

INITIAL EMITTANCE MEASUREMENTS FROM THE JAEA 250kV DC GUN WITH AN NEA-GaAs CATHODE

Hokuto Iijima^{1,A)}, Ryoji Nagai^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Ryoichi Hajima^{A)}
^{A)} Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency
 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

Abstract

The effective thermal energy of electrons emitted from an NEA-GaAs photocathode is an important property for photoemission electron sources. We report initial emittance measurements using the JAEA 250kV-50mA DC gun. The measurements have been performed by a single-slit-scan method with combination of a 50- μm slit and a YAG:Ce screen. The phase-space plots are analyzed by “self-consistent, unbiased elliptical exclusion method” (SCUBEE). The effective thermal energy is evaluated by the fit of emittances as a function of the laser spot size. The minimum emittance was measured to be 0.054 mm-mrad for the laser wavelength of 633 nm and spot size of 160 μm . Consequently, the effective thermal energy of 64 meV for the wavelength of 633 nm is obtained.

JAEA 250kV電子銃におけるNEA-GaAsからの初期エミッタンス計測

1. はじめに

エネルギー回収型加速器(ERL)による次世代放射光源は、これまでにない大電流と低エミッタンスが必要とする。例えば、高エネルギー加速器研究機構(KEK)を中心に進めている計画では平均電流100mAで規格化エミッタンス1mm-mrad、または10mAで0.1mm-mradの電子ビームを目標としている^[1]。こうした高品質の電子ビームを実現するには電子銃の性能によるところが大きく、目標とする低エミッタンスを実現するためには、少なくとも電子銃に用いられるカソードからの初期エミッタンスがこれを下回らなければならない。

負の電子親和力(NEA)表面を持つGaAsは初期エミッタンスを小さくできることから、電子銃用の fotocathodeとして研究されてきた^[2-4]。我々、日本原子力研究開発機構(JAEA)も、NEA-GaAsカソードの性能評価を行える250kV-50mA DC電子銃の開発を進めてきた^[5]。よく知られているように、fotocathodeからの規格化された初期エミッタンス ϵ_n は実効的な温度 T を用いて、

$$\epsilon_n = \sigma \sqrt{k_B T / m_e c^2} \quad (1)$$

で与えられる。ここで σ はカソードに照射するレーザーのrmsスポットサイズである。実効的な温度 T を決める要因としては、カソードの実際の温度、GaAsのバンドギャップと照射するレーザー波長とのエネルギー差、伝導帯に上げられた電子の熱化過程、カソード上での磁場の強さなどが考えられるが、ここではこうした効果をすべて T に繰り込んでいる。NEA-GaAs fotocathodeでは駆動するレーザーの波長をバンドギャップに合わせることで、実効的な温度を小さくできることが期待される。

そこで本計測では、JAEAの250kV電子銃を用いて、

レーザーのスポットサイズ σ を変えながらエミッタンス ϵ_n を測定することでカソードの実効的な熱エネルギー $k_B T$ を計測した。

2. 250kV電子銃とビームライン

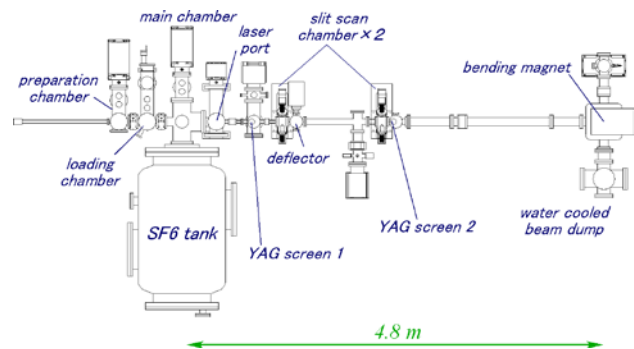


図1: JAEA 250kV-50mA電子銃とビームラインの概念図。

図1に電子銃とビームラインの構成を示す。電子銃は主に高電圧発生部、loading chamber、preparation chamber、カソードおよびアノード電極を収納するmain chamber部からなる。またカソード電極の下流20cmの位置にはエミッタンス補償用のソレノイドコイルが設置されている。このソレノイドコイルはバックアップコイルを調整することで、カソード上の磁場の強さを0にできる。

