転時における寿命においても有利となる可能性がある。

Table 1: Properties of LaB₆ and CeB₆ Cathodes [12]

	LaB ₆	CeB ₆
Richardson constant (A cm ⁻² K ⁻²)	29	3.6
Melting point (K)	2483	2463
Work function (eV)	2.7	2.65

2. 実験装置

実験装置の概略を Figure 2 に示す。陽極はステンレス (SUS304) 製平板にレーザー導入用の穴を開けたものである。電界の対称性を向上させるために、陽極板中心線に関して対称な位置に使用しない穴を設けている。陰極-陽極間には 1 kV を印加しており、陰極表面における電界強度は約 0.1MV/m である。陰極は Top Hat 形状、直径 1.72 mm、Applied Physics 製の LaB₆<100>、CeB₆<100>を使用した。陰極温度の計測には赤外線放射温度計を使用した。真空容器の観察窓近傍にフリップミラーを設置し、レーザーの導入と温度計測を同一の窓を通して行う構成となっている。光陰極駆動レーザーには 5 ns パルス長のナノ秒 Nd:YAG レーザー (Continuum 社製 SureliteII-10)を使用した。レーザー照射による陰極の平均温度上昇を防ぐために、繰り返し周波数は 2 Hz に設定している。本実験では Nd:YAG レーザーの 2、3、4 次高調波の 532、355、266 nm を使用した。266 nm 以外の 2 波長については基本波の 1064 nm をレーザー装置近傍で、266 nm については真空容器近傍で 532 nm を非線形光学結晶により変換した。パルスエネルギーは光路にレーザーエネルギーメーターを挿

入することで計測している。真空状態は陰極温度の上昇による蒸発の増加に応じて $5 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$ Torr の間で遷移した。

電源系、計測系の等価回路を Figure 3 に示す。直流の熱電子放出電流とナノ秒パルス状の光電子放出電流を切り分けて測定する為、測定回路を工夫した。直流の熱電子放出電流はアナログ電流計で計測し、パルス状の光電子放出電流はコンデンサにより AC カップリングされた Figure 3 右側の回路を流れ、オシロスコープで計測される。陰極温度はヒーターの電流により制御した。また、陰極を陰極ヒーター電源により 1~3V 程度、真空チャンバーと比べて正電位にバイアスする事で陰極から放出された全ての電子が陽極に捕集される様にした。

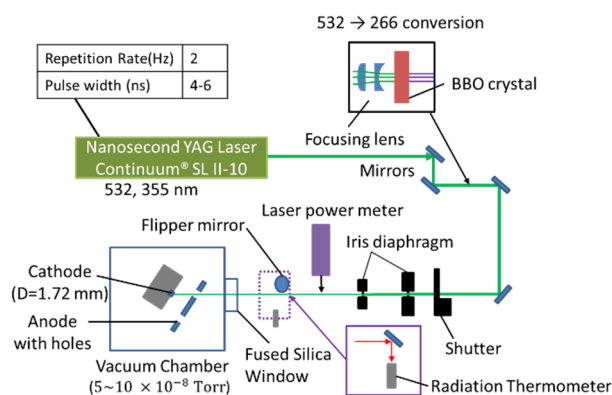


Figure 2: Schematic diagram of experimental setup.

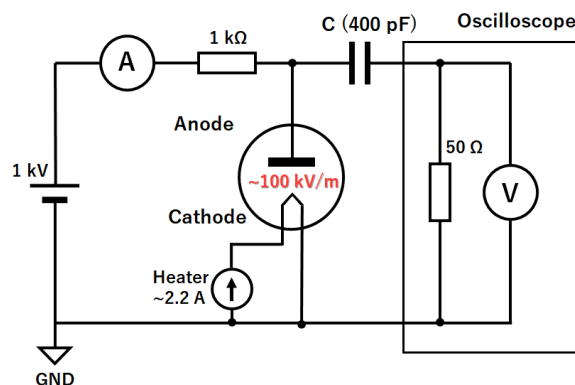


Figure 3: Equivalent circuit of the experimental setup.

3. 結果と考察

3.1 熱電子放出

355 nm レーザー照射実験時に計測した LaB₆ および CeB₆ の熱電子放出電流の温度特性を Figure 4 に示す。式(1)と Table 1 の Richardson 定数より予想された通り、同じ温度における熱電子放出電流は LaB₆ の方が高い結果となっている。計測に使用したアナログ電流計の最小読み取り値が 0.02 mA であった為、0.02mA 以下の電流値の計測は行っていない。

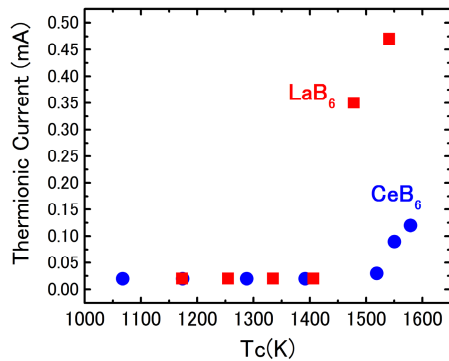


Figure 4: Thermionic emission from LaB₆ and CeB₆.

