

# 背面照射型透明超伝導マルチアルカリフォトカソードの 初期エミッタンス測定

## MEASUREMENT OF INITIAL EMITTANCE OF BACK ILLUMINATED TRANSPARENT SUPERCONDUCTING MULTI-ALKALI PHOTOCATHODE

稲垣瞭<sup>#, A, B)</sup>, 許斐太郎<sup>B)</sup>, 禿氏徹成<sup>B)</sup>, 加藤政博<sup>A, B)</sup>, 山本尚人<sup>A)</sup>, 保坂将人<sup>A)</sup>, 高嶋圭史<sup>A)</sup>,  
加古永治<sup>C)</sup>, 山口誠哉<sup>C)</sup>, 小林幸則<sup>C)</sup>, 白木将<sup>D)</sup>, 一杉太郎<sup>D)</sup>

Ryo Inagaki<sup>#, A, B)</sup>, Taro Konomi<sup>B)</sup>, Tetsuzyou Tokushi<sup>B)</sup>, Masahiro Katoh<sup>A, B)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>A)</sup>, Masahito Hosaka<sup>A)</sup>  
Yoshifumi Takashima<sup>A)</sup>, Eiji Kako<sup>C)</sup>, Seiya Yamaguchi<sup>C)</sup>, Yukinori Kobayashi<sup>C)</sup>, Susumu Shiraki<sup>D)</sup>, Taro Hitosugi<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate school of Engineering, Nagoya University

<sup>B)</sup> UVSOR facility, Institute for Molecular Science

<sup>C)</sup> KEK, High Energy Accelerator Research Organization

<sup>D)</sup> WPI-AIMR, Tohoku University

### Abstract

We have manufactured the back-illuminated superconducting photocathode for the FEL with high pulse repetition. The novelty of this photocathode is adopting the transparent superconducting thin film  $\text{LiTi}_2\text{O}_4$  as a substrate. LTO reflects RF field because of a short penetration depth of superconductor and this feature protects optical components from RF damage. Using the photocathode, a high quality beam with a low energy spread and a low space spread is expected to be produced. This paper presents experimental results of the initial emittance of multi-alkali photocathode on  $\text{SrTiO}_3$  substrate.

## 1. はじめに

### 1.1 SRF-Gun

我々は、次世代放射光源の候補として 1MHz 程度のパルス繰り返しを持つライナックベースの FEL の開発を検討している。その FEL の電子源に超伝導 RF 空洞とフォトカソードの組み合わせが最適であると考えている。超伝導空洞内で電子ビームは高電圧で加速される為、加速段階においてその広がりを抑えることが可能である。さらに励起レーザーをカソードの背面から入射する背面照射型のフォトカソードを検討しており、従来のカソード正面から励起レーザーを照射する場合に比べレーザーの照射位置や空間分布をより精密に制御できる<sup>[1]</sup>ので、安定性に優れ、空間電荷効果によりエネルギー広がりや空間広がりを抑えた高品質な電子ビームが生成可能である。

背面照射型のフォトカソードにはガラスやダイヤモンドのような透明基板を採用する必要がある。しかし、例えばサファイアガラス基板の場合、耐電圧が低い (5kV/mm) 為に超伝導空洞内で使用することが困難である。またダイヤモンド基板は、可視光領域の透過率が低く安定性に難のある紫外領域の励起レーザーを用いなければならない。さらに重要なこととして、これらの基板には RF 遮蔽能が無く、フォトカソードの背後に設置する光ファイバーやレンズ等の光学系が RF によって損傷する可能性がある。そこで RF 遮蔽能を持つ導電性材料を採用する

必要があるが、例えば一般的な導電性材料である ITO の場合、RF 侵入長が数十  $\mu\text{m}$  である為、RF だけでなく励起レーザーも遮蔽してしまう。それに対し、超伝導材料は数百  $\text{nm}$  で RF を遮蔽することが可能である。そこで我々は  $\text{LiTi}_2\text{O}_4$  という透明超伝導薄膜に着目し、これをフォトカソードの基板として用いた超伝導電子銃を構想している。

### 1.2 背面照射型超伝導フォトカソード

Figure 1 に我々が開発を検討している背面照射型のフォトカソードの概略図を示す。このフォトカソードは四層構造となっており、励起レーザーは AR コートがしてある面から入射する。 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  の膜厚は 0.5mm で LTO の膜厚は約 200nm である。

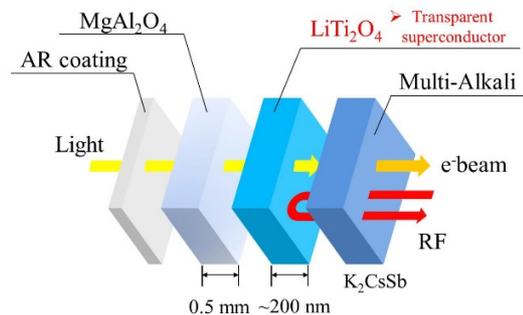


Figure 1: Schematic block diagram of the back-illuminated superconducting photocathode.

