

陰極近傍における鏡像効果による 電子ビームエミッタンス増減現象の電子銃パラメータ依存性 IMAGE CHARGE EFFECT ON REDUTION PHENOMENON IN ELECTRON GUN

野儀武志 *^{A)}、増田開、山下大樹、守田健一、Torgasin Konstantin、桂山翼、
村田智哉、Sikharin Suphakuln、全 炳俊、紀井俊輝、長崎百伸、大垣英明
Takeshi Nogi*^{A)}、Kai Masuda, Hiroki Yamashita, Kenichi Morita, Konstantin Torgasin, Tsubasa Katsurayama,
Tomoya Murata, Suphakul Sikharin, Heishun Zen, Kazunobu Nagasaki, Hideaki Ohgaki
^{A)}Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Abstract

Development of next generation light sources requires reduction of beam emittance. The emittance can be influenced in the vicinity of a cathode, where electron energy is low and the beam dynamics is dominated by space charge and image charge effect. Recently it was discovered that for ideal DC acceleration emittance rises near cathode and subsequently decreases due to self-linearization force caused by space charge effect. This phenomenon occurs for accelerating field, which is lower than usually applied at existing electron guns. It is an issue that this concept is feasible for electron gun configuration of real injectors. In this research we numerically investigate the transverse emittance and its dependence on parameters such as current density, accelerating field, and the distance from the cathode. As a result, the position of minimal emittance was found to be correlated to perveance, and his position can be varied by proper settings of parameters.

1. はじめに

放射光源のさらなる高性能化に向けて、電子銃のさらなる低エミッタンス化が求められている。特に、電子のエネルギーが低く、空間電荷効果による影響が大きい陰極近傍における横方向エミッタンスの悪化が問題となっている。この陰極近傍での電子ビームの挙動を説明するべく、数値シミュレーションを用いてのエミッタンスの変化の解析が行われてきた。近年、陰極の近傍でエミッタンスが一度増加した後に、外部からの力を受けることなく減少する現象が複数の数値シミュレーションコードで見られた^[1-5]。この現象については、空間電荷効果に因る自己線形化力によってもたらされることが指摘されており^[2,4]、本現象の解析的なメカニズムが明らかとなった^[6]。Figure 1 は本現象が確認された一例である。Figure 1 では直径 2 mm の陰極から電流密度 40 A/cm² で一様に分布する直流連続ビームを一様電界 6 MV/m 中で加速する条件下でのエミッタンスを示す。規格化 RMS エミッタンスはここでは式 1 と定義する。

$$\epsilon_{nr} = \sqrt{\langle r^2 \rangle \langle (\gamma\beta r')^2 \rangle - \langle r\gamma\beta r' \rangle^2} \quad (1)$$

この現象で特筆すべき点は、通常低減させることが難しいエミッタンスが、外部からの力を必要とせずに、電子ビーム自らがつくる電界によって位相空間上の歪みを補償し^[5]、極低エミッタンスまで減少することである。このエミッタンスの変化は Figure 2 の位相空間図を用いて機構の説明がなされている^[6]。陰極の近傍においては空間電荷効果により、電子ビームの外縁部は、線形よりも高次の非線形電界の影響を受ける。このため陰極上において、位相空間で $a_0 - b_0$ のように直線であった分布が、陰極近傍で $a_1 - b_1$ のように下に凸の分布をもち、エミッタンスが急激に増加する。この鏡像効果による非線形電界は、一様であった電流密度分布にも非一様性を発生させる。ビームから生じる進行方向に

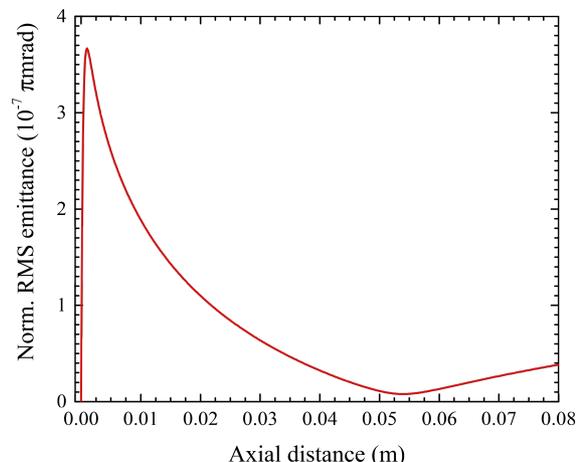


Figure 1: Simulation result by KUAD2^[7].

