

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26790069

研究課題名(和文)透明超伝導体を用いた背面照射式フォトカソードの開発

研究課題名(英文)Development of the backside excitation photocathode using the transparent superconductor

研究代表者

許斐 太郎 (Taro, Konomi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：20634158

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導RF電子銃に適した背面照射構造のフォトカソードを開発し評価を行った。フォトカソードは基板となる透明超伝導体とマルチアルカリ光電面から構成される。透明超伝導体はRFを反射し励起光は透過する特性を持つ。本フォトカソードを製作し、超伝導特性、初期エミッタンスと量子効率の温度依存性を測定した。この結果、現在開発を進めている超伝導RF電子銃に用いることが可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Development of the backside-excitation structure photocathode has been done. this photocathode consists of a transparent superconductor substrate and multi-alkali photoelectric surface. The transparent superconductor reflects RF and transmits excitation light. Superconducting properties and temperature dependence of quantum efficiency and initial emittance were measured. It was confirmed that it's possible to use for the superconducting RF gun.

研究分野：加速器

キーワード：超伝導 フォトカソード 電子銃

1. 研究開始当初の背景

超伝導 RF 電子銃は高い初期加速電界を持ち、かつ壁面 RF 損失が小さい。このため、高電荷低エミッタンスビームを高繰り返しで生成できる。カソードに背面照射式フォトカソードを用いることで、電子ビーム軌道と励起レーザー光学系の干渉を分離し焦点距離を短くすることもできる。レーザー形状を矩形形状とすることは空間電荷効果を緩和し、低エミッタンスビームを引き出すために必要である。背面照射式の超伝導 RF 電子銃とそのフォトカソードを実現した例は無いため、新規開発が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では透明超伝導体  $\text{LiTi}_2\text{O}_4$  という新しい材料を用いて、背面照射式フォトカソードの製作と性能の検証を目的としている。背面照射のためにはフォトカソード基板が励起光を透過しなければならない。一方 RF 場は反射しなければならない。RF 場が基板を透過すると、電子の初期加速電場の平坦性が乱されてエミッタンス悪化を招く可能性がある。この両者を満たす基板材料として着目したのは透明超伝導体  $\text{LiTi}_2\text{O}_4$  であった。透明超伝導体の透過率を測定した結果を図 1 に示す。

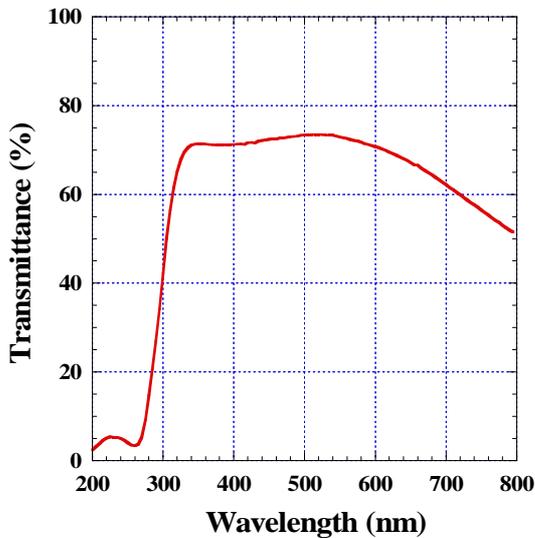


図 1 透明超伝導体  $\text{LiTi}_2\text{O}_4$  の透過率。 $\text{LiTi}_2\text{O}_4$  の膜厚は 70nm である。

光電面には高い量子効率を実現でき、透明超伝導体の透過波長と合うマルチアルカリ  $\text{K}_2\text{CsSb}$  を選択した。カソードから放出された直後のエミッタンスは初期エミッタンスと呼ばれ、カソード温度や励起波長に依存する。初期エミッタンスと各パラメータの関係を式 1 に表す。

$$\varepsilon_{rms} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{2(h\nu - E_0 - \phi_{sch})}{3m_e c^2} + \frac{2k_B T}{m_e c^2}} \quad (\text{式 1})$$

