

高輝度電子銃に向けた高温動作型フォトカソード電子源の研究開発

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF HIGH-TEMPERATURE OPERATING PHOTOCATHODE ELECTRON SOURCE FOR HIGH BRIGHTNESS ELECTRON GUN.

佐藤大輔^{#A)}, 吉田光宏^{B)}, 林崎規託^{C)}, 夏井拓也^{B)}

Daisuke Satoh^{#A)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Noriyosu Hayashizaki^{C)}, Takuya Natsui^{B)}

^{A)} Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Inst. of Technology

^{B)} Accelerator Division, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Inst. of Technology

Abstract

We have been developing a novel photocathode RF gun system with an advanced RF cavity structure and a new photocathode material for the SuperKEKB electron linac. This injector is required to obtain a low emittance and high charge electron beams in order to achieve the highest luminosity in the world. The required beam parameters are 5 nC and 20 mm-mrad from the RF gun. Moreover, 10 nC electron beams for positron production will be also generated by the same RF gun. In order to obtain extremely high charge electron beams, Yb-based laser system is being upgraded for higher power and a high temperature photocathode system for a quantum efficiency (QE) enhancement will be introduced to the new RF gun system. This paper reports on the research and development of the system of high temperature photocathode for QE enhancement to be able to generate high charge electron beams (~10 nC) at the RF gun in SuperKEKB electron linac.

1. はじめに

SuperKEKB 電子・陽電子入射器では、KEKB 加速器で達成された世界最高ルミノシティの 40 倍に相当する $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ というルミノシティを実現するために高電荷かつ低エミッタンスの電子・陽電子ビームが求められている。表 1 には SuperKEKB 電子・陽電子入射器における電子・陽電子ビームの要求性能を表している。その中でも電子ビームにおいては KEKB 線形加速器の 5 倍の電荷量で、なおかつ 20 mm-mrad 以下の低エミッタンスの電子ビームが必要である。

表 1: ビームパラメータの比較

	KEKB		SuperKEKB	
	e ⁺	e ⁻	e ⁺	e ⁻
Beam energy [GeV]	3.5	8	4	7
Bunch charge [nC]	(10)** , 1	1	(10)* , 4	5
Emittance [mm-mrad]	2100	300	6	20
Energy spread [%]	< 0.1		< 0.1	

(**) : primary electron beam parameters

一般に、高電荷電子ビームを加速する際、低速領域においてバンチ内の電子同士の強い空間電荷力によってビームが発散し、エミッタンスが悪くなるという問題がある。そこで、我々は疑似進行波型サイドカップル空洞という独自の加速空洞を備えたフォトカソード型 RF 電子銃を開発し、この問題を解決した[1]。疑似進行波型サイドカップル空洞とは、電極間の距離を短くし、この空間電荷力を打消すような強い収束電場を発生させる構造を持つ。さらに、

電極間の距離を近づけることで長くなってしまいうドリフト区間に別のサイドカップル空洞を挿入し、各々の加速空洞には位相が $\pi/2$ ずれた高周波をフィードすることにより、電子ビームから見て進行波のような加速電場を誘起することができる。そのため、高電荷電子ビームを低エミッタンスで有効に加速し、供給することが可能となった。

高電荷電子ビームの「生成」に関して言えば、光電効果による放出電荷量は「フォトカソードの量子効率」と「レーザーのパルスエネルギー」の積で決まる。それに加え、加速器の長期営業運転を想定した場合、高量子効率かつ長寿命なフォトカソード材料が望ましい。そこで、我々は金属化合物材料に着目し、イリジウム・セリウム化合物という比較的高い量子効率 (QE = 1.54×10^{-4} @266nm) と長い寿命 (> lanthanum hexaboride) を併せ持つカソード材料の開発に成功した[2]。

現在、KEK の A-1 電子入射部においてイリジウム・セリウム化合物をカソードとして用いた疑似進行波サイドカップル空洞型 RF 電子銃とイッテルビウムベースの高強度レーザーシステムを利用してコミッションングを行っている。また、50Hz 運転や陽電子ビーム生成用の高電荷電子ビーム生成に向けて、レーザーを含めたシステム全体のアップグレードにも取り組んでいる。