垂直な電界 E_r は陰極近傍で生じた位相空間の非線形性を補償する上に凸の曲線の電界分布となる。これは位相空間分布において $a_2 - b_2$ の曲線を $a_3 - b_3$ の直線に補償する力をビームに与える。このため、エミッタンスは減少する。エミッタンスの極小値を超えてからも、電流密度の非一様性はそのまま残るため、位相空間分布上の直線 $a_4 - b_4$ から曲線 $a_5 - b_5$ のように曲率は増加するため、エミッタンスはその後増加し続ける。

本現象は、加速電界が 10 MV/m 以下と低い電界領域で観測されている。このため、本現象を用いて高電界化とは異なるアプローチによる低エミッタンス化が期待される。例えば、後段の線形加速器に極低エミッタンスの極小値の位置を調節することで、線形加速器を通過した後のエミッタンスを向上することができる可能性がある。本現象を実際に利用する上で、エミッタンスの極小値の位置の制御は明らかではない。本研究においては、エミッタンスの極小値の位置と電子銃の電界強度、

*nogi.takeshi.73n@st.kyoto-u.ac.jp

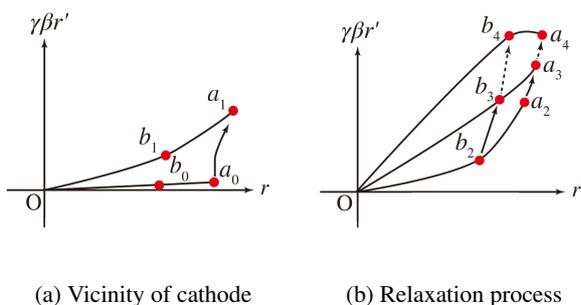


Figure 2: Concept of emittance transition in phase-space.

電流密度の間の関係を、数値シミュレーションを用いて解析、検討し結果を報告する。

2. 理想電子銃でのエミッタンス極小値の位置の変化

まず、現象の理解を簡単にするために、理想的な電子銃を仮定して解析を行った。ここでの理想的な電子銃とは次の条件を満たすものとする。

- 熱エミッタンスが 0
- 陰極上から取り出すビームは直流で連続
- 陰極上における電流密度が一様
- 加速電界はシミュレーション領域全域にわたって一様で定常
- 外部からの磁場の影響はない

以上の条件を仮定し、軸対称 2 次元時不変粒子軌道シミュレーションコードである KUAD2^[7] を用いて解析を行った。シミュレーションでは空間電荷効果を考慮した。Table 1 に示す範囲で初期電流密度および加速電界を変更した。Figure 3 に典型的なパラメータにおける規格化 RMS エミッタンスを示す。

Table 1: Parameters for an Ideal DC Electron Gun

初期電流密度	10 A/cm ² ~100 A/cm ²
初期ビームサイズ	ϕ 2 mm, uniform
加速電界	1.0 MV/m~10 MV/m
加速領域	$z = 100$ mm まで
シミュレーション領域	$r : 500$ mm, $z : 100$ mm

電界強度・初期電流密度を変化させることで、エミッタンスの極小値を低く保ったまま、エミッタンスの極小値の位置を変えることができる。次に位置が変化する原理について述べる。電界強度と初期電流密度を変化させたときに、電界強度と電流密度の比が一定である場合、エミッタンスの極大値が等しくなることが報告されている^[8]。電界強度・初期電流密度の比が等しい組であっても極小値の位置が異なるため、極大値における電流密度分布の非一様性の違いがその後のエミッタンスの変化を決定づけていると考えられる。

エミッタンスの極小値の位置が変化する機構について、Table 2 に示す条件を用いて説明する。エミッタンスの極大値をとる陰極からの距離が 1 mm における電流密度分布および位相空間分布を Figure 4 に示す。陰極

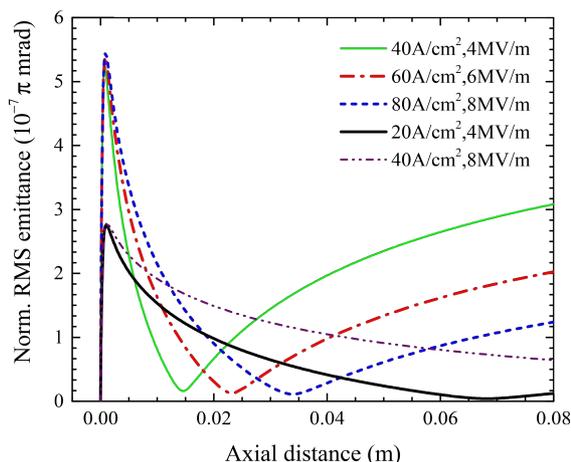


Figure 3: Emittance evolution for different accelerating fields and for current density.