3.2 355 nm レーザーによる光電子放出

本実験で使用した装置の構成では、照射レーザーのビームスポットサイズの計測や偏光の制御・計測が行えていないため、量子効率の絶対値をこの計測から評価する事は困難である。そのため、量子効率の相対的な比較のために次式で表される相対量子効率 η を導入する。

$$\eta = \frac{\text{number of electrons detected}}{\text{number of incident photons}} \quad (2)$$

測定結果から η を算出する際は次式を用いた。

$$\eta = \frac{Q/e}{P_L/E_p} \quad (3)$$

ただし Q は計測した光電子の電荷量[C]、 e は電気素量 [C]、 P_L はレーザーパルスエネルギー [J]、 E_p は光子エネルギー [J] である。

Figure 5 に 355 nm レーザー照射時の LaB₆、CeB₆ の相対量子効率の陰極温度依存性を示した。355 nm レーザーの光子エネルギーは約 3.5 eV であり、両陰極材料の仕事関数よりも高い。本実験における平均レーザーパルスエネルギーは LaB₆ の実験時は 13 μ J、CeB₆ の実験時は 12.5 μ J であった。熱電子電流との比較のため、右の縦軸にレーザーパルスエネルギーを 13 μ J に換算した際のピーク電流を示した。LaB₆ は 1400 K 前後、CeB₆ は 1500 K 前後で量子効率が急峻に上昇しており、熱電子放出電流の立ち上がりと非常に近いことが分かる。量子効率上昇が指数的事であることから、量子効率上昇の要因が意図した通り熱励起の補助によるものであると考えられる。いずれの材料においても量子効率が一桁以上上昇しているため、熱電子電流が顕著にならない温度領域まで加熱して量子効率を高めることは、ある程度までの熱エミッタンスや暗電流を許容できる赤外 FEL 装置などにおいて有効であると考えられる。また、同じ温度でより多くの光電子放出を得られる LaB₆ が熱エミッタンス低減の観点からは有利であると考えられるが、CeB₆ の方が先述のように長寿命であることが予想されるため、どちらが光陰極として優れているかを判断するためには、長時間運転時の量子効率の時間変化の計測等、更なる実験が必要である。

なお、計測開始が 1000 K 付近になっている理由は放射温度計の計測下限温度が 1000 K 前後であったためである。また LaB₆ について、低温では陰極表面への酸素の吸着により仕事関数が 4.0 eV まで上昇すること [13]、陰極を 1000 °C まで加熱することで吸着した酸素の除去が可能であること [7] が報告されている。本実験においては 1550 K 以上に陰極を加熱し、真空度が安定するまで待機してから陰極温度を実験開始温度に戻す操作を行っている。

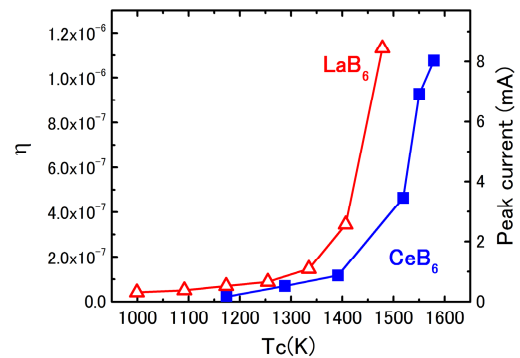


Figure 5: Temperature dependence of relative QE of LaB₆ and CeB₆ @355 nm. The right vertical axis shows the corresponding peak current when the cathode is excited by the 355-nm laser with the pulse energy of 13 μ J and the pulse duration of 5 ns.

3.3 駆動レーザー波長依存性

他の 2 波長についても同様の実験を行った。Figure 6 に LaB₆ の、それぞれの波長における相対量子効率の温度特性を示した。これより、波長が長く光子エネルギーが低くなるほど、量子効率の陰極温度依存性が強くなる事が分かる。これは Figure 1 で模式的に示したように、光子エネルギーが仕事関数より十分に高い場合は取り出すことのできる電子の存在確率が高く、熱励起によりエネルギー分布が変調されても大きく変化しないのに対し、光子エネルギーが仕事関数に近いかそれより低い場合では、その影響が取り出しうる電子の量に強く及ぶためであると考えられる。なお、532 nm レーザー照射時の熱励起による量子効率上昇は著しいが、熱電子電流の立ち上がりも同じ温度領域で発生することが Figure 4 から分

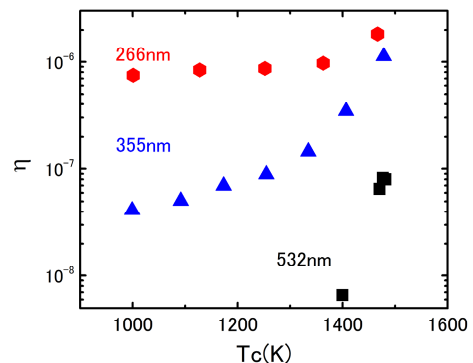


Figure 6: Comparison of the temperature dependence of relative QE by drive laser wavelength.

