

# LaB<sub>6</sub>及びCeB<sub>6</sub>光陰極の温度・照射レーザー波長依存性

---

守田 健一, 全 炳俊, 増田 開, Torgasin Konstantin, Suphakul Sikharin,  
桂山 翼, 山下 大樹, 紀井 俊輝, 長崎 百伸, 大垣 英明

京都大学エネルギー理工学研究所



# 概要

---

- 背景
- 目的
- 実験装置
- 結果と考察
- まとめ

# 光陰極に要求される特性

高量子効率

長寿命

低コスト

これらをすべて同時に満たす材料は発見されていない

## 光陰極特性の比較

	半導体 (Cs表面処理GaAs※1,4)	金属化合物 (LaB <sub>6</sub> (100) ※2,3,4)
量子効率 (室温, 3.5 eVレーザー照射)	➤ 10%	< 0.1%
仕事関数	≤1.4 eV	2.66 eV
寿命	< 20h@10 <sup>-9</sup> Torr	10 <sup>3</sup> h@10 <sup>-9</sup> Torr

※1 K.Uhchida et al. , IPAC (2014) MOPRI032

※2 S. Garrbe, phys. stat. sol. (a) 2, 497 (1970)

※3 M.Boussoukaya et al, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 264 (1988) 131-134

※4 D. Satoh et al., PASJ (2013) 540-543

# 先行研究

## 半導体光陰極材料の長寿命化

- GaAs<sup>※1</sup>:  
Cs - Te フィルムによる表面処理.  
→高量子効率を維持した上での長寿命化が見込まれている.

## 熱陰極材料光陰極の量子効率改善

- LaB<sub>6</sub><sup>※5</sup>:  
陰極加熱により、汚染による量子効率の低下を防止.  
→量子効率の温度依存性が確認されている.
- Ir - Ce化合物:  
新材料Ir<sub>5</sub>Ce<sup>※4</sup>の開発.  
→比較的高い量子効率(0.27%@266nm), 長寿命(>>1000h, LaB<sub>6</sub>), 低要求真空度 (~10<sup>-8</sup>Torr)の実現.

※1 K.Uhchida et al., IPAC (2014) MOPRI032

※4 D. Satoh et al., PASJ (2013) 540-543

※5 M. Asakawa et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 331 (1993) 302-306

# 材料の選定

---

金属六ホウ化物: 低仕事関数, 長寿命

→ 熱陰極材料の中では光陰極運転時の優位性も期待される.

LaB<sub>6</sub>(100):

- 熱陰極として広く利用
- 光陰極運転の報告が複数ある

CeB<sub>6</sub>(100):

- 熱陰極として広く利用
- LaB<sub>6</sub>とほぼ等しい仕事関数
- LaB<sub>6</sub>に比べて汚染耐性が高い

LaB<sub>6</sub>, CeB<sub>6</sub> 両材料の光電子放出特性を同一条件下で実験した報告はない

# 熱陰極材料光陰極改善の手法

## 熱励起による量子効率改善

熱励起による電子のエネルギー分布変調  
(熱陰極の加熱機構が利用可能)