Table 2: Combination of Parameters for Analysis

	電界強度	電流密度	極小値の位置
Case 1	40 MV/m	40 A/cm ²	13.8 mm
Case 2	80 MV/m	80 A/cm ²	32.0 mm

から一様の電流密度分布で引き出された電子ビームは陰極からの距離が 1 mm においては、空間電荷効果によって電流密度分布に非一様性が生じている。このときのビームの半径は、電流密度 Case 1 の場合で 1.087 mm、電流密度 Case 2 の場合で 1.055 mm である。このビームサイズの差は、陰極近傍における空間電荷効果の大きさによって生じる。空間電荷効果が大きい Case 1 では、ビームが大きく広がるため、電流密度の非一様性が大きくなる。電流密度の非一様性が大きければ、それに伴い生じる r 軸方向の電界分布の非線形性が大きくなり、位相空間上での曲線を線形化するドライビングフォースも大きくなる。

また、ビーム径が異なるにもかかわらずエミッタンスが等しいことから、Case 1 の位相空間分布での曲線 $b^{40} - a^{40}$ は Case 2 の場合の曲線 $b^{80} - a^{80}$ の場合と比べて曲率が低い。このため、位相空間分布を線形化するために必要な運動量が Case 1 のほうが小さい。

以上 2 つの理由から、電流密度分布の非一様性から

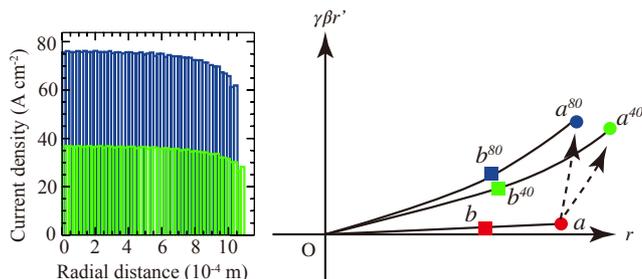


Figure 4: Current density profile at $z = 1$ mm and emittance variance in Phase-space.

生じる自己線形化力が大きく、かつ位相空間分布を線形化する運動量の少ない Case 1 の場合がより早く線形化するため、陰極付近でエミッタンスの極小値をもつ。すなわち、空間電荷効果によって生じる電流密度の非一様性がエミッタンスの極小値の位置を決定づけている。

3. SCSS 電子銃でのエミッタンス極小値の位置の変化

次に、実際の電子銃における本現象を確認するため、SACLA のプロトタイプ機 SCSS 試験加速器 (SPRING-8 Compact SASE Source) の電子銃の設計データを用いて数値シミュレーションを行った。SACLA に用いられている電子銃は世界でも極低エミッタンスを達成する熱陰極電子銃の一つであり、計算上の熱エミッタンスは $0.4\pi\text{mm mrad}$ であり、熱エミッタンスを含めて $0.6\pi\text{mm mrad}$ を達成している^[9]。本研究では、パルス運転ではなく直流連続ビームを仮定し、陰極による空間電荷効果を考慮に入れ、熱エミッタンスを 0 として数値シミュレーションを行った。Table 3 に SCSS の電子銃の設計データを用いたシミュレーションで使用したパラメータを示す。

Table 3: Parameters Used in Calculation for SCSS Gun

カソードからの引き出し電流	1.0 A
カソード径	$\phi 3.0\text{ mm, uniform}$
印加電圧	500 kV

Figure 5 にシミュレーション結果を示す。

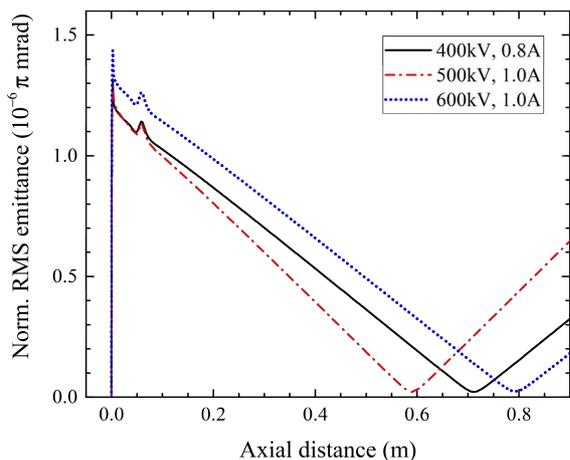


Figure 5: Emittance evolution of beams generated by SCSS gun with different voltages and currents

