

Emittance Measurement of a DC Gun for Smith-Purcell Backward Wave Oscillator FEL

Kenichi Nanbu, Masayuki Kawai, Kittipong Kasamsook, Akira Kurihara, Yoshinobu Shibasaki, Shigenobu Takahashi, Hiroyuki Hama, Fujio Hinode, Mafuyu Yasuda
Tohoku University Laboratory of Nuclear Science
1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi, 982-0826

Abstract

A Terahertz light source using Smith-Purcell Backward Wave Oscillator FEL(S-P BWO-FEL) has been studied at Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University. The DC gun employs a high voltage of 50 kV to extract electrons, which is suitable to drive S-P BWO-FEL. A numerical simulation using a 3-D finite difference time domain (FDTD) method implies the S-P BWO-FEL oscillation at the terahertz wavelength region. Emittance measurement has been performed by means of the double slit method. The deduced normalized rms emittance is about $2\pi\text{mm mrad}$. We will present the result of emittance measurement and analysis results.

スミス - パーセルBWO-FELのためのDC電子銃からの ビームのエミッタンス測定

1. はじめに

波長 $300\mu\text{m}$ 近傍の電磁波はテラヘルツ光と呼ばれ生体高分子解析やイメージング、分光などへの応用が期待されている。テラヘルツ光源としてはレーザーを用いたものと加速器を用いたものがあり我々は加速器ベースであるスミスーパーセル後進波自由電子レーザー(スミスーパーセルBWO-FEL)を用いた高強度のテラヘルツ光源の研究開発を行っている[1]。

3次元シミュレーションからビームエネルギーが 50keV 程度、規格化エミッタンス $1\pi\text{mm mrad}$ 以下の電子ビームを用いた場合、テラヘルツ帯域のスミスーパーセルBWO-FEL発振が予測されている。

ここではテラヘルツ帯域のスミスーパーセルBWO-FELを駆動するための電子銃のビームエミッタンス測定結果について報告する。

2. スミスーパーセルBWO FEL駆動用電子銃

導電性グレーティング表面付近のエバネッセント波と電子ビームとの相互作用によるスミスーパーセルBWO-FELの特性を3次元シミュレーションにより明らかにした[2]。図1のようなグレーティングを仮定すると、FEL発振に必要なビームパラメータは、ビームエネルギーが 50keV 程度、ビーム電流は 100mA 以上、規格化エミッタンス $1\pi\text{mm mrad}$ 以下であることが明らかになった。これらのビームパラメータを満足するために開発した電子銃は熱エミッタンスを小さくするため小径陰極を採用し、エミッタンス増大の原因となるグリッド構造を持たず、ウェネルト電極と陰極間にバイアス電圧を印加し陰極近傍の電位面を補正し線形な空間電荷効果を持つ電子分布 (Kapchinskij-Vladimirskijビーム) を得ることが出来るなどの特徴を持つ[3]。表1に電子銃の仕様を示し、図2に電子銃の構造を示す。

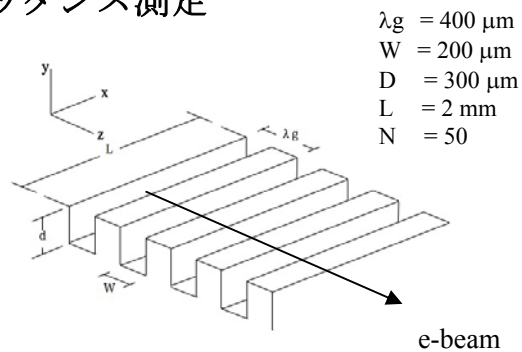


図1 グレーティングのシミュレーションモデル

表1 電子銃の仕様

ビームエネルギー	50keV(MAX)
ビーム電流	>300mA
パルス幅(FWHM)	1-5μsec
繰返し	300pps(Max)
規格化エミッタンス	<1πmm mrad

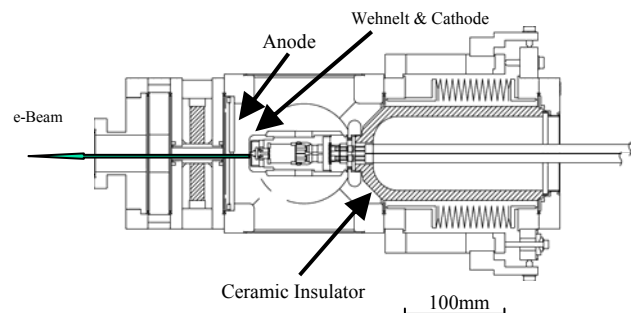


図2 低エミッタンスDC電子銃の断面図

3. エミッタンス測定

3.1 ダブルスリット法

電子ビームのエミッタンス測定にはダブルスリット法を用いた。図3に測定原理を示す。ビームライン上に設置したスリットで電子ビームを切り出す。ビーム全領域の電流分布を測定することで上流側スリット位置での電子ビームの位相空間分布を得ることが出来る。我々のエミッタンス測定装置では、上流側のスリットは陰極から190mmの位置に設置した。下流側のスリットは、上流側のスリットから142mmの位置とした。ビーム電流は最下流に設置したファラデーカップで測定する。スリット幅は上流、下流ともに100 μm で材質は厚み100 μm のタングステン板である。