ビームラインは全長約5mで、主にエミッタンスを測定するためのスリットスキャンチャンバーが2台、ビームプロファイルを計測するためのYAG:Ce結晶によるスクリーンが二か所に設置されている。また、ビームラインの下流には90度偏向電磁石、終端には水冷型の大電流用ビーム

¹ E-mail: hokuto@hiroshima-u.ac.jp

ダンプが設置されている。今回は上流側のスリットと、図中のYAG screen 2を用いたシングルスリットスキャン法でエミッタンスを測定した。

測定に用いたスリットの幅は50 μm でスキャンのステップ幅は50~70 μm とした。スリットとスクリーンの距離は1.37mである。スクリーンは厚さ100 μm で、表面にはチャージアップを防ぐためにアルミニウムを薄く蒸着している。スクリーンの像は512 \times 480 pixelのCCDカメラによって撮影した。スクリーンとCCDカメラの位置関係で決まる像の分解能は横方向82 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、縦方向85 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。

カソードは市販のGaAsを使用し、NEA表面はCsとO₂によるYo-Yo法で作成している。初期の量子効率LD($\lambda=670\text{nm}$)による計測で4.7%であった。測定時の電子ビームの引出しには、He-Neレーザー(波長633nm)を用いている。また、カソード上でのレーザープロファイルはガウス分布に従う。

エミッタンス測定時の電流値は空間電化効果を見逃すことができるように、1 μA 程度に抑えた。電子ビームの加速エネルギーは150keVとし、エミッタンス補償用のソレノイド磁場の強さはビーム軸上のもっとも強いところで110Gaussに設定した。ただし、本計測ではバックアップコイルを使わなかったためカソード上に若干磁場が残っている。数値計算から見積もった磁場の強さは19Gaussである。また今回は垂直方向のエミッタンスを計測した。

3. SCUBEExによるエミッタンス解析

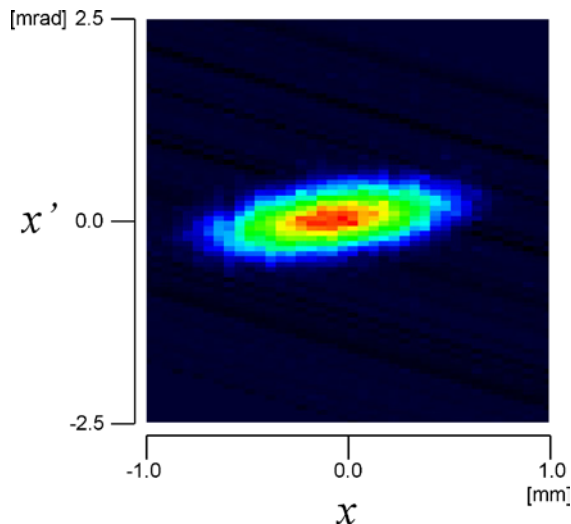


図2:シングルスリットスキャンで計測したレーザースポット160 μm の位相空間分布。

シングルスリットスキャンで得られた、位相空間の一例を図2に示す。図2はレーザー径160 μm の結果である。一般に、こうした位相空間から求めるエミッタンスの値はバックグラウンド・ノイズの引き方に左右されやすい。ここでは、”self-consistent, unbiased elliptical exclusion method”(SCUBEEx)^[6]と呼ばれる方法でエミッタンスの値を解析

した。SCUBEExは位相空間のデータから一様にバックグラウンド・ノイズを引くのではなく、次式で決まる楕円形状

$$\gamma_0 x^2 + 2\alpha_0 x x' + \beta_0 x'^2 = A^2 \quad (2)$$

$$\beta_0 \gamma_0 - \alpha_0^2 = 1 \quad (3)$$

の領域Aを決めて、その内側でエミッタンスの値を求める。外側はバックグラウンド・ノイズとして計算から除外する。以下に図2のデータを用いてSCUBEExの具体的な手法を説明する。