ここで、R は初期ビーム半径、h はプランク定数、 $\nu$  は励起光振動数、 $E_0$  はカソード価電子帯から真空準位までのエネルギー閾値、 $\phi_{sch}$  は Schottky 効果による仕事関数の変化、

$m_e$  は電子の静止質量、c は光速、 $k_B$  はボルツマン定数、T は温度である。初期エミッタンスの低減には励起波長をエネルギー閾値に合わせることや、カソードを冷却することが有効である。透明超伝導体の転移温度は約 13K であり、この点からも低エミッタンス化に有利である。

3. 研究の方法

本研究ではまず、マルチアルカリ光電面に透明超伝導体基板に製膜したフォトカソードを製作した。成膜装置は正面と背面から励起光をフォトカソードに照射可能である。また、キセノンランプ光源を用いて、成膜したフォトカソードのエネルギー閾値を測定できる。

成膜したフォトカソードは真空中をトランスファーロードで初期エミッタンス測定チャンバーへ送る。図 2 に初期エミッタンス測定チャンバーの構造を示す。測定は平行電場で加速して自由空間をドリフトさせたビームのビームサイズ径を初期ビーム径(レーザースポット径)で規格化する方法を用いる。平行電場電極は 7K まで冷却可能な陰極と直径 20 $\mu\text{m}$  のピンホールを 100 $\mu\text{m}$  間隔で配置したメッシュアノードから構成される。

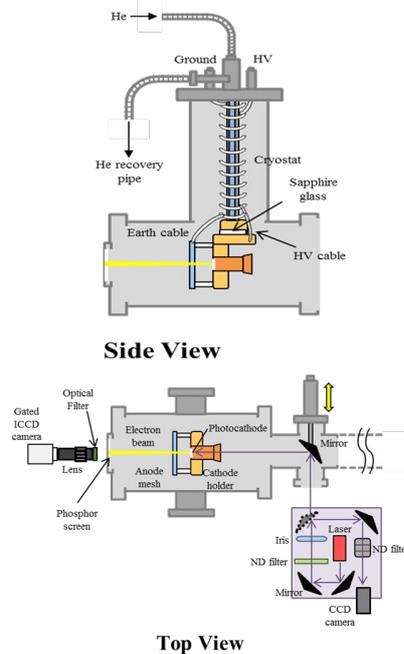


図 2 透明超伝導体  $\text{LiTi}_2\text{O}_4$  の透過率。 $\text{LiTi}_2\text{O}_4$  の膜厚は 70nm である。

マルチアルカリを成膜した透明超伝導体の超伝導特性測定は超伝導量子干渉素子 (SQUID) を用いて行う。

4. 研究成果

フォトカソードの量子効率を図 3 に示す。500nm 以上では前面と背面照射による大きな違いは見られない。しかし、短波長領域では背面照射効率が減少する傾向が見られた。これを透明超伝導の吸収で説明することはできない。マルチアルカリ光電面の奥行き方向

への組成むらの原因であると考えられる。マルチアルカリの蒸着順序は、Sb、K、Csである。このため、奥からSb、 $K_3Sb$ 、 $K_2CsSb$ の順に薄膜が生成されていると考えられる。Sb等の純金属の反射率は長波長域で増大するため、Sb単体での説明はできない。一方 $K_3Sb$ は500nmにエネルギー閾値を持っており、背面照射の場合、 $K_3Sb$ で先に励起光が吸収されるのではないかと考えられる。