本学会では、高温動作型フォトカソードシステムを用いた高電荷電子ビーム生成実験に向けた研究・開発について報告する。

2. イリジウム・セリウムフォトカソードの特性

イリジウム・セリウム化合物は、フォトカソード

として優れた特性を持つ。たとえば、金属化合物カソードとしては、非常に低い仕事関数 ($\phi = 2.57$ eV) を持ち、融点は $1900 \sim 2250$ °C [4] と非常に高い。さらに、イオン衝撃にも高い耐性があり、低真空環境下においても表面状態が変化しづらいという特性を持っているため、非常に長寿命 ($> \text{LaB}_6$) [2] である。

イリジウム・セリウム化合物フォトカソードの量子効率と表面温度の関係を図 1 に示す[2]。

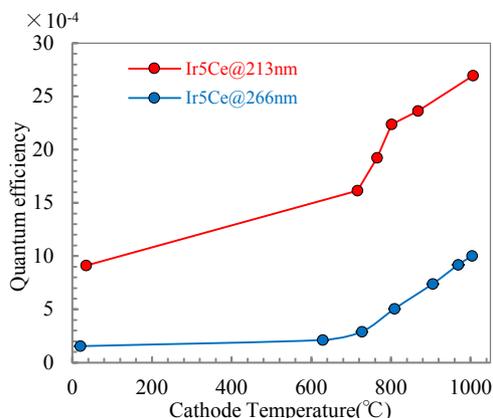


図 1: イリジウム・セリウムフォトカソードにおける量子効率と表面温度の関係。

図 1 より、イリジウム・セリウム化合物は、①短波長レーザー照射と②高温加熱することで、その量子効率が高くなることがわかる。したがって、SuperKEKB 電子入射器において、さらなる高電荷電子ビーム生成を想定した場合、有効な方法として以下に示す 3 つの方法が考えられる。

① レーザーのパルス当たりのエネルギーの増強

この方法ではレーザーのパルス強度が高くなるため、カソード表面でのレーザーアブレーションやレーザー光のミスアライメントによるカソードエッジ面での放電などの危険性がある。

② 極短波長レーザー光による電子ビーム生成

現在、KEK 電子入射器では Yb:YAG レーザーの第四高調波 ($\lambda = 260$ nm) を用いた電子ビーム生成を行っているが、さらに非線形光学結晶を用いた波長変換プロセス追加し、第五高調波 ($\lambda = 208$ nm) による電子ビーム生成を行う。

③ 高温動作型フォトカソードシステムの導入

前述の 2 つの方法とは異なり、高量子効率の効果以外に有用な効果をもたらす。例えば、カソードの表面温度を一旦 1000 °C 以上に加熱することで、表面に付着した不純物や酸化物が蒸発し、室温における量子効率が上昇し、なおかつ空間的に一様なプロファイルの電子ビームが生成可能となる[2]。さらには、高温を維持することによって、絶えずカソード表面が蒸発を繰り返し、不純物の少ないクリーンな表面状態を維持できるため電子放出が安定し、高い量子効率を長時間維持できるという利点がある。

3. 加熱システム

RF 電子銃への加熱システムの導入は、カソードプラグと加速空洞間の断熱とそれに伴って発生する高周波漏れを防ぐための高周波遮蔽構造の導入が必須となる。さらには、熱電子のバックボンバードメントによるビームの不安定性が発生しないように温度制限や加熱方式について検討しなければならない。

これらの問題を解決するため、我々は以下に示す 3 つの加熱方式を検討している。

3.1 背面電子ビーム加熱方式

一般的に、直熱加熱方式や傍熱加熱方式は加熱効率が悪いので、体積の大きい加熱対象物を高温かつ均一に加熱するのは困難である。SuperKEKB 電子入射器で使用しているカソード径は $\phi 8$ mm と非常に大きいので、これらの加熱方式は適さない。

背面電子ビーム加熱方式とは、メインのカソードに対して、その背面から加速した熱電子を照射することで加速電子が持っていたエネルギーを熱に変換し、メインのカソードを高温に加熱するという方法である。この加熱方式では、加熱電力が熱電子のビーム電流と加速電圧の積で決まる。そのため、低電流のビームでも高エネルギーに加速することで加熱対象物を高温加熱することが可能である。したがって、運転方法によってはフィラメントへの負荷が少なく、直熱又は傍熱加熱方式よりも長期間使用可能なシステムを構築することが可能である[6]。