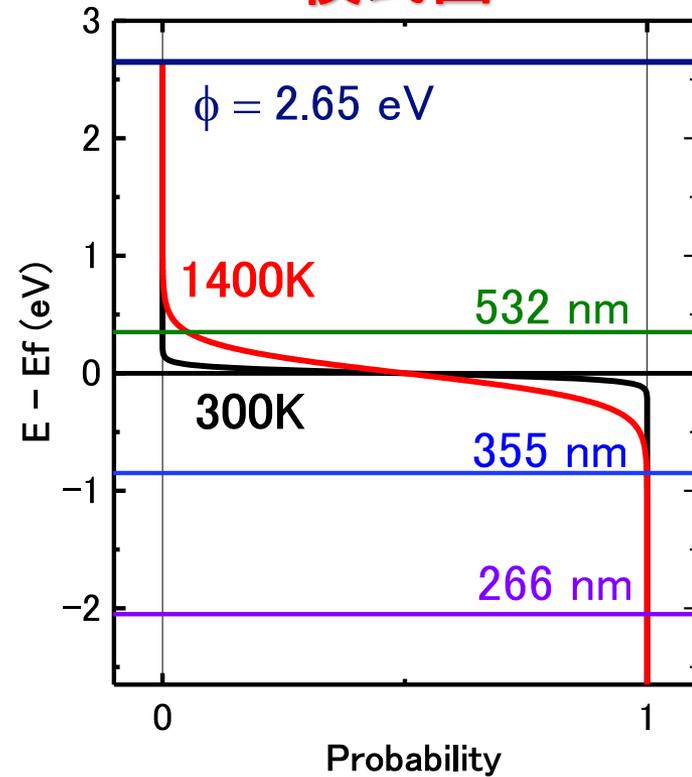


同じ波長のレーザーで抽出可能な  
電子数の増加



- ✓ 量子効率の向上
- ✓ 光電子放出に必要な光子エネルギー低減(長波長化)の可能性

## 電子のエネルギー分布変調の 模式図



# 目的

- ✓ 広範な駆動レーザー波長、陰極温度における金属六ホウ化物熱陰極材料の光電子放出特性に関する基礎的な知見を得る
- ✓ 熱励起を用いた量子効率改善の実現可能性を確認する



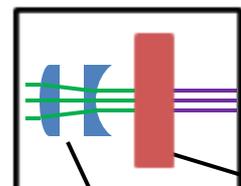
広範な温度において  $\text{LaB}_6$  および  $\text{CeB}_6$  に 266, 355, 532 nm レーザーを照射し光電子放出特性を計測した。

# 実験装置

繰り返し周波数(Hz)	2
パルス長(ns)	4-6



532→266 nm変換



BBO結晶

集光レンズ

Nanosecond Nd:YAG Laser  
Continuum® SL II-10

532, 355 nm

ミラー

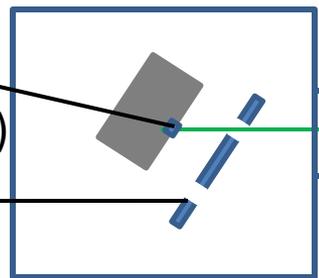
フリッパーミラー

エネルギーメーター

絞り

シャッター

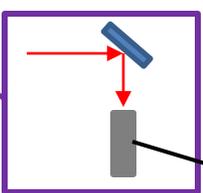
陰極  
(D=1.72 mm)  
陽極



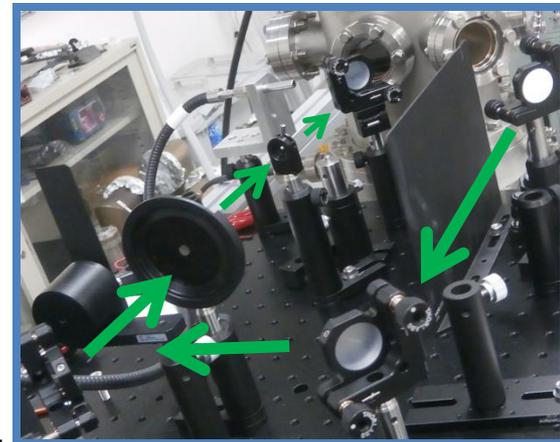
真空容器

( $5 \sim 10 \times 10^{-8}$  Torr)