かる。したがって、実用的な駆動レーザー波長と加熱温度の選択には陰極を使用する装置において許容できる暗電流と熱エミッタンスを考慮に入れた検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、熱陰極材料として広く使用されている LaB_6 及び CeB_6 を光陰極として利用し、その量子効率を熱励起の補助により改善する手法を提案した。また、この手法の効果が十分であれば光電子放出に必要な閾値（仕事関数）以下の光子エネルギーでも、光電子放出が可能であると考えられるため、光子エネルギーが仕事関数を超える 266、355 nm に加え、仕事関数よりも低い 532 nm のレーザーを陰極にそれぞれ照射し、量子効率向上の実現性を確認する実験を行った。実験の結果、 LaB_6 と CeB_6 の光電子放出特性の温度依存性が確認でき、熱励起の補助による量子効率の向上が可能である事と、同じ温度における量子効率は LaB_6 の方が高い事が明らかになった。また、両材料の結果の比較から、量子効率の温度依存性の傾向はその材料の熱電子放出特性から推測できることが分かった。続いて、熱励起の補助により、光子エネルギーが仕事関数よりも低い 532 nm レーザーでも光電子放出が可能であるが、同じ温度領域で熱電子電流の急峻な増加が生じることを確認した。最終的に、三種類の波長の比較から熱励起による量子効率の改善が長波長であるほど顕著であることが明らかとなった。

以上のように、熱励起による光電子放出の量子効率の向上が可能であることが明らかになり、六ホウ化物熱陰極を光陰極として使用する際のレーザーの出力や波長に対する要求が軽減できる可能性が示された。一方、 CeB_6 が LaB_6 より長寿命であることが予想されるもののその検証までは行えておらず、また 0.02 mA 以下の熱電子電流が計測できず低温領域における光電子放出のピーク電流との比較も行えていないため、実用化のためには更なる検証が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、京都大学エネルギー理工学研究所の M. Bakr 博士には熱陰極材料に関する多くの助言を頂きました。心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Jeremy M. *et al.*, “Back-bombardment compensation in microwave thermionic electron guns Jeremy”, Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams 17, 120402 (2014); <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevSTAB.17.120402>
- [2] S. Thorin *et al.*, “Characterization of the beam from thermionic RF-gun adapted for photocathode operation”, Proceedings of FEL2009, Liverpool, UK;

- <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/FEL2009/papers/tupe33.pdf>
- [3] S. Giermann *et al.*, “Operating a tungsten dispenser cathode in photo-emission mode”, Proceedings of PAC09, Vancouver, Canada; <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/PAC2009/papers/mo6rfrp088.pdf>
- [4] P.G.O’Shea *et al.*, “Radio frequency photoinjector using LaB_6 cathode and a nitrogen drive laser”, App. Phys. Lett., Vol. 73, No. 3, 20 July 1998; <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/73/3/10.1063/1.121851>
- [5] H. Zen *et al.*, “Feasibility Study of Photocathode Operation of Thermionic RF Gun at KU-FEL”, Proceedings of IPAC’16, Busan, Korea, MOPOW018; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/mopow018.pdf>
- [6] D.J. Bamford *et al.*, “The search for rugged, efficient photocathode materials”, Nucl. Instrum. Meth. A318 (1992) 377-380; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016890029291085N>
- [7] M. Asakawa *et al.*, “Experimental studies of photocathode materials for FELs”, Nucl. Instrum. Meth. A 331 (1993) 302-306; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016890029390063N>
- [8] S. Mogren *et al.*, “Thermionic and threshold photoemission energy distributions from LaB_6 (110).”, Surface Science 186 (1987) 232-246; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039602887800456>
- [9] M. Boussoukaya *et al.*, “Pulsed Photocurrents from Lanthanum Hexaboride Cathodes in The ns Regime”, Nucl. Instrum. Meth. A264 (1988) 131-134; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900288909023>
- [10] S.L.Zhou *et al.*, “Synthesis and properties of CeB_6 thermionic cathode with {001} fiber texture by reactive spark plasma sintering method”, IVESC 2010, Nanjing, China; http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5644401
- [11] H. Sugawara *et al.*, “Extreme Ultraviolet Photoemission of CeB_6 and PrB_6 ”, J. of the Physical Society of Japan, Vol. 51, No. 3, March, 1982, pp.915-921; <http://journals.jps.jp/doi/abs/10.1143/JPSJ.51.915>
- [12] J. M. Lafferty, “Boride Cathodes”, Journal of Applied Physics 22, 299 (1951); <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/22/3/10.1063/1.1699946>
- [13] R. Nishitani *et al.*, “Oxygen Adsorption on the LaB_6 (100) Surface Studied by UPS and LEED”, Surface Science, 92 (1980) 191-200; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0039602880902538>