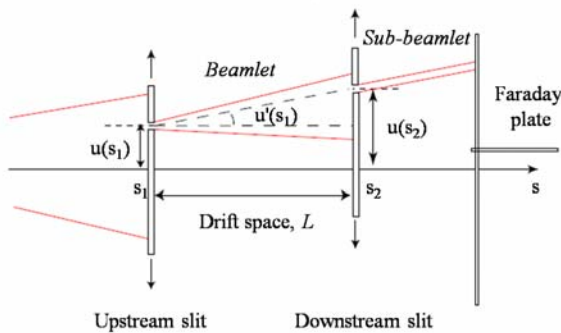


図3 ダブルスリット測定法の原理

測定により得られた電流分布を(1)式に代入することでエミッタンスを算出することが出来る。

$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{\langle u^2 \rangle \langle u'^2 \rangle - \langle uu' \rangle^2} \quad (1)$$

ここで $\langle u^2 \rangle$, $\langle u'^2 \rangle$, $\langle uu' \rangle^2$ は電流密度の重みをつけた二乗平均である。

我々のエミッタンス測定装置ではスリット間の自由空間の距離は142mmであるのでスリットの構造と自由空間長より、位置分解能は0.1mm、角度広がり分解能は1.41mradとなる。

4. 測定結果

4.1 エミッタンス測定

ビームエネルギー50KeV, ビーム電流300mA時のXエミッタンス測定結果を図4.1にYエミッタンス測定結果を図4.2に示す。スリットのスキャンステップは水平、垂直共に100 μm である。

図4.1、図4.2から本来ビームが存在しない領域にもノイズが検出されていることがわかる。この本来ビームが存在しない領域での信号の原因として高圧電源のスイッチングに伴う測定系のグラウンド電位の変動によるものとスリットと真空ダクトの間隙を通過した電子ビームによるものと考えられる。

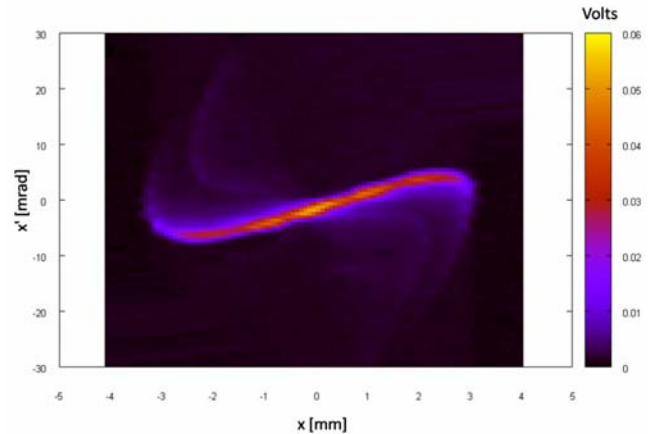


図4.1 ビーム電流300mAのときのダブルスリット法によるX位相空間分布

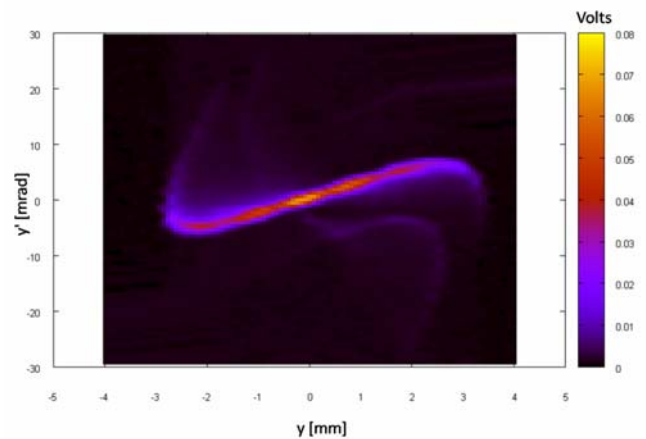


図4.2 ビーム電流300mAのときのダブルスリット法によるY位相空間分布

4.2 エミッタンス解析

規格化エミッタンスの値はバックグラウンドノイズに強く影響を受けるため注意深く解析する必要がある。ノイズをビームによる信号として解析してしまうと、真の値よりも大きなエミッタンスが算出されてしまう。そこでノイズによるエミッタンスの増大を見積もった。

最初にバックグラウンドを差し引いた全電荷量を基準とし(100%エミッタンス)その電荷量を基準として閾値を設けてノイズをカットした(%エミッタンス)を10%毎に求める。図4.3と図4.4に電荷のカットレベルに対するエミッタンスの変化を示す。

カットレベル0%から50%までの領域はノイズによりエミッタンスが大きくなっているため真のエミッタンスとすることは出来ない。カットした電荷の中には正しい信号も含まれているため直ちに50%エミッタンスを真のエミッタンスとすることは出来ない。電荷をカットしていない真のエミッタンスの値を得るためにノイズの影響がないカットレベル50%から100%の領域において一次関数でフィッティングし、電荷量をカットしていない点でのエミッタンスを求めた。この方法で求めたエミッタンスは上限値であり真のエミッタンスよりは大きくなる[4]。