LTO の膜厚は、LTO の RF に対する臨界磁場が約 170 nm であることから 200 nm に設定した。また光電面には可視光領域において高い量子効率を持ち、比較的長寿命なマルチアルカリである  $K_2CsSb$ <sup>[2]</sup>を採用した。高いパルス繰り返しを実現する為に時間応答性の高いフォトカソードを採用し、このフォトカソードを YAG レーザーの三倍波(355nm)を用いて LTO の超伝導遷移温度以下で運転する予定である。

### 1.3 透明超伝導体 $LiTi_2O_4$

Figure 2 に LTO の外観図を示す。この LTO 薄膜は 2012 年に東北大学<sup>[3]</sup>において PLD 法を用いて  $MgAl_2O_4$  上にエピタキシャル成長させて作製に成功したものである。Table 1 に LTO の物性値を示す。LTO は他の透明超伝導体に比べ高い超伝導遷移温度 ( $T_c$ )を持ち、且つ可視光領域において約 70%の透過率を持つ。また、LTO の格子定数がマルチアルカリ  $K_2CsSb$  の格子定数( $a=0.861nm$ <sup>[4]</sup>)と近く、結晶性の高い光電面が作製できる為、より高い量子効率が期待できる。

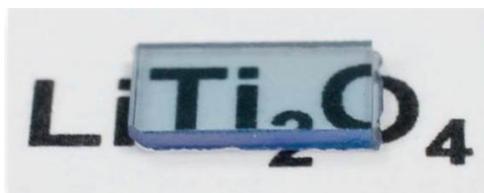


Figure 2: The picture of  $LiTi_2O_4$ .

Table 1: Physical Property of  $LiTi_2O_4$

<b><math>T_c</math></b>	~ 12K
<b>Resistivity</b>	$3.3 \times 10^{-4} \Omega cm$ (at R. T.)
<b>Lattice constant</b>	$a_{LTO} = 0.8405 nm$
<b>Transmittance</b>	70 % (at 477 nm)
<b>Carrier density</b>	$\sim 1 \times 10^{22} cm^{-3}$
<b>Hall mobility</b>	0.8 (280K), 6.0 (15K) $cm^2V^{-1}s^{-1}$

### 1.4 マルチアルカリ $K_2CsSb$

マルチアルカリである  $K_2CsSb$  の開発に関する従来研究は多数存在し、特に光電子増倍管に関係したもの<sup>[5]</sup>が多い。また化合物  $K_{1-x}Cs_xSb$  の結晶構造は解明されており<sup>[6]</sup>、最近ではその電子状態<sup>[7]</sup>も計算されている。我々は、 $K_2CsSb$  の成膜に関して Weizmann 研究所<sup>[8]</sup>における研究結果を参考に以下の手順で成膜を行っている。成膜前に約 500 deg.で3時間 Heat cleaning を行う。その後、基板温度を約 150 deg.にした状態で Sb を約 10 nm 蒸着する。この際カソードの透過率も同時に測定し、透過率が初期値の約 70 %に達することを確認する。次に K を QE がピークに達するまで蒸着を行う。この時の基板温度は約 120 deg.である。そして最後に Cs を K と同様に

QE がピークに達するまで蒸着を行う。Cs 蒸着時の基板温度は 120 deg.以下である。成膜中の QE の測定には波長 405 nm のダイオードレーザーを使用した。Table 2 にこれまで行った  $K_2CsSb$  の成膜結果を示す。我々は3種類の基板 (Mo, Cu,  $SrTiO_3$ ) において成膜を行った。Mo 基板においては 7.5 %、Cu 基板においては 13.7 %、そして STO 基板においては、8.0 %の QE を達成している。STO 基板に成膜した目的は、背面照射による電子の引き出しが可能かどうかの確認と Ti 酸化物とアルカリ金属との界面での反応の有無を確認する為である。Figure 3 に各基板における QE の波長依存性を示す。全ての基板において 600nm 付近で QE はほぼ 0 になり、波長依存性も同様な傾向を示した。これは  $K_2CsSb$  の閾エネルギー値が 600nm 付近にあること<sup>[9]</sup>と一致する為、 $K_2CsSb$  の成膜が各基板において成功していることを示す。