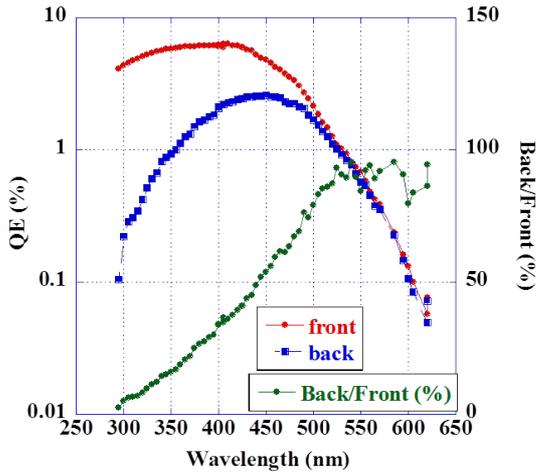


図3 フォトカソードの量子効率。前面から照射した場合と背面から照射した場合の量子効率と比較。

図4に初期エミッタンスの波長依存性を示す。理論式はエネルギー閾値  $E_0$  から算出している。得られた初期エミッタンスは、どの電界においても405 nmの時の方が532 nmの時より大きくなった。この結果は、理論値と一致する。また、どちらの波長においても電界が大きくなるにつれて初期エミッタンスが増加している。この増加傾向は、Schottky効果によるカソードの電子放出閾エネルギー値の減少だけでは説明できない。平行平板電極の構造的な問題ではないかと推測する。アノードメッシュは厚さわずか20 $\mu$ mの極薄箔であるため、電界を高くするにつれて歪みが生じ、カソードアノード間の電界の平行性が失われた可能性が考えられる。

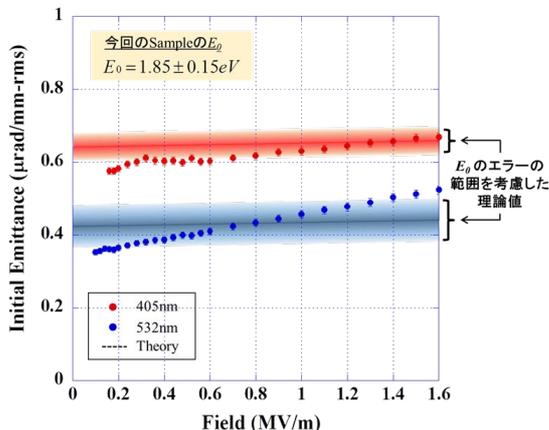


図4 初期エミッタンスと理論値。

カソードを冷却する際に問題点が1つ明らか

となった。カソードを冷却すると残留ガスがカソード表面に付着して量子効率が劣化する(図5)。このため、測定可能な励起波長は405nmのみであった。6.7 Kに冷却した際の初期エミッタンス測定結果を図6に示す。全体的な傾向として初期エミッタンスが減少していることが示された。また式1において  $E_0 = 1.85$  eV、 $E = 1.5$  MV/m、300 Kと6.7 Kの時、初期エミッタンスはそれぞれ0.66  $\mu$ rad/mm-rmsと0.64  $\mu$ rad/mm-rmsであり、冷却によるエミッタンスの減少量が0.02程度であることを踏まえると、測定結果における減少量は理論計算と矛盾がない。本カソードを搭載することを目指している超伝導空洞は全体が2Kの液体ヘリウムで冷却されるため、壁面に吸着する残留ガスは相対的に低下し、量子効率を維持しやすくなると考えられる。