人工石英窓

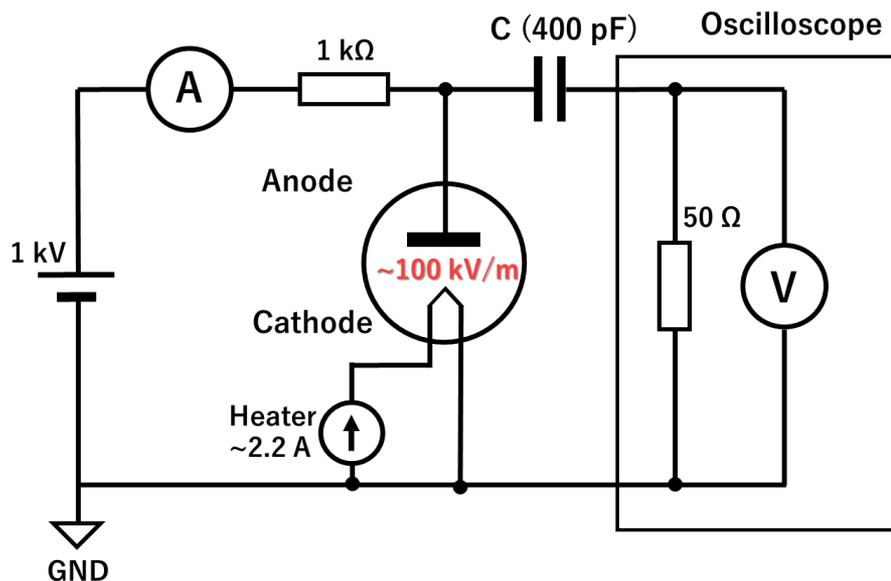


放射温度計

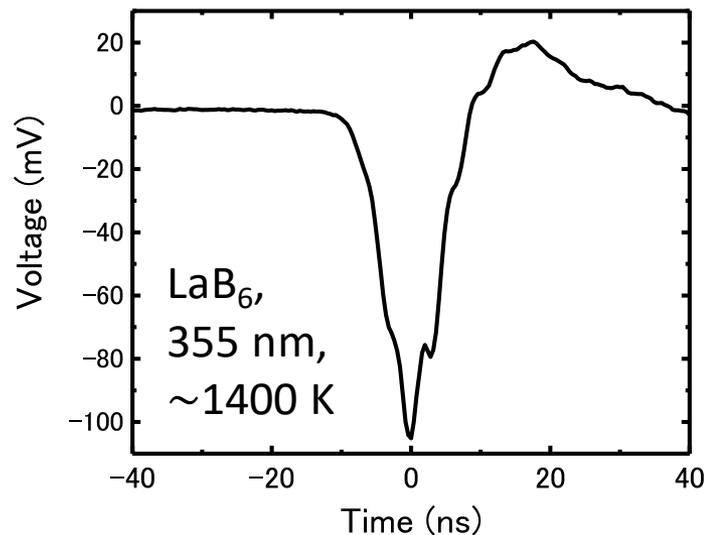


# 電流計則

## 等価回路



## 光電子放出の波形



- ✓ 熱電子電流(直流): 直流電流計
- ✓ 光電子電流(パルス状): ACカップリングされたオシロスコープにより計測

- ✓ 10 ns程度の立ち上がり、立下り  
→ レーザー加熱による熱電子放出の急激な増加ではない

# 量子効率の相対評価

本研究における実験装置では量子効率の直接評価が困難:

- 陰極上におけるレーザースポットサイズ計測が行えていない.
- 偏光の計測・制御が行えていない.
- 電流計測回路の厳密な校正が行えていない(特に直流計測)

→ 相対量子効率 $\eta$ の定義:

$$\eta = \frac{\text{計測した光電子数}}{\text{パワーメーターで計測した光子数}}$$

計測結果からの計算方法:

$$\eta = \frac{Q/e}{E_L/E_P}$$

Q:光電子の電荷[C]

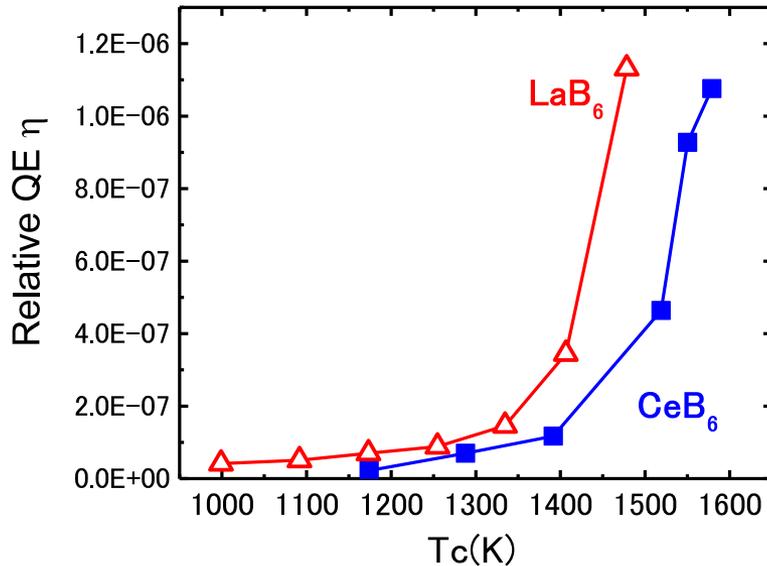
e: 電気素量[C]

