

# HIGH QUANTUM EFFICIENCY AND LONG LIFETIME PHOTOCATHODE MATERIALS (Ir<sub>5</sub>Ce) FOR THE SUPERKEKB ELECTRON PHOTOINJECTOR.

Daisuke Satoh <sup>#A)</sup>, Mitsuhiro Yoshida <sup>B)</sup>, Noriyosu Hayashizaki <sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Inst. of Technology, Tokyo 152-8550, Japan

<sup>B)</sup> Accelerator Division, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Ibaraki 305-0801, Japan

<sup>C)</sup> Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Inst. of Technology, Tokyo 152-8550, Japan

## Abstract

The suitability of Ir<sub>5</sub>Ce as an electron source for the SuperKEKB electron linac was investigated. The quantum efficiency (QE) of Ir<sub>5</sub>Ce was increased to  $1.02 \times 10^{-4}$  through laser activation using the fourth harmonic of a Nd:YAG laser. The QE of Ir<sub>5</sub>Ce for p-polarized light is about 2.2 times larger than the QE for s-polarized light. The properties of electron emission of Ir<sub>5</sub>Ce were stable even under bad vacuum conditions ( $7 \times 10^{-6}$  Pa). The lifetime of the Ir<sub>5</sub>Ce photocathode was found to be more than several hundred hours.

## SuperKEKB 入射器における 高量子効率・長寿命フォトカソード新材料(Ir<sub>5</sub>Ce)の研究開発

### 1. はじめに

SuperKEKB 計画は、KEKB で達成されたルミノシティの世界最高値の 40 倍に相当する  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  が目標としており、その実現のためには電子入射部に対して、さらなる高電荷・低エミッタンスの電子ビーム生成が要求される。SuperKEKB 電子入射部に要求される性能は、5 nC、10 mm-mrad の電子銃であり、フォトカソード RF 電子銃の導入を考えている。

フォトカソード RF 電子銃において重要なコンポーネントのひとつが、カソード材料である。図 1 にフォトカソード材料の寿命と量子効率の関係を示す。理想的なフォトカソード材料は、高量子効率かつ長寿命な物質であるが、現在存在していない。そのため、一般的に、高輝度な電子ビームを生成する方法としては、(1) Cs<sub>2</sub>Te 等の高量子効率材料を用いる方法と、(2) 純金属などの低量子効率材料と高出力レーザーシステムを組み合わせる方法の 2 つがある。しかし、この 2 つの方法では、それぞれ以下のような問題点を抱えている。

表 1 タイトルを入れる

|         | 方法 (1)                                   | 方法 (2)     |
|---------|--|------------|
| カソードの欠点 | ①短寿命<br>②イオン衝撃に弱い<br>③超高真空が必須<br>④空洞内の汚染 | ①低量子効率     |
| システムの欠点 | 長期安定運転に不向き                               | 高出力レーザーが必要 |

SuperKEKB 電子入射部では、1 年間のメンテナンスフリーの営業運営を目指しており、長寿命なフォトカソード材料と高出力レーザーを組み合わせたシステムの導入を考えている。

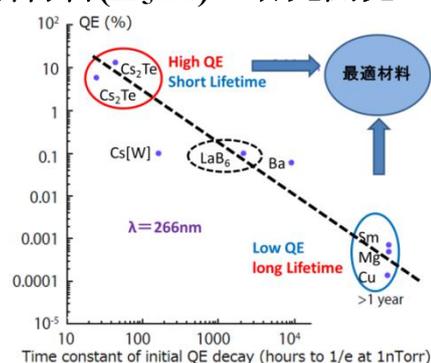


図 1：フォトカソードの寿命と量子効率の関係

そこで、我々は、「高融点・低仕事関数」という特殊な性質を合わせ持つことで知られる Ir<sub>5</sub>Ce 化合物に着目し、フォトカソードとしての利用可能性を研究している。本稿では、Ir<sub>5</sub>Ce 化合物の製作・特性評価についての現状について報告する。