我々は、高温動作型フォトカソードの KEK A-1 電子銃へ導入に向け、イリジウム・セリウムカソードを背面電子ビーム加熱方式で加熱可能なカソードプラグを開発した。

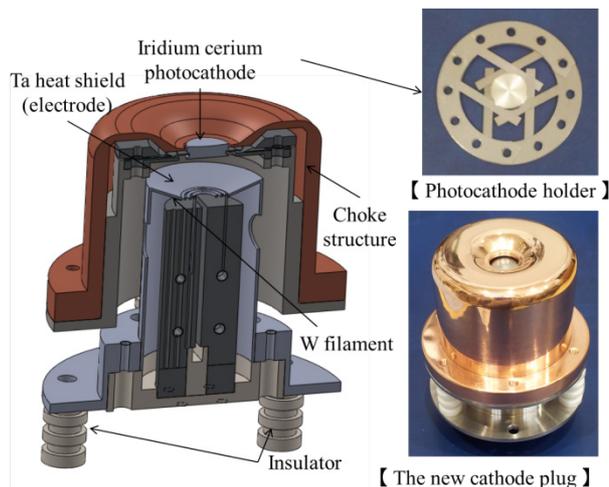


図 2: カソードプラグデザイン。

開発したカソードプラグのデザインと写真を図 2 に示す。右上の写真は、独自に開発したカソードホルダーである。この構造は、イリジウム・セリウムカソードの側面に溝を切り、その溝に沿って 3 枚のタンタル薄板治具を 3 方向から挟み込むようにして固定する構造である。このような形状を採用した理

由は、治具の熱膨張による変形が生じた場合に、カソード位置の変化が極力小さくなるように固定方法を改良した結果である。

各カソードホルダーの熱損失と輻射熱のモデル計算結果を図3に示す。ここでは、カソードホルダーは、室温であると仮定し、一次元定常熱伝導問題を計算した。我々が採用した薄板を使った固定方法は、ロッドタイプに比べ、カソードと治具の接触面積を小さくすることができ、熱流出を小さくすることができるという利点もある。

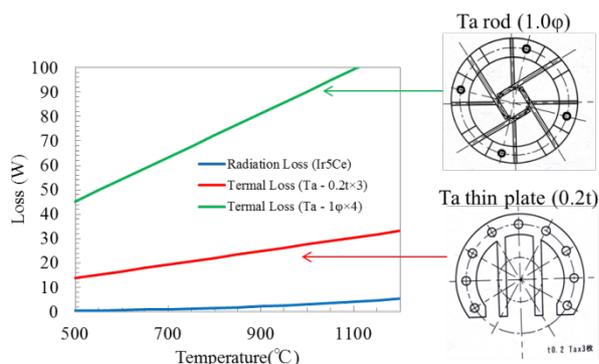


図3: カソードホルダーとその熱計算。

さらに、図2にも示した通り高周波の遮蔽のため、チョーク構造がカソードプラグの内部に存在する。その電磁場計算結果を図4に示す。図4より、RF電子銃の運転周波数 2.856GHz において透過は -64.2dB であり、十分、高周波の遮蔽として働く構造である。現在は、カソードの加熱試験に向けて加熱用の電源開発と温度制御システムの開発を行っている。

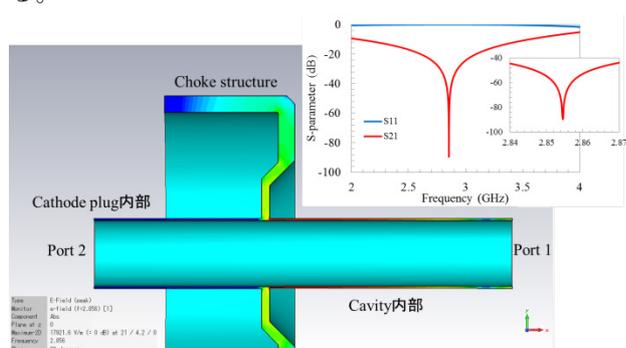


図4: チョーク構造の電磁場計算結果。

3.2 CW レーザー加熱

CW レーザー加熱とは、加熱対象物に CW レーザーを照射し、そのうちの吸収されたエネルギーが熱となって対象物を高温に加熱する方法である。CW レーザー加熱方式は、加熱効率がよく、また真空容器内に熱シールドや電気回路等が不要であり、非常に単純な構造をしている[7]という利点がある。さらに、イリジウム・セリウム化合物のような長寿命材料を用いれば、フィラメント等を利用した加熱