今後このフォトカソードを量子効率の波長依存性以外にも初期エミッタンスや寿命、臨界磁場や耐電圧等の観点から評価をしていく必要がある。本報告では STO に成膜した  $K_2CsSb$  フォトカソードの初期エミッタンスを測定した結果について報告する。

Table 2: Summary of Deposition Experiments

	Substrate	Sub. Temp. (deg)	QE (%) at 405nm
$K_2CsSb$	Mo	100±5	6.2
	Mo	100±5	7.5
	$SrTiO_3$	95~110	6.96
	$SrTiO_3$	155~170	8.0
	$SrTiO_3$	160±5	0.68
	$SrTiO_3$	160±5	3.95
	$SrTiO_3$	120±5	4.2
	Cu	150~100	13.7
	Cu	150~100	6.7

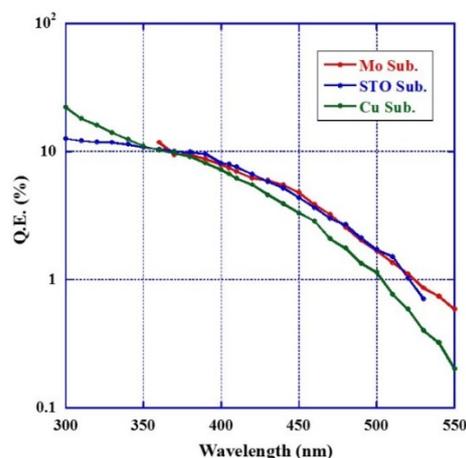


Figure 3: Wavelength dependence of QE at each substrate.

## 2. 測定装置および測定方法

### 2.1 測定装置

Figure 4 に初期エミッタンスの測定装置の概略図を示す。この測定チャンバーは LBNL<sup>[10]</sup>のものを参考に製作した。測定チャンバーの中央にはカソードを装着するカソードホルダーがあり、そのカソードホルダーに対してクライオスタットがチャンバー上部から挿入されている。このクライオスタットを介して液体ヘリウムを供給することによってクライオスタット自体は約 4.4 K まで、カソードは約 6.0 K まで冷却することが可能である。ニッケルアノードメッシュはカソードホルダー前部に取り付けられている。真空度は、約 2.0 E-7 Pa であり、今後は NEG ポンプ等を取り付けてより超高真空を目指す予定である。

Figure 5 に測定系のジオメトリを示す。カソードとアノードの距離は 5mm、メッシュ間隔は 50 μm である。アノードメッシュから 138 mm 離れたところにフォスファスクリーンがあり、そこに映る電子ビームの像を CCD カメラで撮影する。我々の測定では、カソードの引き出し電圧を -1 ~ -10 kV (0.2 ~ 2 MV/m) としている。励起レーザーは輸送路に設置したアルミミラーに反射させてカソード背面から入射することができる。そしてこの測定系は、蒸着チャンバーとトランスファーロードを経由して真空状態を保持したまま作製したカソードを輸送可能である。

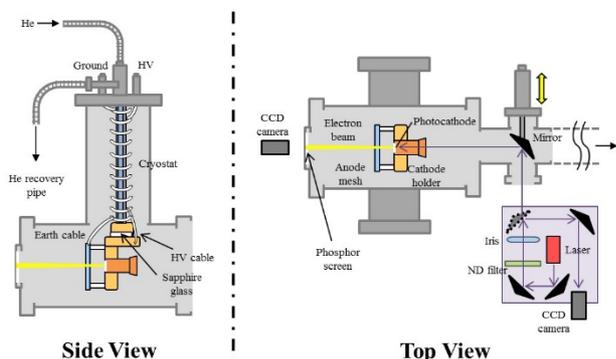


Figure 4: Schematic block diagram of the emittance measurement apparatus.

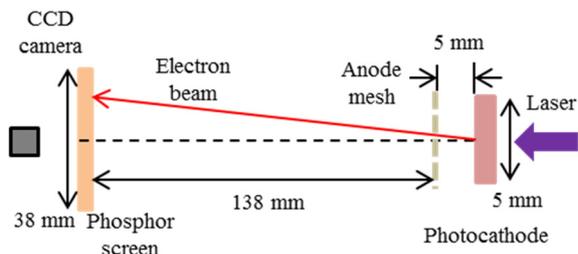


Figure 5: Experimental arrangement for measuring transverse momentum.