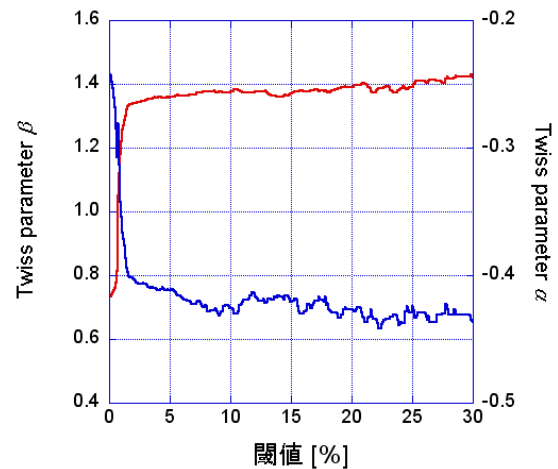


図3: 閾値に対するTwiss parameter β , α の変化。閾値の大きさは位相空間でのピーク値に対する割合で示している。

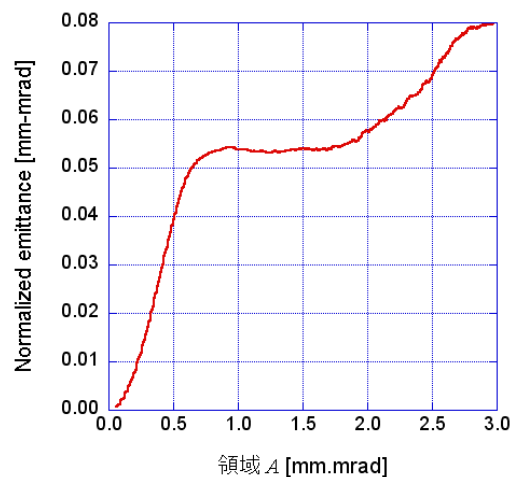


図4: 領域Aに対するエミッタンス。Aが妥当な値になるとエミッタンスがほぼ一定となる。

まず、マスクに使う楕円形状の α_0 , β_0 , γ_0 を決めるために、位相空間上の各点に対して閾値を設定しこの値以下は0として位相空間全体からエミッタンスを計算する。この閾値を徐々に大きくしていくと、ある一定値を超えた段階でTwiss parameterの β , α がほぼ一定となる。図3は

図2のデータに対して閾値を変化させたときの β 、 α の変化を示している。閾値は位相空間でのピーク値に対するパーセンテージで表しており、赤線が β (縦軸は左)、青線が α (縦軸は右)の変化を表す。ここでは閾値10-30%の範囲でそれぞれの平均値をとり、(2)式のパラメータは $\beta_0=1.39$ 、 $\alpha_0=-0.43$ とした。また、 γ_0 は(3)式の関係から1.13とした。

次に決定した α_0 、 β_0 、 γ_0 を用いて位相空間からAを変えながらエミッタンスを計算する。図4はAに対するエミッタンスの変化を示している。エミッタンスは最初Aと共に増大するが、あるAの範囲でほぼ一定値をとり、その後発散していく。この一定値が図2の位相空間に対する真のエミッタンスの値と考える。ここでは0.8から1.8の区間の平均値をとって $\varepsilon_n=0.054\text{mm-mrad}$ と求めた。

4. 測定結果と議論

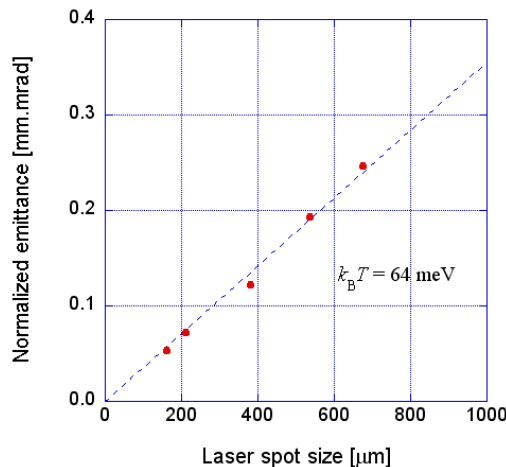


図5: レーザースポットサイズに対するエミッタンスの変化。青線は(1)式を用いてフィッティングをした結果を示す。

各レーザー径に対する、エミッタンスの値を図5に示す。それぞれエミッタンスの値は先に述べたSCUBEEsによって算出している。図中の青波線は測定した値を(1)式によってフィッティングした結果を示しており、カソードの実効的な温度 $k_B T$ は $64 \pm 3\text{meV}$ であった。この値は室温($T=300\text{ [K]}$)を仮定したときのエネルギー 26meV よりも大きい、バンドギャップの大きさ ϕ とレーザー波長 $h\nu$ の差によるエネルギー($h\nu - \phi$) $=180\text{meV}$ よりは低く、レーザーにより伝導帯に上げられた電子が放出されるまでに熱化されたことがうかがえる。