$E_L$ :レーザーパルスエネルギー[J]

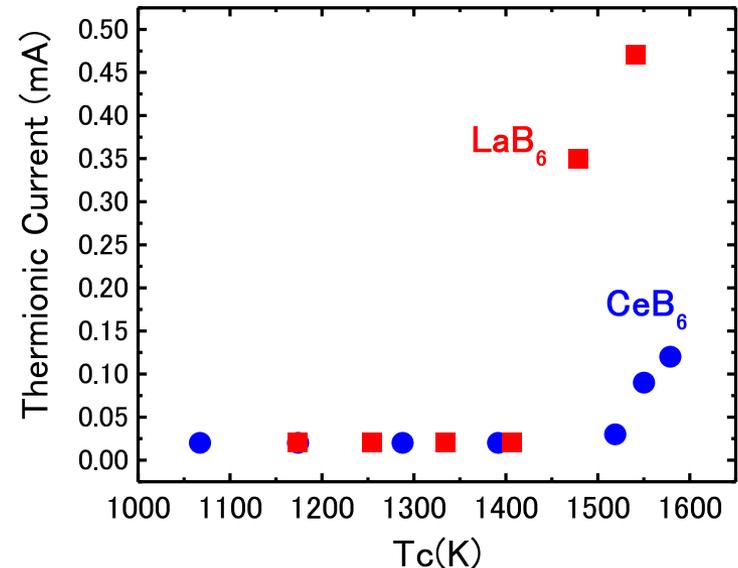
$E_P$ :光子エネルギー[J]

# LaB<sub>6</sub>とCeB<sub>6</sub>の比較@355 nm

相対量子効率 @355 nm.