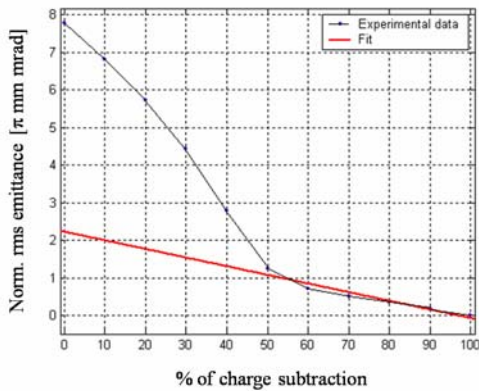


図4.3 カットレベルに対する水平方向の規格化エミッタンスの変化

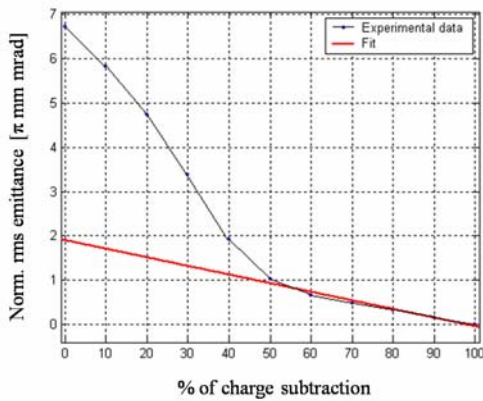


図4.4 カットレベルに対する垂直方向の規格化エミッタンスの変化

エミッタンス解析結果を表2に示す。水平方向 2.26 ± 0.07 [π mm mrad]、垂直方向 1.858 ± 0.05 [π mm mrad]と非常に小さなエミッタンスであることがわかった。図4.5に水平方向60%エミッタンスの位相空間分布を示す。位相空間のテール部分はフォーカスコイルの非線形成分であると考えられる。

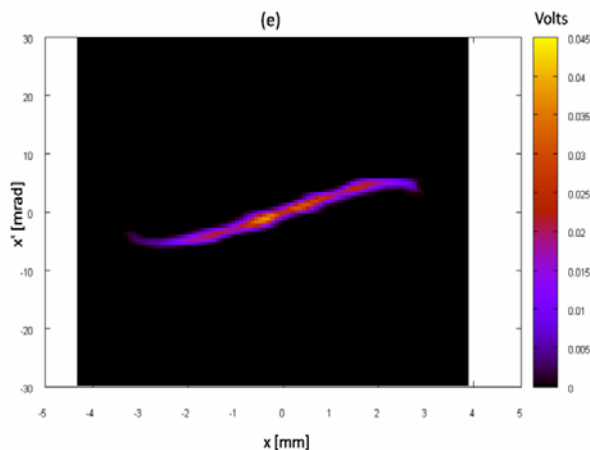


図4.5 60%エミッタンスのX位相空間分布

表2 ビーム電流300mAのときのダブルスリット法によるエミッタンス測定結果

Experimental time	Normalize rms emittance [π mm mrad]	
	X-emittance	Y-emittance
1 st	2.35	1.81
2 nd	2.23	1.90
3 rd	2.22	1.87
Average value	2.27	1.86
Error	± 0.07	± 0.05

5. まとめ

スミスーパーセルBWO-FEL駆動用の電子銃の開発を行っている。1 π mm mrad以下の規格化エミッタンスを実現するため陰極を小型化し、グリッドがない構造で陰極とウェネルト間にバイアス電圧を印加し位相空間を制御できる構造とした。

ダブルスリット法により陰極から190mmのスリット位置でのエミッタンスを測定した。結果、水平方向 2.27 ± 0.07 [π mm mrad]、垂直方向 1.86 ± 0.05 [π mm mrad]以下であることが確認できた。シミュレーションでは同条件で1.38 π mm mradであり、ほぼ同等の値が得られている。開発した電子銃はスミスーパーセルBWO-FEL用電子源として十分な性能を有していると考えている。現在ビーム輸送系の検討を行っている。

参考文献

- [1] K.Kasamsook, et al., "DEVELOPMENT OF A LOW EMITTANCE DC GUN FOR SMITH-PURCELL BWO FEL", Proc. FEL2007, Novosibirsk, Russia (2007) pp417-420.
- [2] H.Hama, et al., "DEVELOPMENT OF LOW EMITTANCE DC-GUN AND 3D-SIMULATION OF SMITH-PURCELL BACKWARD-WAVE OSILLATOR FEL", Proc. 第13回FELとHigh-Power Radiation研究会, 京大宇治キャンパス木質ホール (2007) pp7-9.
- [3] K. Kasamsook et al., "A Compact Low Emittance DC Gun Employing Single Crystal Cathode of LaB₆", FEL2006, Berlin, Germany (2006) pp.680-683.
- [4] 秋山和士, Master thesis, Tohoku University, (2008).