次世代放射光源の実機では、電子ビームの空間電荷効果を抑えるため、レーザーの波形整形により、円筒型一様分布の電子ビームを発生させることを考えている^[1]。円筒形の場合、エミッタンスと円筒の半径 r は

$$\varepsilon_n = \frac{r}{2} \sqrt{k_B T / m_e c^2} \quad (4)$$

の関係を持つ。平均電流 100mA の場合、半径 r は 1 mm 程度で、(4)式から $k_B T=64\text{meV}$ のときのエミッタンスは 0.18mm-mrad であり、目標値の 1mm-mrad を十分に下回る。また、 0.1mm-mrad にするためには半径 0.57mm 以下となるが、要求される電流値が低いことから実現可能と考える。

今回の測定と同様な実験をCEBAFとCornell大学が行っており、波長 633 nm に対する $k_B T$ の値はそれぞれ、 $44 \pm 3\text{meV}$ ^[2]、および $81 \pm 6\text{meV}$ ^[4]と報告している。我々の測定値は両者の中間に位置し、それぞれ異なった値ではあるが、これはカソードの実温度、カソード上での磁場の強さ等の違いからくるものと考ええる。例えば得られたエミッタンスのデータを磁場の効果^[7]を含めた次式、

$$\varepsilon_n = \sqrt{k_B T / m_e c^2 \cdot \sigma^2 + e |B_z| / 2 m_e c \cdot \sigma^4} \quad (5)$$

でフィッティングを行うと、 $k_B T=54 \pm 5\text{meV}$ という結果をえる。またこのとき、 $B_z=8.4 \pm 1.7\text{Gauss}$ で、2章で述べた値 19Gauss と多少異なるが、バックリングコイルを調整し、カソード上での磁場の強さを0にすることで、 $k_B T$ を小さくすることができる。

次世代放射光源の実機ではGaAsのバンドギャップに近い波長のレーザーを用いる。このため 633nm の波長の時よりもさらに小さい $k_B T$ が実現可能で、CEBAFでは 840 nm の波長に対して 34 meV ^[2]、Cornell大学は 860 nm に対して 30 meV ^[4]を計測している。

5. まとめ

JAEAの 250kV-50mA DC電子銃を用いて、波長 633nm に対するNEA-GaAsからの初期エミッタンスおよび実効的な熱エネルギー $k_B T$ を測定した。測定された最も低いエミッタンスは、レーザーのrmsスポットサイズ $160\mu\text{m}$ に対して 0.054mm-mrad であった。また、 $k_B T$ は 64meV であった。この結果から、次世代放射光源の実機ではよりバンドギャップエネルギーに近い波長のレーザーを使用し、またレーザーの波形整形により発生する電子ビームを円筒形にすることで、目標の 1mm-mrad のエミッタンスが可能であることを確認した。

参考文献

- [1] “コンパクトERLの設計研究”, KEK/Report 2007-7, JAEA/Research 2008-032, February 2008 A
- [2] B. M. Dunham, L. C. Cardman, and C. K. Simclair, Proc. of PAC '95, 1995, p.1030
- [3] N. Yamamoto, et al., J. Appl. Phys., **102**, 024904 (2007).
- [4] I. V. Bazarov, et al., J. Appl. Phys., **103**, 054901 (2008).
- [5] H. Iijima, et al., Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.670 (2007).
- [6] M. P. Stockli, R. F. Welton, and R. Keller, Rev. Sci. Instrum., **75**, p.1646 (2004).
- [7] D. T. Palmer, et al., Proc of PAC'97, 1997, p.2843.