熱電子放出



LaB<sub>6</sub>, CeB<sub>6</sub>の材料特性.\*6

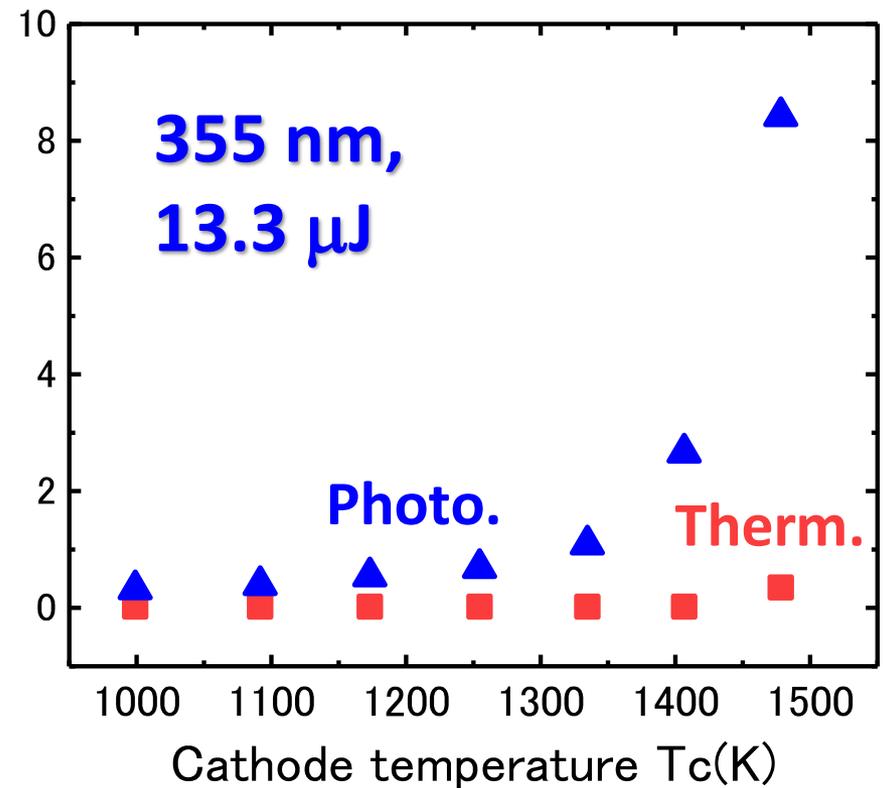
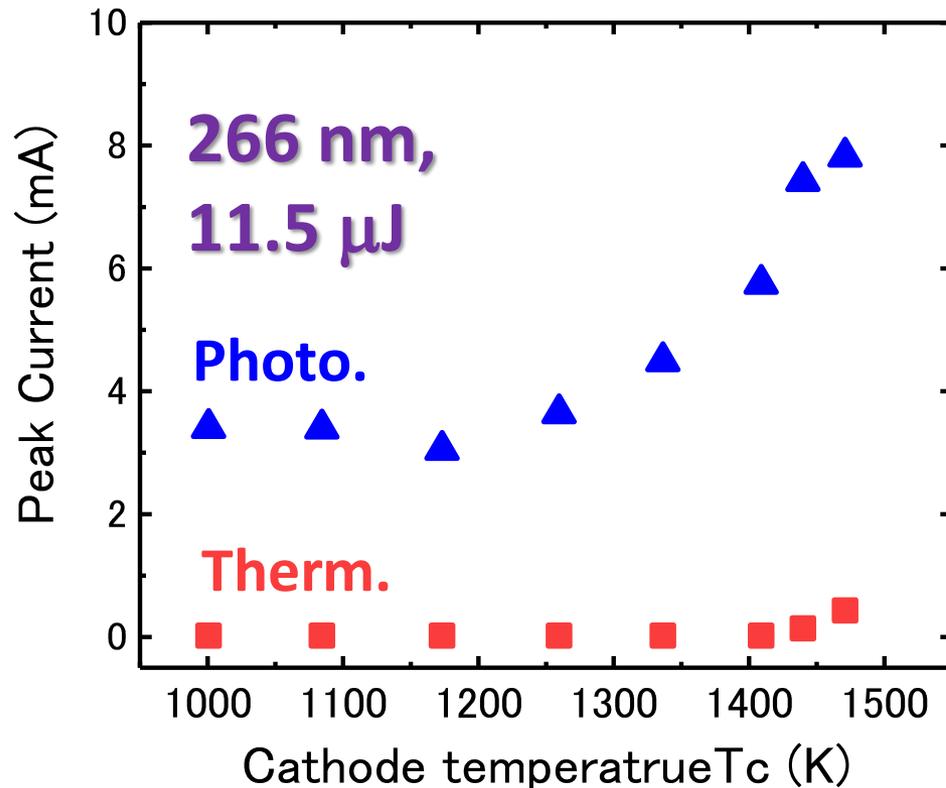
	LaB <sub>6</sub>	CeB <sub>6</sub>
仕事関数(eV)	2.66	2.59
Richardson 定数 (A/cm <sup>2</sup> /K <sup>2</sup> )	29	3.6

- 同じ陰極温度では  $\eta_{\text{LaB}_6} > \eta_{\text{CeB}_6}$
- LaB<sub>6</sub>とCeB<sub>6</sub>で異なる特性: Richardson定数  
→ 同じ温度ではLaB<sub>6</sub>の方が熱励起された電子を多く有する.
- どちらが光陰極として優れているか判断するにはさらに寿命に関する検討が必要.