SCSS の電子銃の設計データを用いたシミュレーションにおいても、エミッタンスが増加してその後エミッタンスが減少する現象が確認された。陰極から引き出す電流密度および加速領域への印加電圧を変更することでエミッタンスの極小値の位置が変化しており、実際の電子銃でも、エミッタンスの極小値を低く保ったまま、位置を制御することが可能であると数値シミュレーション上で示された。

4. パービアンズとエミッタンスの極小値

第 2. 章では陰極近傍における空間電荷効果による電流密度の非一様性の大きさが極小値の位置を変化させることを示した。また、第 3. 章では、実際の電子銃の構造を用いた数値シミュレーションにおいても、同様の現象が観測されることが確認された。本章では、理想的な電子銃と SCSS の構造を用いたシミュレーションについて、陰極上での空間電荷制限を表す指標である、パービアンズを用いて整理する。ここでは、陰極上での空間電荷効果に注目し、電界強度が一樣でない場合にも同様に扱うことを可能にするために、式 2 に示す規格化パービアンズを用いる。 $E_{z,z=0}$ は陰極上での電界、 J_{init} は初期の電流密度である。

$$P_n = \frac{J_{\text{init}}}{(E_{z,z=0})^{1.5}} \quad (2)$$

本節では第 2. 章の結果に加えて、SCSS の設計に近づけて比較を行うため、加速電界を与える領域を SCSS の設計を用いた数値シミュレーションによって加速電界が存在する領域において計算を行った。ただし、実際の電子銃の電界分布は一樣ではないため、同じ極板間距離であっても、陰極上で同じ電界強度を与える電圧は平行平板の場合と異なる。Table 4 に、極板間距離、陰極上の電界強度および平均電界強度と印加電圧の関係を示す。

Table 4: Difference of Electric Intensity of Accelerating Field

	Simulated SCSS gun	平行平板
d	70 mm	70 mm
V/E_{z0}	28 mm	70 mm
E_{z0}/E_{ave}	2	1

また、第 2. 章の陰極径と SCSS 電子銃の陰極径は異なる。両者の差を比較するために 2 mm または 3 mm で Table 5 の条件下において数値解析シミュレーションを行った。規格化パービアンズとエミッタンスの極小値の位置を Figure 6 に示す。

Table 5: Parameters for an Ideal DC Electron Gun

初期電流密度	$10\text{ A/cm}^2 \sim 100\text{ A/cm}^2$
初期ビームサイズ	$\phi 2\text{ mm}$ または 3 mm, uniform
加速電界	$1.0\text{ MV/m} \sim 10\text{ MV/m}$
加速領域	$z = 70\text{ mm}$ まで
シミュレーション領域	$z : 935\text{ mm}$

エミッタンスの極小値の位置は規格化パービアンズに依存する。規格化パービアンズが大きければ陰極上での空間電荷効果が大きいため、エミッタンスの極小値は陰極に近づく。これは SCSS の設計データを用いたシミュレーションと、理想的な電子銃を仮定したシミュレーションどちらにおいても同様の依存性を確認した。

理想的な電子銃で陰極径を 2 mm から 3 mm に変更した際に、エミッタンスの極小値の位置の変化は認められなかった。これを利用すれば、電子ビームに求められる

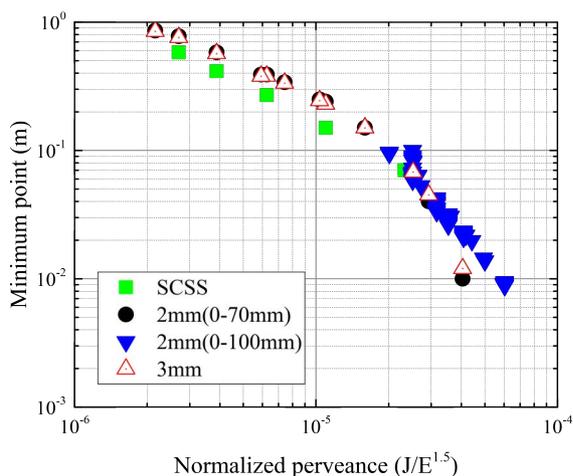


Figure 6: Dependence of minimum point of emittance on normalized perveance.