方式と異なり、真空開放なしで加熱システムのメンテナンスできるというメリットがある。そして、近年、高出力レーザーダイオードの研究開発が盛んにおこなわれており、比較的 low cost で商用の製品が手に入るようになってきているのも大きなメリットである。そこで、我々は、イリジウム・セリウム化合物を用いた CW レーザー加熱実験を行い、その実用性を検証した。

図5には、CW レーザー加熱の実験セットアップ全体を示している。

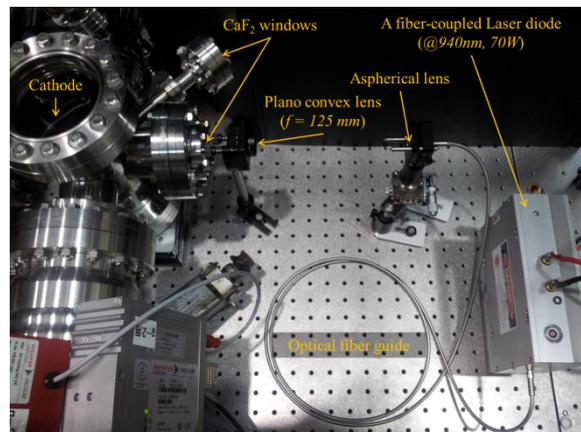


図5: CW レーザー加熱実験セットアップ。

今回、熱源としてファイバー結合型レーザーダイオードを用いて加熱実験を行った。本実験で使用したレーザーダイオードは、最大出力 70W で、中心波長 940 nm にもつ。イリジウム・セリウムカソードの CW レーザーの照射面は、レーザーの吸収率を高める目的で、コロイダルグラファイトによるコーティングを施した。また、レーザー導入窓材も赤外線領域においても高い透過率を持つフッ化カルシウム (CaF₂) 製のものを使用した。そして、光電子放出面に熱電対を取り付け、表面温度を測定した。

CW レーザーの照射電力とイリジウム・セリウム化合物の表面温度の関係を図6に示す。実際、CW レーザー光のうち窓材での吸収とカソード面での反射を考慮すると約 81% のレーザーエネルギーがカソードで吸収され、熱になっている。つまり、今回の実験では、約 50W 程度のレーザーエネルギーで表面温度を 1000°C まで加熱することに成功した。しかし、表面温度が 800°C を超えたあたりから、温度上昇率が下がってきたのがわかる。これは、レーザーの吸収をよくする目的で使用したグラファイトコーティングが剥がれてしまい、レーザー照射面での反射が大きくなったためである。この問題を解決するために①2000°C 環境下で使用可能な超高温耐熱グラファイトコーティングや②グラファイト固定治具の使用を検討している。

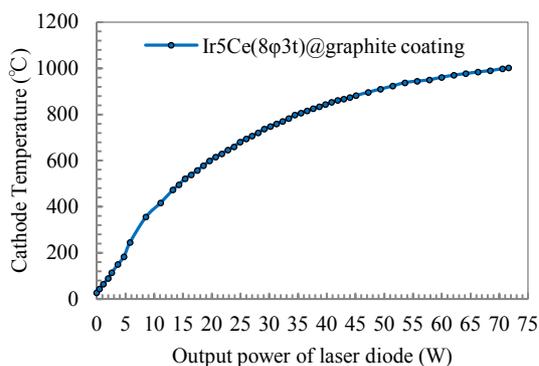


図 6: CW レーザーの出力とカソードの表面温度の関係。

3.2 パルスレーザー加熱

パルスレーザー加熱とは、加熱対象物に対して高強度レーザーパルス照射することによって、レーザー照射表面だけを瞬間的に高温に加熱する方法である。

この加熱方式は、CW レーザー加熱と同様に、真空容器内に熱シールドや電気回路等が不要であることはもちろん、他の 2 つの加熱方式とは異なり、カソードの表面温度がある瞬間だけ高温になるため、RF 電子銃の運転の際に問題となる暗電流を低減できると考えられる。

