

RESULT OF EMITTANCE MEASUREMENT ON THE CeB₆ GUN AND APPLICATION TO Xray-FEL

K.Togawa^{1A)}, T.Shintake^{A)}, T.Tanaka^{A)}, H.Baba^{A)}, T.Inagaki^{A)}, H.Matsumoto^{B)}

^{A)} RIKEN Harima Institute

1-1-1 Kouto, Mikazuki, Sayo, Hyogo, 679-5148

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

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A 500 kV pulsed electron gun has been constructed for the injector system of the SASE-FEL project at SPring-8. A CeB₆ single-crystal was chosen as a thermionic cathode because of its superior emission properties. Last year, we have succeeded in producing a 500 keV beam with 1 A peak current and 3 μsec FWHM. The beam was very stable with low jitter. The transverse emittance has been measured by means of double-slits method. The normalized rms emittance was 1.1π mm.mrad. We report on the result of the emittance measurement on the CeB₆ gun and discuss the application to X-ray FEL.

CeB₆電子銃のエミッタンス測定結果とX線FELへの応用について

1. はじめに

理化学研究所・播磨研究所では、オングストローム領域のX線自由電子レーザー（X線FEL）施設に要求される加速器技術を実証するために、その前段階となる軟X線FEL計画（SCSS計画、SCSSはSPring-8 Compact SASE Sourceの略）を進めている^[1]。

SASE-FELの理論から、FELゲインを飽和領域まで引き上げるためには、エミッタンスが極めて小さく、かつ、ピーク電流の高い電子ビームが要求される。一方、将来のユーザー利用を念頭に置いた場合、「ビームの安定性」が最重要課題となるため、ビームの初期条件を決める電子銃は絶対に安定なものでなければならない。これらの条件を両立するために、SCSS計画ではCeB₆単結晶を熱カソードに用いた高電圧パルス電子銃の方式を採用し、その開発研究を行っている^[2]。

本論文では、最近得られたCeB₆電子銃のエミッタンス測定実験の結果とX線FELへの応用の可能性について述べる。

2. CeB₆電子銃

電子銃のエミッタンス初期値はカソード径に大きく依存する。低エミッタンスを実現するためには小さいカソードが必要で、我々は直径3 mmのCeB₆単結晶を用いた。熱エミッタンスの理論値は温度1450°Cで0.4π mm.mrad (rms)である。

図1に新しく開発したカソードアセンブリを示す。CeB₆カソードは、円筒型のグラファイトヒーターが放つ輻射熱によって加熱される。最初のモデルでは、高熱負荷のため、アルミナセラミックが破損したり、銅製電流導入端子が融解するトラブルが

発生した。そこで、ヒーターを小型化して外部への熱輻射を低減し、さらに、熱衝撃に強い窒化ケイ素製のセラミックベースや高融点のモリブデン製電流導入端子を導入するなどの改良を加えることで、トラブルを克服した。CeB₆の温度は、これ保持しているグラファイトスリーブの放射温度から、約1400°Cであると推定している。現在まで4000時間以上の連続加熱を行っているが、一度も故障を起こしていない。



図1 : CeB₆カソードアセンブリ

次に、電子銃システムとエミッタンスモニターを図2に示す。空間電荷によるエミッタンス増加を抑制するためには電子銃の印加電圧はより高いほうが良い。そこで、技術的に達成可能と考えられる500 kV（パルス）に設定した。C-bandクライストロン用変調器電源を高電圧パルス発生源に使い、これより発生した1次パルスをパルストランスによって500 kVに昇圧して電子銃カソードに印加する。絶縁破壊のトラブルを回避するために、全ての高電圧部品を絶縁オイルタンクの中に収納している。

電子銃の電圧波形と生成した電子ビームの電流波形を図3に示す。電流波形は電子銃出口の直後に取り付けたCTモニターによって測定した。フラット

¹ E-mail: togawa@spring8.or.jp

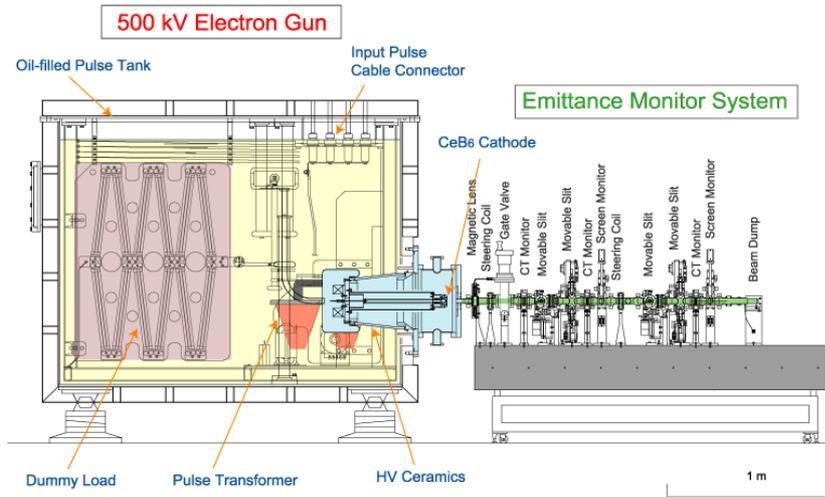


図2：電子銃システムとエミッタンスモニター

トップ (~0.8 μsec) のビームエネルギーは500 keV、ビーム電流は1 Aである。SCSS加速器では、ビームディフレクターを用いてフラットトップから~1 nsecのシングルバンチを切り出して使用する。

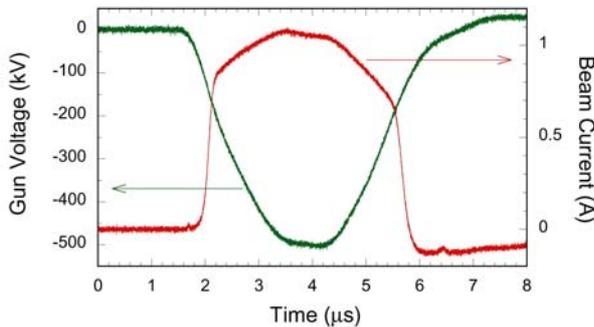


図3：電子銃の電圧波形とビーム電流波形

3. エミッタンス測定

電子ビームのエミッタンスはダブルスリット方式で測定した。図4に測定原理を示す。まず、上流側スリットによって、円形ビームからシート状のビームレットを切り出す。ビームレットは、続くドリフト空間を進む間に、横方向の熱運動および空間電荷による反発力によって広がる。下流側スリットをスキャンしてビームレットの強度分布を測定することで、ビームの広がり角分布を求める。この測定をビームの全領域に渡って行くと、上流スリット位置におけるビームの位相空間分布を得ることができる。

我々のエミッタンスモニターでは、水平方向 (x方向) 1組、垂直方向 (y方向) 1組の計4台の可動スリットを用意した。上流側の水平スリットはカソードから50 cm下流に配置した。ドリフト空間の長さは60 cmである。x, yスリットの組み合わせにより、ビームプロファイルを測定することもできる。

CTモニター (CT2) とデジタルスコープにより測定した、サブビームレットの電流波形データを計算機に取り込み、各時間に対して位相空間分布を再構成することで、エミッタンスの時間変化、すなわち

Slice Emittanceを測定することができる。今回の測定では、デジタルスコープのADCで発生するノイズを除去するために、ビームのフラットトップ領域の100 nsec分のデータを平均化して位相空間分布を求めた。

正確にエミッタンスを評価するためには、上流側スリットの開口幅を狭くして、空間電荷によるビームレットの広がりを抑えなければならない。しかし、開口幅が狭すぎると、ビームレットの電流値が小さくなってシグナル波形のS/N比が悪くなりエミッタンスの測定精度を悪くしてしまう。図5に上流側のスリット幅25, 50, 100, 200 μm に対して測定したビームレットの強度分布を示す。測定時のビームエネルギーは400 keV、ピーク電流値は0.9 Aである。精密測定のために下流側のスリット幅は25 μm に設定した。スリット幅を100 μm 以下に狭めると、ビームレットの強度分布は熱運動から予測されるガウス分布に近づいてくることが分かる。これより、我々のビーム条件では、スリットの開口幅を50 μm 程度まで狭く設定する必要があることが分かった。

測定時のビームエネルギーは400 keV、ピーク電流値は0.9 Aである。精密測定のために下流側のスリット幅は25 μm に設定した。スリット幅を100 μm 以下に狭めると、ビームレットの強度分布は熱運動から予測されるガウス分布に近づいてくることが分かる。これより、我々のビーム条件では、スリットの開口幅を50 μm 程度まで狭く設定する必要があることが分かった。

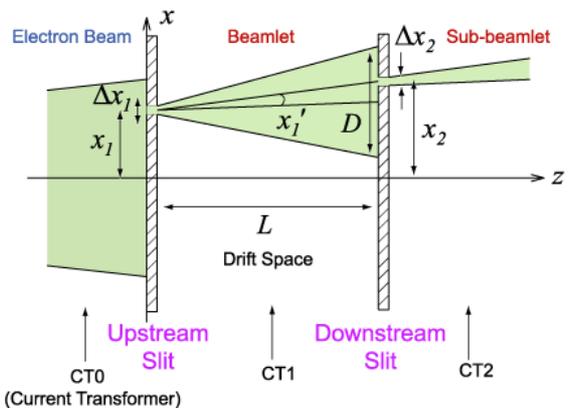


図4：ダブルスリットによるエミッタンス測定原理

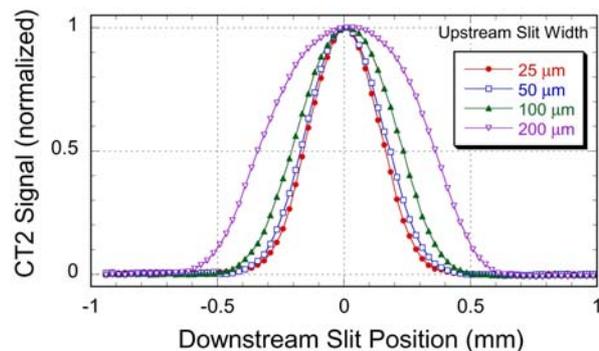


図5：スリットの開口幅を変えたときのビームレットの強度分布の変化

4. 実験結果

まず、上流のx, yスリットを用いて図3に示したエネルギー500 keV、ピーク電流1 Aのビームプロファイルを測定した。図6にビーム電流密度の3次元プロットを示す。スリットの開口幅とスキャンステップはx, y共に0.5 mmとした。平坦なカソード形状から予想されるように、かなりフラットトップに近いプロファイルが得られていることが分かる。ビーム直径は5.6 mm (FWHM)である。

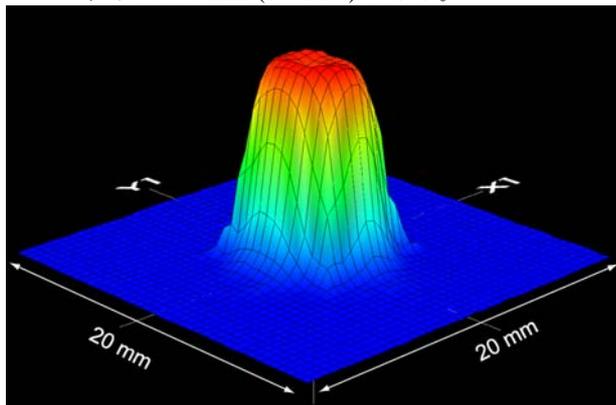


図6 : 500 keV, 1 Aビームの電流密度分布

次に、同じビームパラメータに対して測定した位相空間分布(x方向)を図7に示す。スリットの開口幅は上流、下流とも50 μmに設定し、スキャンステップは上流スリットを0.25 mm、下流スリットを0.1 mmとした。

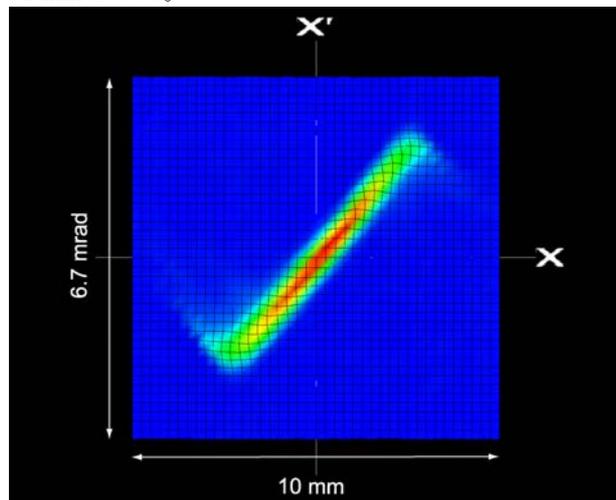


図7 : 500 keV, 1 Aビームの位相空間分布

この位相空間分布図から、次式で定義される規格化rmsエミッタンスを解析した。

$$\varepsilon_{n,rms} = \beta\gamma\sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

ここで、 $\langle x^2 \rangle$, $\langle x'^2 \rangle$, $\langle xx' \rangle$ は電流密度の重みを付けた2乗平均値を表す。rmsエミッタンスはバックグラウンドノイズ非常に敏感であるため、解析には注意を要する。つまり、本来ビームが存在しない領域の

ノイズ信号をビーム信号として解析すると、真の値より大きいエミッタンスが算出されてしまう。我々のシステムではノイズレベル (3σ) はピーク信号の約1%であった。ノイズの影響を削除するために、ノイズレベル以下の信号をカットしてエミッタンス解析を行った。最後に、ノイズに埋もれてカットされた小さいビーム信号がエミッタンス値に与える寄与 (約10%) を補正した結果、規格化エミッタンスは 1.1π mm.mrad (rms)となった。

5. X線FELへの応用

今回の実験により、CeB₆電子銃から極めて小さいエミッタンスを持つ電子ビームを生成できることが実証できた。しかし、熱エミッタンスの理論値とは2、3倍の食い違いが見られる。これは、位相空間分布の両端に現れた僅かなテイル成分が要因である。空間電荷の影響で生じたものであると推定しているが、実用的には興味の対象外で、コリメータによって取り除くことは十分可能である。テイル成分を除いたエミッタンスを、ビーム中心における x' の平均値 ($\sigma_{x'}$) とビーム半径の平均値 ($r/2$) から算定すると、 0.6π mm.mradとなり、熱エミッタンスの理論値をほぼ再現する。

一般に、SASE-FELにおいて問題となるエミッタンスは、X線と電子ビームがアンジュレーターの中で相互作用するCooperation Length (数μm程度)の中でのSlice Emittanceである。一方、インジェクターにおけるバンチ圧縮過程において増大するのは、バンチ全長に渡って投影したProjected Emittanceであり、断熱的にバンチ圧縮を行えばSlice Emittanceを保存することは可能であると考えられる。今回測定したエミッタンスは、このSlice Emittanceに相当するものである。

CeB₆電子銃は、X線FEL用電子銃として十分な可能性を持つものと考えている。本年度は、電子銃に続いてバンチを形成するビームディフレクターおよびサブハーモニックバンチャーの開発を行い、バンチ化した電子ビームのエミッタンス測定を行うことを計画している。

6. 謝辞

本研究を行う上で、理化学研究所の尾上和之氏、SPRING-8ビームライングループの大端通氏には惜しまない協力を頂きました。ここで感謝いたします。

参考文献

- [1] 新竹 積, 「SPRING-8 SCSS計画 (X線FEL技術開発)の現状」, 本研究会プロシーディングス
- [2] 渡川和晃 他, 「SPRING-8軟X線自由電子レーザー計画に用いるCeB₆電子銃の開発」, 第28回リニアック技術研究会, 東海村, 2003年