### 2. Ir<sub>5</sub>Ce の特徴

Ir<sub>5</sub>Ce 化合物は、既に熱陰極として次のような優れた性質をもつことが報告されている<sup>[1-2]</sup>。

- ①融点が約 2200℃と高融点
- ②仕事関数が、表面温度が 1300 K のときに 2.57 eV と LaB<sub>6</sub> の仕事関数と同程度かそれ以上に低い
- ③熱陰極の寿命を決める蒸発速度が  $1.6 \times 10^{-9} \text{ g/s/cm}^2$  とかなり遅い
- ④イオン衝撃に強い
- ⑤電子放出特性は雰囲気に影響されにくく、 $10^{-4} \text{ Pa}$  の高真空を維持すれば安定した電子放出特性を維持可能

これらの Ir<sub>5</sub>Ce 化合物の熱陰極としての優れた特性は、フォトカソードにも当てはまると考えられる。すなわち、①はフォトカソードとして使用した際にレーザー照射に対する耐久性が高いこと、④と⑤は

# satou.d.ad@m.titech.ac.jp

SuperKEKB のような加速器の長期安定的な運転に適することを意味する。

### 3. Ir<sub>5</sub>Ce 化合物の製作・分析

今回使用する Ir<sub>5</sub>Ce 化合物は、株式会社コベルコ 科研の協力のもと、プラズマアーク溶解鋳造法で製作した。Ir よりも Ce の溶解時蒸気圧が高いため、溶解前の素材重量と溶解後の鋳塊重量との差は、Ce の蒸発ロス量と見なして濃度制御を行った。

本溶解鋳造法で製作した Ir<sub>5</sub>Ce 化合物は、SEM-EDX 法による半定量的な成分分析を行った (図 3)。成分分析の結果、Ir と Ce の組成比は、原子数濃度 (%) で 14.8 : 85.2 であり、ほぼ目的の Ir<sub>5</sub>Ce 化合物が製作できていることが確認できた。



図 2 : 今回製作した Ir<sub>5</sub>Ce 化合物

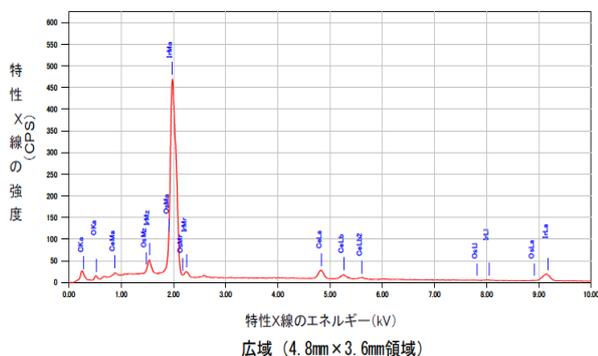


図 3 : SEM-EDX 法による成分分析結果

## 4. 量子効率測定

### 4.1 測定装置

光電子放出過程は、フォトカソードが持つ固有の仕事関数以上のエネルギーをもった光を照射することで起こる物理現象である。今回の量子効率測定は、SuperKEKB の運転で使用予定である、波長が 266nm (1 光子当たりのエネルギー ; 4.66 eV) のレーザー (Nd:YAG laser 第四高調波、パルス幅 ; 10ns、繰返し ; 10Hz、入射角度 ; 55° ) で行った。図 4 に測定装置の概略図を示す。

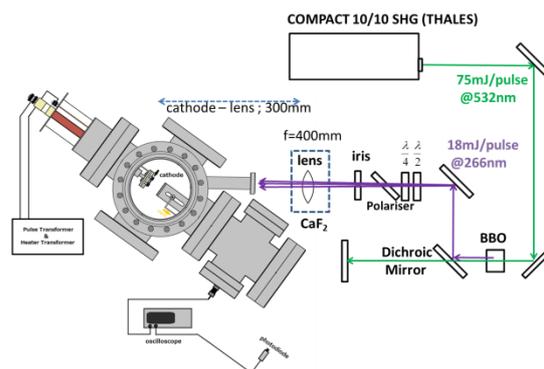


図 4 : 測定装置図

### 4.2 測定条件・結果

フォトカソードの光電子放出特性は、材料の表面状態によって大きく左右される。そこで今回は、数 mJ 程度のレーザーを 5~10 分程度照射する Laser activation<sup>[3]</sup> という表面処理を行った後に量子効率を測定し、図 5 のような結果が得られた。横軸は表面処理の際に照射したレーザー (波長 266nm) のエネルギー密度であり、表面処理時間に関しては、すべて 15 分間の連続照射で統一した。結果的に、Ir<sub>5</sub>Ce の量子効率は約  $1 \times 10^{-4}$  であり、純金属のフォトカソードの量子効率よりも比較的高い量子効率をもつことがわかった。

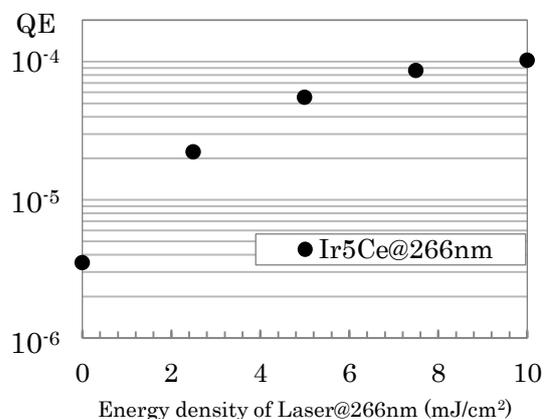


図 5 : Ir<sub>5</sub>Ce の量子効率測定結果

## 5. 電子放出特性の偏光依存性

フォトカソードの光電子放出特性は、照射するレーザー光の偏光状態にも大きく影響される。特にカソード表面に対して垂直方向から、ある角度傾けた方向から入射するとその効果が表れる。そして、一般的に S 偏光の光よりも P 偏光の光を照射したほうが、量子効率が高いことが多くのフォトカソードで確認されている<sup>[4-8]</sup>。これらの要因に関して多くの研究がなされており、①偏光による反射率の違い<sup>[5]</sup>、②偏光による陰極内電子の励起確率の違い<sup>[8]</sup>、③ surface photoemission の発生<sup>[4,7]</sup>、など多くの要因が

考えられる。

本測定では、レーザーをカソード表面に対して垂直方向から  $55^\circ$  傾けた方向から照射した。その際に、ポライザーを使用してレーザー光の偏向角度を変化させて照射し、量子効率の偏光依存性を測定した。その結果を図 6 に示す。P 偏光と S 偏光の場合で、量子効率が約 2.15 倍異なることがわかる。

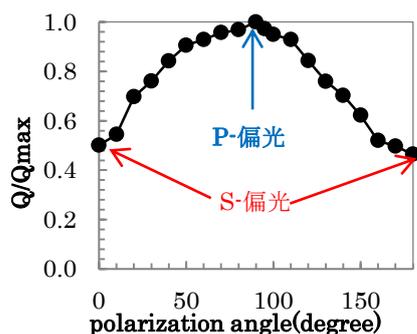


図 6：量子効率の偏光依存性

この要因について  $\text{Ir}_5\text{Ce}$  フォトカソード表面の反射率に着目し考察を行った。ここでは、 $\text{Ir}_5\text{Ce}$  内の含有元素の約 85%以上が Ir であるため、波長が 266nm の光に対する純 Ir の複素屈折率 ( $1.2670+2.5754 \times i$ ) の値<sup>[9]</sup>を利用して P 偏光と S 偏光の反射率を計算した。P 偏光と S 偏光の反射率は、フレネルの式より、それぞれ  $R_p = 0.4077$ 、 $R_s = 0.7311$  と計算でき、P 偏光の方が S 偏光の光よりも約 2.2 倍、Ir に吸収されるという計算結果が得られた。この偏光による反射率の違いが、量子効率の違いに大きく寄与していると考えられる。また、実際に波長 266nm の光に対する  $\text{Ir}_5\text{Ce}$  の反射率を測定したところ、P 偏光の光に対して  $R_p = 0.3783$  となり、比較的計算値と近い値が得られた。

## 6. 低真空下での電子放出特性と表面分析

$\text{Ir}_5\text{Ce}$  は、熱陰極の場合、非常に悪い真空条件下 ( $\approx 10^{-4}$  Pa) でも非常に良い電子放出特性を示すことが知られている<sup>[1]</sup>。そこで、フォトカソードの使用条件としては悪い  $7 \times 10^{-6}$  Pa の真空度で  $\text{Ir}_5\text{Ce}$  フォトカソード使用し続けた際に、その光電子放出特性がどのように影響されるのかを量子効率を測定することで検証した。すると、5 日間使用し続けた後でも、その電子放出特性が全く変化しないという結果が得られた。この測定結果から、 $\text{Ir}_5\text{Ce}$  は、フォトカソードとして使用した際も比較的 low vacuum でも安定的な電子放出特性が得られるということがわかった。

次に、 $\text{Ir}_5\text{Ce}$  の電子放出特性が真空度に影響されにくいという性質を理解するために、SEM-EDX 法を用いて、カソード表面の元素分析を行った。比較サンプルとして多結晶  $\text{LaB}_6$  の測定も行った。これら 2

つのカソード材料は、形状加工後、ともに大気にさらした状態で保存していたものを分析した。図 7 は SEM-EDX 法による分析結果を示しており、(a) は多結晶  $\text{LaB}_6$  の、(b) は  $\text{Ir}_5\text{Ce}$  の分析結果である。

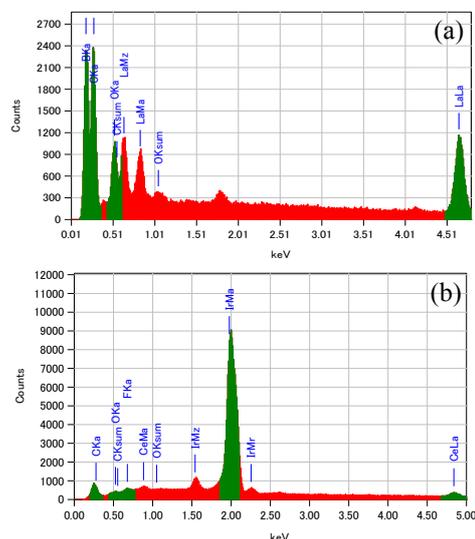


図 7：SEM-EDX 法による分析結果

図 7 の分析結果を見ると、 $\text{Ir}_5\text{Ce}$  は  $\text{LaB}_6$  と比較して、大気中で保管していたにもかかわらず、酸素や炭素などの不純物の付着が圧倒的に少ないことがわかる。この結果から、 $\text{Ir}_5\text{Ce}$  カソードが大気中の成分と反応が起こりづらく、そのため、比較的 low vacuum でも安定的な電子放出特性が得られるのだと考えられる。

## 7. まとめ

我々は、 $\text{Ir}_5\text{Ce}$  フォトカソードを材料製作から行い、量子効率が  $1 \times 10^{-4}$  と純金属系のフォトカソードの量子効率よりも高く、low vacuum でも良い電子放出特性を示す、といったフォトカソードとしての有用性を見出した。また、現在、寿命測定についても行っており、数 100 時間の連続照射に対しても、電子放出特性 (量子効率) が低下しないというような良い結果が得られてきている。

## 参考文献

- [1] G.I.Kuznetsov, "IrCe Cathodes For EBIS.", Journal of Physics: Conference Series 2 (2004) 35–41
- [2] G.Kuznetsov, "High temperature cathodes for high current density", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 340 (1994) 204-208
- [3] 栗木雅夫, "粒子源の設計と現状", 高エネルギー加速器セミナーOHO 2006 年
- [4] Douglas J. Bamford, et al., "The search for rugged, efficient photocathode materials", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A318 (1992) 377-31f0
- [5] K.Sakaue, et al. "Cs-Te photocathode RF electron gun for applied research at the Waseda University", Nuclear

Instruments and Methods in Physics Research B 269 (2011)  
2928–2931

- [6] T. Srinivasan-Rao, et al. "Sputtered magnesium as a photocathode material for rf injectors", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 69, NUMBER 6 JUNE 1998
- [7] B Feuerbacher, et al. "Photoemission and electron states at clean surfaces", J. Phys. C: Solid State Phys., Vol. 9, 1976. Printed in Great Britain. 1976
- [8] J.K. SASS, "EVIDENCE FOR AN ANISOTROPIC VOLUME PHOTOELECTRIC EFFECT IN POLYCRYSTALLINE NEARLY FREE ELECTRON METALS", Surface Science 51 (1975) 199-212
- [9] Edward D. Palik, "Handbook of Optical Constants of Solids", Academic Press