我々は、一次元非定常熱拡散方程式を用いて、ナノ秒レーザーパルスによるパルスレーザー加熱のモデル計算を行った。カソードの表面温度の時間変化は、レーザーのプロファイルや境界条件によって影響され、以下のように表現できる[8]。

$$\frac{\partial}{\partial t} T(z, t) = \kappa \frac{\partial^2}{\partial z^2} T(z, t) + \frac{\varepsilon}{\rho C_p} \frac{P_0}{\pi r^2} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \delta(z) \quad (1)$$

Boundary Conditions

$$T(z, 0) = 0, \quad \left(\frac{\partial}{\partial z} T(z, t) \right)_{z=0} = 0 \quad (2)$$

ここで、カソード表面の輻射率を ε 、比熱容量 C_p 、密度 ρ 、熱拡散率を κ とする。表面温度の時間変化を表す関数 $T(z, t)$ は、表面からの深さ z と時間の関数であらわされる。ここで、我々が考えている光電効果という現象は、カソード表面（～数 nm）の領域での起こる現象であり、今回は、最表面 ($z=0$) の温度変化 $T(0, t)$ について考えた。加熱用のレーザーパルスのパラメータとしてレーザーの時間プロファイルはガウシアンと仮定し、オフセット t_0 でパルス幅 σ 、ピーク強度 P_0 で、レーザーのスポット半径を R として計算を行った。

図 7 は、加熱用パルスレーザーの時間構造（青）とカソードの表面温度の時間変化（赤）を表している。これらの計算の結果、表面温度を室温から 1000°C まで上昇させるためには、Nd:YAG レーザーの基本波で、パルス幅 10ns のレーザーパルスを用いる必要があることが算出された。

現在、これらのモデル計算を基に、Q スイッチ型 Nd:YAG レーザー (1064 nm, 10 ns, 10 Hz) を用いたパルスレーザー加熱による高量子効率化の実験を行っている。

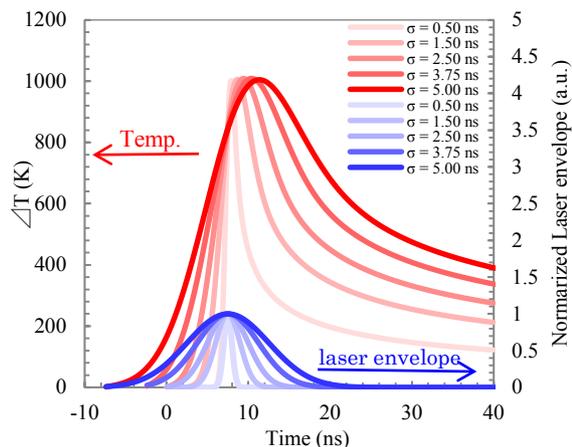


図 7: Temperature increase and normalized laser envelope of a heating pulse as a function of time.

参考文献

- [1] T. Natsui *et al.*, TUOCB103, IPAC13, Shanghai, China, 2013.
- [2] D. Satoh *et al.*, MOPFI023, IPAC13, Shanghai, China, 2013.
- [3] Rozhkov S.E. *et al.*, "Technical Characteristics of Thermoemitters from Iridium-based Alloys with Lanthanum, Cerium and Praseodymium", *Generatoryie, Modulatornyie I Rentgenovskye Pribory*, 2, Moscow, 1969, pp. 81-83 (in Russian).
- [4] H. Okamoto *et al.*, "Binary Alloy Phase Diagrams Second Edition Volume 2", ASM International.
- [5] G.I.Kuznetsov, "IrCe Cathodes For EBIS", *Journal of Physics: Conference Series* 2 (2004) 35-41.
- [6] Marc E. Herniter *et al.*, "Temperature-Limited Electron Bombardment Heating Method", *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, VOL. 19, NO. 6, DECEMBER 1991.
- [7] P. K. Roy *et al.*, "Study of a laser-heated electron gun" *Review of Scientific Instruments*, Dec 1996, Vol. 67 Issue 12, p4098.
- [8] M. Borland *et al.*, "PULSED LASER HEATING OF THERMIONIC CATHODES IN RF GUNS*", THP108 *Proceedings of LINAC2010*, Tsukuba, Japan, 2010.