\*6 J.M. Lafferty, J. Appl. Phys. 22, 299 (1951) 299-309

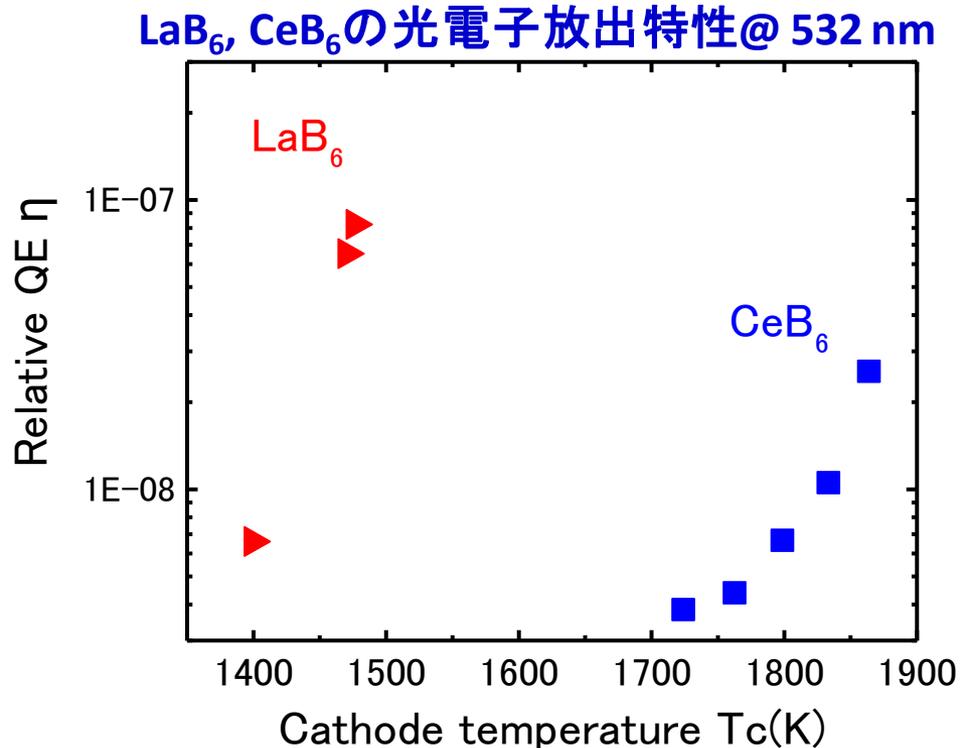


# 短波長レーザー照射時のLaB<sub>6</sub>の光電子放出特性



- 266 nmでも光電子放出の陰極温度依存性を確認
- 量子効率の改善は355 nmの方が顕著
- 使用する装置に応じて暗電流を考慮する必要がある

# 532 nmレーザーによる光電子放出 ( $2.3 \text{ eV} < \phi = 2.65 \text{ eV}$ )



- ✓ 高温において計測可能な光電子放出を確認.
- ✓ 陰極温度の上昇により、光電子放出確認点より1桁ほど量子効率が上昇.  
→ 熱励起による電子のエネルギー分布変調により、532 nmレーザー ( $2.3 \text{ eV} < \phi = 2.65 \text{ eV}$ )による光電子放出が可能となった.



$$\eta = \frac{\text{number of electrons detected}}{\text{number of incident photons}}$$

# 光子エネルギー < $\phi$ における 光電子放出の機構

仕事関数未満のレーザーによる光電子放出の理由の一つとして、多光子励起が考えられる。

$\text{Prob}_2 \propto \text{Pulse energy}^2$   
( $\text{Prob}_2$ : 2光子励起の確率.)

線形な依存性

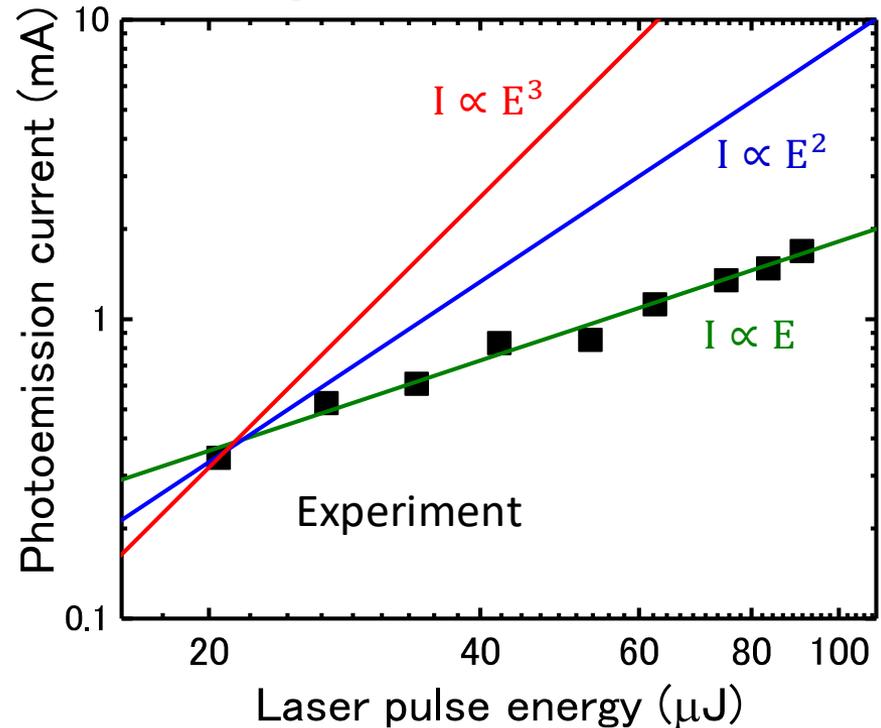


熱励起を補助とした

**単光子励起**

が532 nmレーザーによる光電子放出の  
主な理由である

光電子放出特性の  
パルスエネルギー依存性  
( $\text{CeB}_6$  @532 nm,  $T_c \sim 1400$  K)



# 長波長レーザーの実用性評価

長波長レーザー使用時において、熱励起による量子効率の改善は効果的であるが、

高温においては熱電子電流が無視できない

実用化の条件:

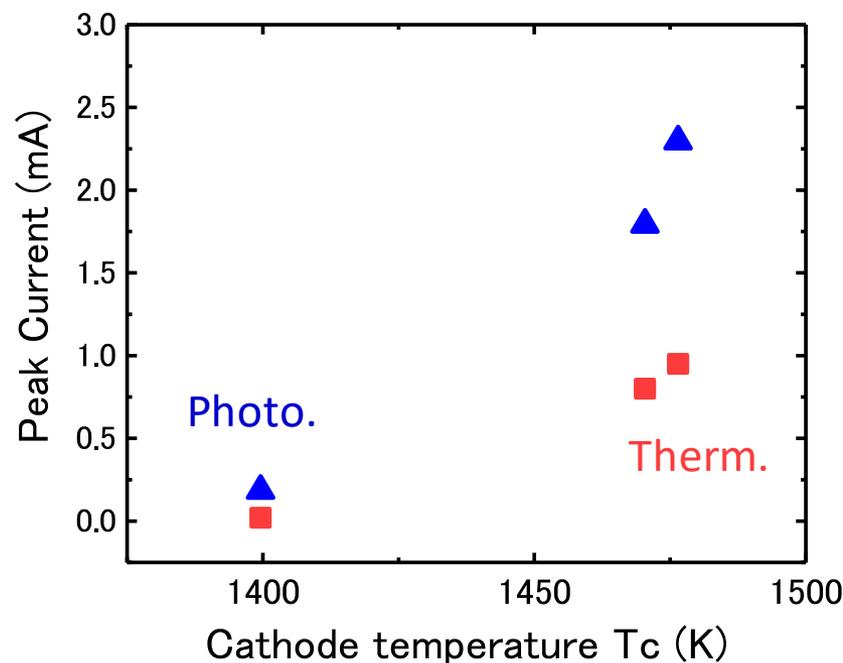
- ✓ 十分に大きい光電子放出
- ✓ 十分に小さい熱電子放出



評価のためにはさらにデータが必要

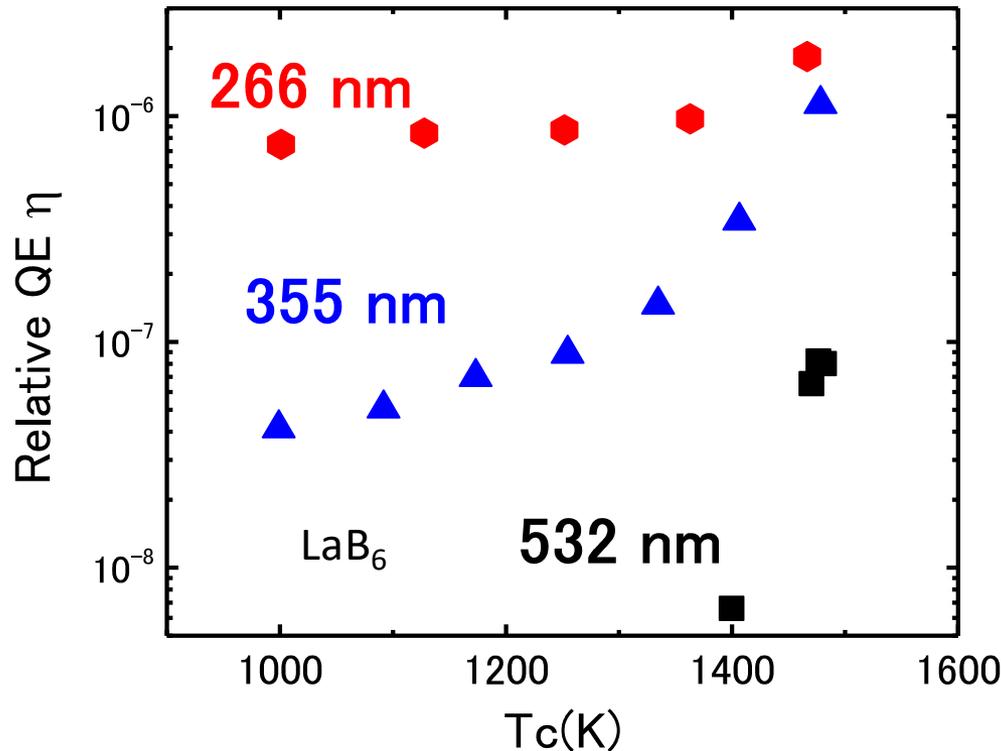
- ✓ 更に高温な領域
- ✓ より細かい温度ステップ  
に対する計測が必要.

光・熱電子電流(ピーク)の比較  
(LaB<sub>6</sub> @32.5μJ, 532 nm, 5 ns.)



# 各レーザー波長における LaB<sub>6</sub>の光電子放出特性の比較

各波長における光電子放出特性



熱励起の影響:

266 nm < 355 nm < 532 nm

量子効率:

532 nm < 355 nm < 266 nm

- 広い照射レーザー波長の範囲において熱励起による熱陰極材料の量子効率改善が可能

# まとめ

---

- 広範な温度において $\text{LaB}_6$  および  $\text{CeB}_6$  に 266, 355, 532 nmレーザーを照射し、光電子放出特性を計測した。
- 各材料の結果の比較から、陰極温度が同じ場合量子効率 $\text{LaB}_6 > \text{CeB}_6$ となることが分かった。
- 光子エネルギーが仕事関数を下回る532 nmレーザーでも高温領域では光電子放出が可能となることが分かり、量子効率がレーザーエネルギーに線形に依存したことから、その理由が熱励起を補助とした単光子励起であると考察した。
- 各波長の計測結果から、広い照射レーザー波長の範囲において熱励起による熱陰極材料の量子効率改善が可能であり、長波長になるほどこの効果が強くなることが分かった。

# 参考文献

---

- ※1 K. Uhchida et al. , IPAC (2014) MOPRI032
- ※2 S. Garrbe, phys. stat. sol. (a) 2, 497 (1970)
- ※3 M. Boussoukaya et al, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 264 (1988) 131-134
- ※4 D. Satoh et al., PASJ (2013) 540-543
- ※5 M. Asakawa et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 331 (1993) 302-306
- ※6 J.M. Lafferty, J. Appl. Phys. 22, 299 (1951) 299-309