### 2.2 測定方法

成膜したカソードを装置内に輸送後、まず励起レーザーを光学系に設置した CCD カメラに直接照射し、レーザー半径の測定を行った。本測定には 405nm と 532nm のダイオードレーザーを使用した。その後、カソードに印加する電圧を変化させながら、各電圧においてスクリーン上の電子ビームの像を撮影し、画像解析から求めた強度分布をガウス関数で Fitting することでビーム半径を求めた。各測定中は QE も同時に測定した。

そして測定から求めたレーザー半径  $\sigma_x$  およびビーム半径  $r_b$  の値を  $r = \sqrt{r_b^2 + \sigma_x^2}$  であることを考慮して式 (1)、式(2)に代入し、transvers momentum およびカソードの初期エミッタンスを求めた。式中の  $g$  はカソードアノード間距離、 $d$  はアノードスクリーン間距離、 $V$  は印加電圧をそれぞれ表し、本測定では、 $g = 5 \text{ mm}$ 、 $d = 138 \text{ mm}$ 、 $V = 1 \sim 10 \text{ kV}$  をそれぞれ代入した。

$$r = \sqrt{\frac{m_e c^2}{2eV}} (2g + d) \cdot \frac{p_x}{m_e c} \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_n}{\sigma_x} = \frac{\langle p_x^2 \rangle^{1/2}}{m_e c} \quad (2)$$

ここで  $2g + d$  が意味するのは、電子がカソードから 5 mm 後ろにある仮想平面上の一点から放出されると仮定しているということである。

## 3. 測定結果

Figure 6 にスクリーン上の電子ビームの像とその強度分布の例として、レーザー波長 405 nm、室温、電圧 6.0 kV (1.2 MV/m)での測定結果を示す。測定時のカソードの量子効率率は約 0.05 %、レーザーパワーは 0.041 mW であった。この時のビーム半径は  $0.225 \pm 0.014 \text{ mm}$  であった。またレーザー半径が 0.081 mm であったことから、この時の初期エミッタンスを求めると、 $0.233 \pm 0.016 \text{ um/mm-rms}$  であった。またレーザー波長 532 nm、室温、電圧 6.0 kV (1.2 MV/m)での測定では、測定時のカソードの量子効率

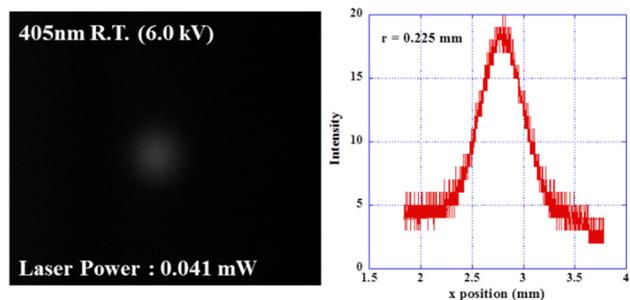


Figure 6: Electron beam on the phosphor screen (left), Intensity distribution of the electron beam (right).

は約 0.004 %、レーザーパワーは 2.09 mW であり、この時のビーム半径は  $0.268 \pm 0.063$  mm であった。またレーザー半径が 0.160 mm であったことから、この時の初期エミッタンスを求めると、 $0.278 \pm 0.066$  um/mm-rms であった。この 532 nm の結果とほぼ同じ値が LBNL<sup>[10]</sup>でも得られている。そして 405nm のデータについては 532 nm のデータと誤差の範囲で一致するが、532nm のデータは量子効率が高い状態での測定であった為スクリーン上のビームの強度が小さく、また CCD カメラの性能の低さから、撮影した画像の S/N が低かったため、今後さらに精度を上げた測定を計画している。

#### 4. まとめと今後の計画

今回、作製したフォトカソードの初期エミッタンスの測定を行い、室温において励起波長 405 nm と 532 nm での初期エミッタンスの測定を行った。今後は測定精度の向上の為にチャンバーの改良や周辺機器を最適化し、室温および室温以下の低温下での初期エミッタンスの測定を行う予定である。また実際に LTO に  $K_2CsSb$  の成膜を行い、フォトカソードとしての性能評価を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] P. Kwee et al., RSI. 78, 073103 (2007).
- [2] A. V. Lyashenko et al., JINST 4 P07005 (2009).
- [3] A. Kumatami et al., APL. 101, 123103 (2012).
- [4] Li Xu-Dong et al., Chinese Physics, Letter vol.30 (2013).
- [5] A. H. Sommer, Photoemissive Materials (Wiley, New York, 1968).
- [6] W. H. McCarroll, J. Phys. Chem. Solids 26(1), 191 (1965).
- [7] A. R. H. F. Ettema and R. A. de Groot, Phys. Rev. B 66(11), 115102 (2002).
- [8] A. Lyashenko et al., JINST 4 (2009) P07005.
- [9] D.H Dowell et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 622 (2010) 685–697.
- [10] T. Vecchione et al., APL. 99, 034103 (2011).