

BEAM DEFLECTOR SYSTEM TO GENERATE A LOW-EMITTANCE SHORT ELECTRON BUNCH

Kazuaki Togawa^{1,A)}, Tsumoru Shintake^{A)}, Yuji Otake^{A)}, Koujiro Kase^{A,B)}, Atsushi Higashiya^{A)}
^{A)} RIKEN / SPring-8
 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan
^{B)} TOYAMA Co.,Ltd.
 4-13-16 Hibarigaoka, Zama, Kanagawa 228-0003, Japan

Abstract

In the SCSS prototype accelerator for the X-ray free-electron laser project at SPring-8, a CeB₆ thermionic gun is used to generate a 500 keV low-emittance electron beam. In order to make a short electron bunch (1 A peak current and 1 ns width) from a micro-second long pulse just generated by the CeB₆ gun, we have developed a beam deflector system. It consists of a fast high-voltage pulser, a deflector chamber with parallel electrodes, a bending magnet, and a beam collimator. They were designed and constructed not to deteriorate the low beam-emittance. This system is routinely operating in the SCSS prototype accelerator.

低エミッタンス・短バンチ電子ビーム生成のための ビームディフレクタの開発

1. はじめに

理化学研究所および高輝度光科学研究センターは、本年度より X線自由電子レーザー (XFEL) 研究施設の建設を開始した。昨年度、そのプロトタイプであるSCSS試験加速器 (エネルギー250 MeV) を建設し、今年の6月、波長49 nmのレーザー光の増幅に成功した。

XFELでは、極めて小さいエミッタンスの電子ビームを、長期間安定に供給することが要求されることから、我々は単結晶CeB₆を熱カソードに使った500 kVパルス電子銃を開発し、ピーク電流1 A、規格化エミッタンス 1.1π mm mradの電子ビームを得ることに成功していた[1]。但し、生成される電子ビームのパルス長が2 μ sと長い為、加速器に入射する前に1 nsの単バンチを切り出す必要がある。通常の電子銃では、カソード前面に取り付けたコントロールグリッドを用いて単バンチを生成するが、これはビームエミッタンスを悪化させる要因になってしまう。そこで我々は、500 keVの長パルスビームを発生した直後に、ディフレクタとコリメータを用いて単バンチを切り出す方式を採用した。図1にビームディフレクタの原理図および外観写真を示す。

偏向電磁石は常時動作させ、ビームを軌道から外して下方向にダンプさせる。ディフレクタは50 Ω ストリップラインを形成する電極板により構成される。高速パルサーで生成した矩形波 (パルス幅2 ns、波高3.3 kV) を、長パルスビームの中心が電極板を通過するタイミングで電極板に印加してビームを軌道軸に振り戻し、単バンチ (バンチ幅1 ns) を生成する。

Beam Deflector of Electron Injector for X-FEL

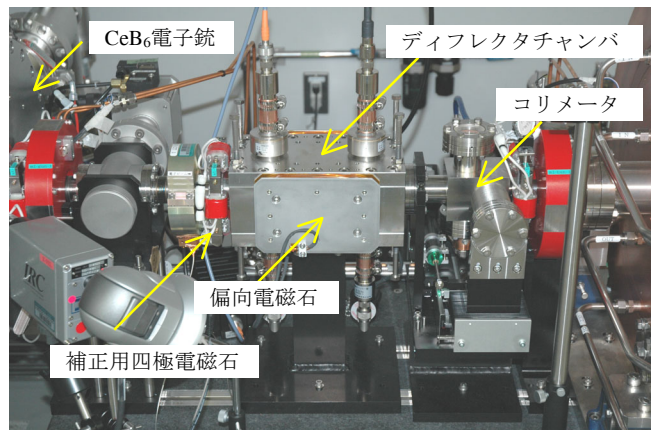
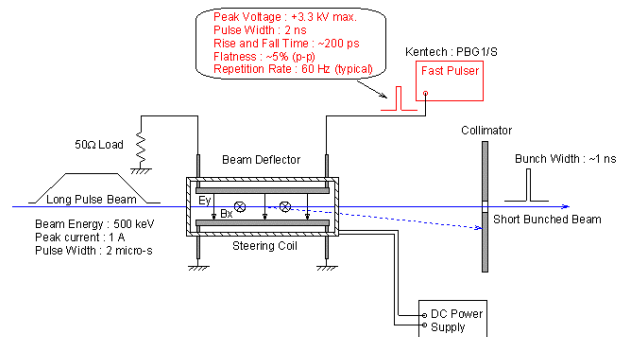


図1 : ビームディフレクタの原理図と外観写真

¹ E-mail: togawa@spring8.or.jp

2. ディフレクタの設計、製作

高電圧パルス印加する電極板の設計には、次の2点に注意を払った。1) 高速パルスを透過するために50Ωストリップラインを形成すること。2) ビームエミッタンスを悪化させないよう、ビーム軌道上に一樣な電場を生成すること。

電場の解析には計算機コードPOISSONを使用した。図2に等ポテンシャル線を描かせた電極板の断面図を示す。電極板のギャップはビームダクトの内径に合わせて20mmとした。電極板の幅は、ビーム軸近傍の電場が出来る限り均一になるよう46mmと広くし、エッジ部分を中心に向かって折り込んだ形状とした。電極板とチャンバーとの間隔は、上部の電極板のインピーダンスが50Ωとなるようにサイズを決定した。

ディフレクター領域のビーム径がΦ5mmであることから、ビームをシャープに切り出すためには、ビームコリメータにおける垂直方向のビームの変位量は10mm以上必要であると推測される。高速パルサーの電圧が数kVであることから、500keVビームを10mm以上変位させるために、電極板のビーム軸方向の長さを150mm、電極板の後端からビームコリメータまでの距離を150mmとした。

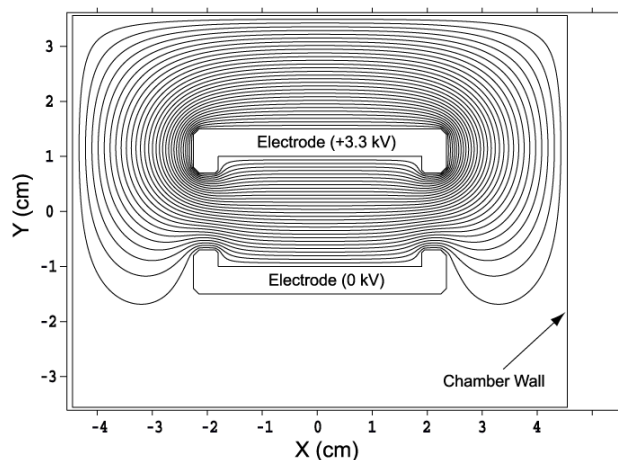


図2：ディフレクタ電極の断面図と等ポテンシャル線

図3に、ディフレクタを通過した平行ビームの位相空間分布の計算値を示す。ビームの直径はΦ5mmとし、熱エミッタンスはゼロと仮定した。この計算により、エミッタンスの増加は0.03π mm mradと十分無視できる値であることが分かった。しかし、位相空間分布の傾きから、水平方向に対しては収束、垂直方向に対しては発散、即ち、四極電磁石と同様な効果があることが分かる。これは、電極間の電場分布が完全に一樣になっておらず、若干湾曲していることが原因である。設計時には気付かなかったが、この効果によりビームが大きく扁平することがコミショニングにおいて判明した。この対策として、ディフレクタの直前に設置していたステアリング電磁石の配線を変えて四極電磁石として働かせ、ディフレクタの電場による四極成分を打ち消すようにした。

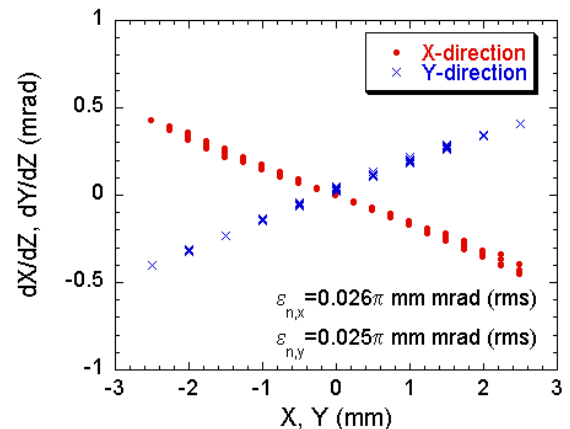


図3：ディフレクタを通過したビームの位相空間分布 (計算値)

ディフレクタの製作は榊トヤマが行った。製作時に特に注意を払ったのが、電極板の平行度である。高速パルスは、20Dフィードスルー（榊日本高周波、特注品）を通して電極板に送られるのであるが、電極板はフィードスルーの芯線により支持される。電極板が平行に設置されないと、電場分布に歪みが生じ、エミッタンスを悪化させてしまう。位相空間分布の計算により、電極板のロール角の平行度を3mrad以内にすればエミッタンスの増加を0.1π mm mrad以内に抑えられることが分かった。従って、この条件を満たすよう、フィードスルーの溶接、電極板の設置は特に慎重に行った。

3. 高速パルサーとビーム軌道

高速パルサーはKentech社のPBG1/Sを使用した。パルス波高は+3.3kV、パルス幅~2ns、パルス立ち上がり~200psである。この高速パルスは進行波として電極板に沿ってビーム軸を逆行しながら電子ビームと相互作用する。

ビームの垂直方向の角度の時間変化は次式で表される。

$$\frac{dy}{dz} = -\frac{e}{\beta\gamma m_e c} \left\{ \frac{(1+\beta)^{T+L/\beta c}}{d} \int_T^{T+L/\beta c} V(t+z/c) dt - \int B_x dz \right\}$$

ここで、 $\beta=v/c$ 、 γ :ローレンツ因子、 d :電極ギャップ、 $V(t+z/c)$:パルス電圧、 B_x :偏向磁場、 L :電極板の長さ、 T :電子が電極板に入射する時刻である。 dy/dz がゼロになる時にビームがコリメータを通過するので、この時間間隔が短バンチビームのバンチ幅を決める。下方へ偏向したビームをビーム軸に振り戻す立上り時間は、パルス電圧が電極板を通過する時間 (L/c) とビームが通過する時間 (L/v_e) の和で決まり、約1nsを要する。従って、1nsのバンチビームを形成するには、高速パルスの幅は2nsを必要とする。

図4にディフレクタを通過した高速パルスの波形と、この波形から上式を用いて計算したビーム角度

の時間変化を示す。ビーム角度がゼロのフラットトップ領域（約1 ns幅）が形成されていることが分かる。ここで重要なことは、高速パルスの電圧はフラットトップ部で±4.4%変動しているが、ビーム角度は電圧の時間積分で決められるため、その変化量が大幅に低減されることである。実際、図4から分かるようにビーム角度の時間変化は緩やかであり、変化量も±0.16 mrad以内に収まっていることから、バンチビーム内のスライスエミッタンスは殆ど悪化しないことが予想される。

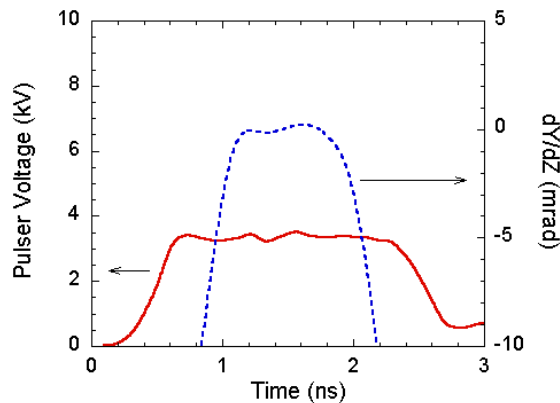


図4：ディフレクタを通過した高速パルスの波形（実測値）とビーム角度の時間変化（計算値）

4. ビームコリメータ

一般に、空間電荷が支配的な低エネルギー領域のビーム軌道を正確に予想することは非常に難しい。従って、ディフレクタにおける最適なビーム径に対応できるように、コリメータの穴径はΦ10 mm、Φ7 mm、Φ5 mm、Φ4 mm、Φ3 mmの5種類を用意した。電子衝撃に強いモリブデンの長板にこれらの穴を開け、水平方向にスライドして、目的の穴径を使用できる構造とした。

電子銃で生成したビームの外輪にはビームのエミッタンス値を大きくするハロー成分が存在することが電子銃テストスタンドのエミッタンス測定で明らかになっていた[1]。コリメータの穴径を実際のビーム径より小さく設定することで、ハードエッジを持つ低エミッタンスビームが生成できると期待できる。通常、穴径はΦ5 mmを使用している。

5. ビーム性能試験

SCSS試験加速器において、ディフレクタで切り出した短バンチビームの性能測定を行った。測定時には、サブハーモニックバンチャー等のRF系は全てオフにした。

まず、電子銃から3.5 m 下流に設置したスクリーンモニター（アルミナ蛍光板、 $t=0.1$ mm）を用いて、ビームプロファイルを測定した。図5に示す様に、補正用四極電磁石を用いることで、空間密度分布が均一な円形のビームが生成できることを確認した。

次に、短バンチビームの射影エミッタンスをスリットスキャン法により測定した。図6に再構成し

た水平方向の位相空間分布図を示す。XFELで重要なのは、位相空間の中心近傍の電子密度である。従って、エミッタンスを評価する場合は、ビームハローを除いたrmsエミッタンスを解析するのが適切である。全ビームの90%の電子で定義される“コア”エミッタンス（規格化、rms）を解析したところ1.1 π mm mradであった。この値の解釈であるが、1) 射影エミッタンスであるため、大きい角度を持つ短バンチの先頭と後尾の成分も含まれていること、2) スリットの開口幅が0.1 mmと比較的広く、切り出したビームレットの広がり空間電荷により増長された可能性があること、3) ビームレットのサイズ測定にアルミナ蛍光板を用いたため、プロファイルが滲んでビームレットの広がり実際より大きく測定されている可能性があること、から実際のスライスエミッタンスはこれより小さい値であると考えている。

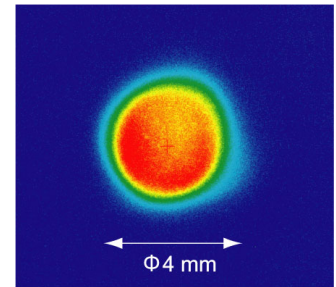


図5：アルミナ蛍光板で測定した短バンチビームのプロファイル

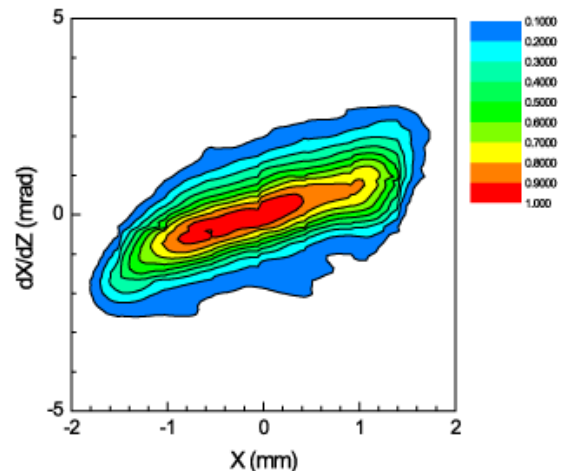


図6：スリットスキャン法で測定した、短バンチビームの位相空間分布図（水平方向）

6. 謝辞

本研究を行う上で、小林利明氏（JASRI）にはディフレクタシステムの全般に渡って有意義な助言を頂きました。また、清家隆光氏（JASRI）には偏向電磁石の製作と磁場測定をしていただきました。田中均氏（JASRI）、原徹氏（理研）、谷川貴紀氏（兵庫県立大学）にはビーム性能試験において多大なご協力を頂きました。ここで感謝いたします。

参考文献

[1] K. Togawa, et al., Proceedings of APAC2004, Gyeongju, Korea, March 22-26, 2004, p.158-160