電流・電荷量が決まっている場合は、陰極径を大きくすることで初期電流密度を下げるができる。同じ電界強度であれば、陰極上での規格化パービアンスを小さくすることができるため、Figure 6 に従ってエミッタンスの極小値の位置を遠方にすることができる。陰極から引き出す電流を 0.8 A, 加速電圧を 500 kV に固定して、電流密度を Table 6 の値としたときの規格化エミッタンスを Figure 7 に示す。他の条件は、Table 5 で示した条件と同様である。

Table 6: Current Density, Which Beam Current is 0.8 A

	2 mm	3 mm
初期電流密度	25.4 A/cm ²	11.3 A/cm ²

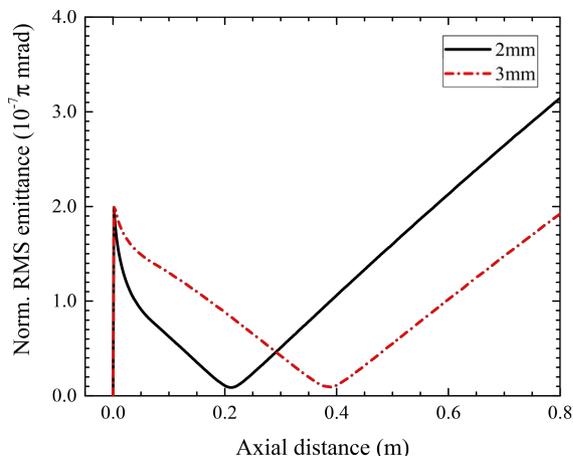


Figure 7: Emittance evolution for different diameter of cathode with same beam current.

陰極径を大きくした際には一般的にエミッタンスは悪化する。しかし、本シミュレーションでは 2mm, 3mm いずれの場合もエミッタンスの極大値は等しい。またエミッタンス極小値も陰極直径が 2mm, 3mm いずれの場

合においてもエミッタンスは 0.1πmm mrad を下回る。 $z = 80$ mm の位置でのエミッタンスは陰極径が 3 mm のほうが低い。陰極径を大きくし、初期電流密度を低くすることで追加速の後でのエミッタンスを低減する可能性がある。

5. まとめ

陰極近傍における鏡像効果による電子ビームエミッタンスの増減現象の利用可能性について考察した。本現象では、空間電荷効果によって生じる電流密度の非一様性が大きい場合に位相空間における自己線形化力が大きくなる。このとき、エミッタンス極小値の位置は陰極近傍となる。また、本現象におけるエミッタンスの極小値の位置は、電子銃の規格化パービアンスに依存する。規格化パービアンスが小さい場合、陰極上での空間電荷効果は大きくなり、エミッタンスを減少させる自己線形化力が大きくなるため、陰極近傍でエミッタンスの極小点を取る。また、極小値でのエミッタンスの位置は陰極径に依存しないことが明らかとなった。以上のことから、エミッタンスの極小値の位置は制御可能であることを示した。本現象を理解し、活用した極低エミッタンス電子銃の設計が期待される。

6. 謝辞

本研究を進める上で、沖縄科学技術大学院大学 新竹積教授、理化学研究所 Spring-8 センターの渡川和晃氏におかれましては、SCSS の電子銃の数値シミュレーションにおいて、ジオメトリデータをご提供いただきました。深く感謝いたします。本研究は JSPS 科学研究費助成事業 (挑戦的萌芽研究) 26600141 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Karassilnikov, et al. Proceedings of PAC 2001, WPAH071 (2001).
- [2] R.Cee, et al., Nucl. Instr. and Methods Phys. A 483, 321-325 (2002).
- [3] K. Kasamsook, et al., Proceedings of FEL, THPPH042 (2006).
- [4] Z. Huang, et al., Nucl. Instr. and Methods Phys. A 593, 148-151, (2008).
- [5] I. Bazarov, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 100703 (2008).
- [6] A. Mizuno, et al., Nucl. Instr. and Methods Phys. A 774, 51-59, (2015).
- [7] K. Masuda: Ph.D Thesis, Dept. of Engineering, Kyoto Univ. (1998).
- [8] 増田開, 高輝度電子銃シミュレーション研究会 (2006) <http://acc-web.spring8.or.jp/~workshop/e-gun/presentation/Masuda.pdf>
- [9] K. Togawa, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 020703 (2007).