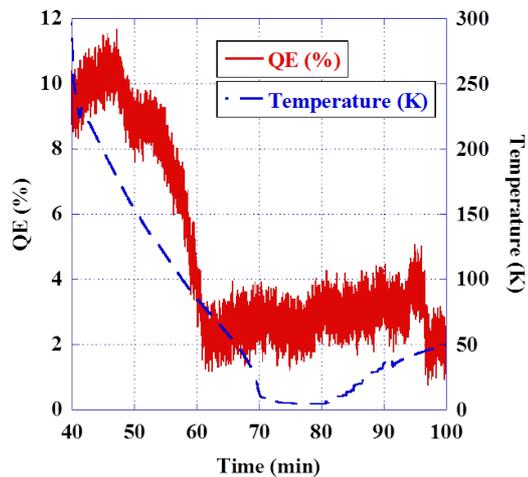


図5 冷却過程における量子効率の変化. 励起波長は405nm

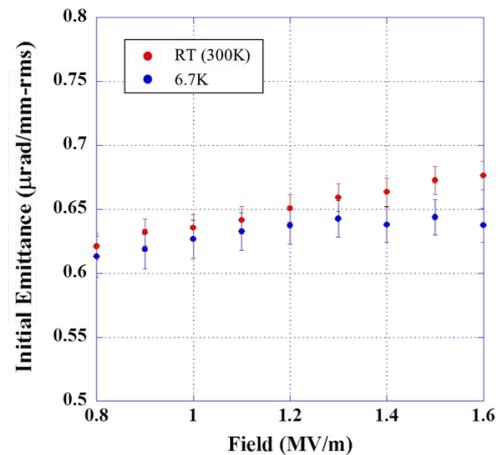


図6 冷却前後の初期エミッタンス比較

最後に、本フォトカソードの超伝導特性について述べる。超伝導転移温度はマルチアルカリ成膜前後で変化がないことが示された(図7)。透明超伝導体LiTi204の上部臨界磁場  $H_{c2}$  は約20Tである。しかし、RF臨界磁場には下部臨界磁場  $H_{c1}$  の影響が大きいため、 $H_{c1}$  の測定に重点を置いた。図8にマルチア

ルカリ成膜前後の  $H_{c1}$  の測定結果を示す。成膜による劣化はほとんど見られない。現在設計を行っている超伝導電子銃においてフォトカソード上に印加される最大磁場は 4mT であり、本フォトカソードが十分に耐えられる材料であることを確認できた。

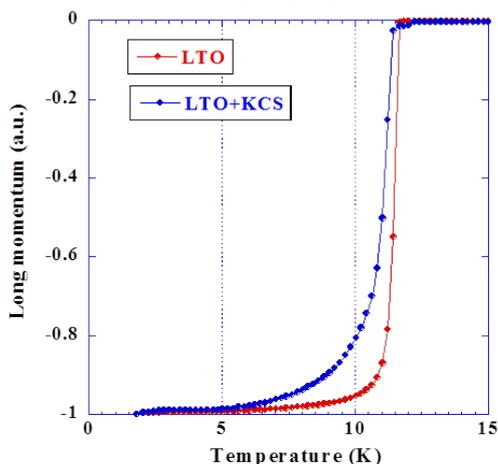


図7 マルチアルカリ成膜前後の超伝導転移温度の比較

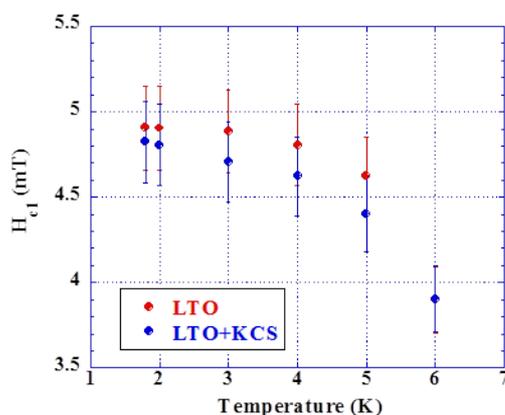


図7 マルチアルカリ成膜前後の下部臨界磁場  $H_{c1}$  の比較

以上の測定から本研究の目的であった透明超伝導  $\text{LiTi}_2\text{O}_4$  用いた背面照射式フォトカソードの製作と性能の検証は十分に達成された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

T.Konomi, K. Umemori, E. Kako, Y.Kobayashi, S.Yamaguchi, R.Matsuda, T.Yanagisawa, " Design, Fabrication and Performance of SRF-Gun Cavity ", The 17th International Conference on RF Superconductivity, THPB059, September 17, 2015, Wistler (Canada)

許斐太郎、稲垣瞭、山本尚人、保坂将人、

加藤政博、白木将、一杉太郎、松田竜一、加古永治、山口誠哉、小林幸則、「超伝導電子銃の開発状況」第 21 回 FEL と High-Power Radiation 研究会、2014 年 12 月 11 日、大阪大学産業科学研究所(大阪府吹田市)

T.Tokushi, M.Kato, R.Inagaki, E.Kako, S.Yamaguchi, Y.Kobayashi, N.Yamamoto, M.Hosaka, Y.Takashima, S.Shiraki, T.Hitosugi and T.Konomi, " Superconducting Gun for FEL ", proceedings of Advanced Lasers and Their Applications, May 10, 2014, Jeju(Korea) [図書](計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

許斐 太郎 (TARO KONOMI)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・特別助教

研究者番号: 20634158

##### (2)研究分担者

( )

研究者番号:

##### (3)連携研究者

( )

研究者番号: