

ハローモニタを用いた垂直ビームプロファイルの測定

MEASUREMENT OF VERTICAL BEAM PROFILE USING HALO MONITOR

大島隆^{#, A)}, 前坂比呂和^{A)}, 松原伸一^{B)}, 井上忍^{C)}, 大竹雄次^{A)}

Takashi Ohshima^{#, A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Shin-ichi Matsubara^{B)}, Shinobu Inoue^{C)}, Yuji Otake^{A)}

^{A)} RIKEN Spring-8 Center XFEL Division

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Institute, XFEL Division

^{C)} SPring-8 Service co. Ltd.

Abstract

Irradiation of 4×10^{14} high energy electrons to the permanent magnets of an undulator results in reduction of a magnetic field of 1 %, which degrades the performance of the XFEL. To reduce the demagnetization within 1 % after an operation time of 10 years under the conditions of a 7000 hours/year net operation time at a repetition rate of 60 pps, the irradiation dose should be less than 4 femto Coulomb (fC) per shot. To monitor the halo component of the electron beam, a halo monitor was installed in a BL3 undulator line at SACLA. We measured a vertical electron-beam profile with a wide dynamic range of ten to the seventh by combining a screen monitor and a halo monitor. The measured full width at 1/10000 of the peak amplitude of the vertical profile was 1.1 mm.

1. はじめに

Spring-8 Angstrom Compact LAsEr (SACLA)は X 線領域での SASE 発振を実現し、高輝度短パルス X 線を用いて原子の 2 光子吸収など非線形過程の観測、非結晶タンパク質の構造解析など様々な実験を行うための施設である[1]。長期にわたって安定にレーザーを供給するためにはレーザー発生に使用されるアンジュレータの永久磁石の磁場が一定であることが必要である。しかし、永久磁石は 4×10^{14} 個の高エネルギー電子ビームの照射によって 1%の磁力の低下が起こることが報告されている[2]。SACLA の 8 GeV 電子ビームは円形のプロファイルを持ち、この主ビーム（コア成分）の周辺にはビーム広がり（ハロー成分）を持つことが考えられる。例えば年間 7000 時間、60 pps の運転を 10 年間続けた場合、ハローの電子数を 4×10^{14} 個以下に抑えるためには、1 ショット当たりの電子照射量を 4 fC 以下に抑える必要がある。このハローの強度を監視するため、SACLA のビームライン BL3 では、アンジュレータの上流部にハローモニタが設置されている[3]。この

モニタでは 0.3 mm 厚のダイヤモンドブレードにバイアス電圧を印加し、電子ビームが通過したときに発生する電子、正孔対の信号を検出している。今回、このハローモニタとスクリーンモニタを使って電子ビームの垂直方向のプロファイルの測定を行い、電子ビームの広がりについて広いダイナミックレンジでの測定を行った。本論文ではハローモニタの感度の校正、位置の校正および電子ビーム垂直方向のプロファイル測定の詳細について報告する。

2. ハロー信号の測定

2.1 ハローモニタの構成

SACLA で使用されているハローモニタは Figure 1 に示す構造となっている。このモニタでは 24mm 角の真空チェンバに、パルスモータによって駆動される上下可動式のダイヤモンドブレードが 2 組取り付けられている。0.3mm 厚のダイヤモンドブレードには水平方向に 10 mm、垂直方向 1 mm の幅の電極が表と裏に取り付けられている (Figure 2 参照)。この電極はブレード先端から 0.3mm の位置に取り付け

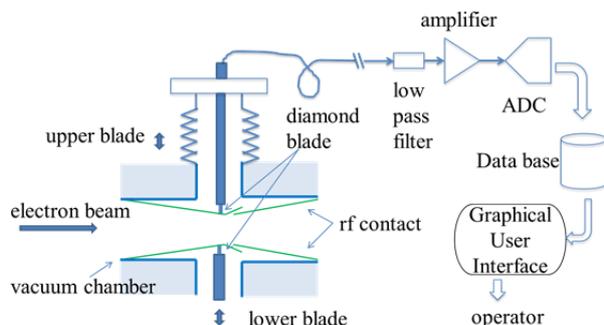


Figure 1: Configuration of the halo monitor.

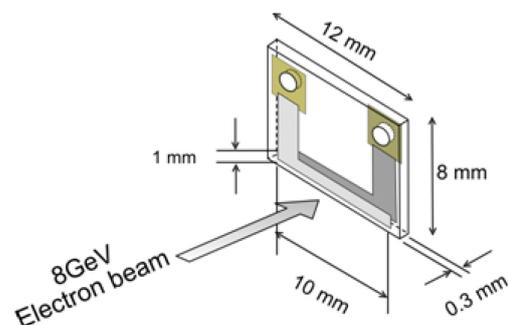


Figure 2: Structure of the diamond blade of the halo monitor.

[#] ohshima@spring8.or.jp

られている。ダイヤモンドの2つの電極間に 100 V のバイアス電圧を印加することによって、電子ビームが通過したときに発生する電子、正孔対の信号を検出している。検出した信号は約 20 m の長さの同軸ケーブルを通して加速器トンネル外に設置した信号処理装置まで伝送される。信号には電子ビームによって誘起される GHz 帯域の高周波信号成分が含まれるが、低域通過フィルタを通すことによって抑制される。フィルタされた信号は 30 dB の利得を持つ増幅器で増幅される。この信号は 16 bit の ADC に入力される。Figure 3 に ADC で測定した信号波形の例を示す。ダイヤモンドブレードからの信号の電荷量がブレードを通過した電子数に比例する。そのため、波形の 4.2 μ sec から 84ns の区間の ADC のデータの積分値を求めている。この値にはオフセットの影響が含まれているため、4.2 μ sec から手前 420ns の区間の ADC データからオフセットを求め、前記の積分値に対してオフセットの補正を行った値をデータベースに登録している。

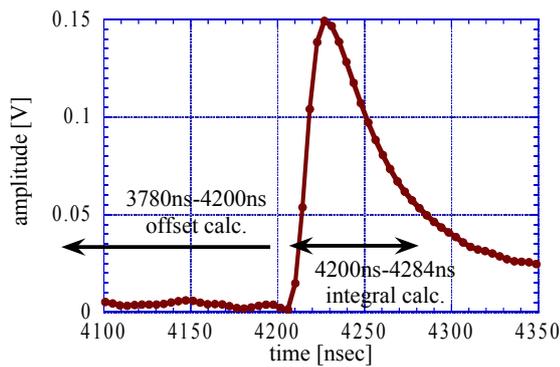


Figure 3: Waveform of the output signal from the halo monitor amplifier. The waveform was recorded by the ADC.

2.2 ハローモニタ信号の電荷量と位置の校正

ハローモニタの信号出力と電子ビームの電荷量との関係はハローモニタの近傍に設置された CT (BL3-0-1) の読み取り値を用いて調べた。ハローモニタの感度は非常に高いので電子ビームの電荷量を加速器の上流部 (BC1-2) のスリットの間隙を通常の使用値である 4.2 mm から 0.1 mm にまで閉じることにより減少させた。この時の電荷量を CT で測定する際に、感度を向上させるために CT 増幅器に取り付けられている 6 dB のアッテネータを取り外した。CT の電流量は別途ファラデーカップを用いた測定で換算係数を得ている。ビームを絞った状態の電子ビームの電流値は 3.2 pC であり、電荷量の揺らぎは rms 値で 10%程度であった。

ハローモニタでは fC の電荷量の測定を目標としているため、3.2 pC という電荷量でもまだ大きい。そのため、さらにハローモニタの利得を抑える必要がある。まず、増幅器の利得を 30 dB から 0 dB に変

更し出力振幅を 1/32 に減少させた。また、バイアス電圧とダイヤモンド検出器信号出力との関係は Figure 4 に示すようにほぼ比例することから、バイアス電圧を 100 V から 50V に下げることで利得を 1/2 に減少することができた。この2つの操作により、ハローモニタの信号利得を通常時の 1/63 にできた。

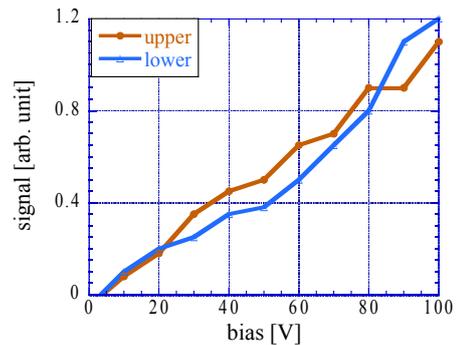


Figure 4: Output signal amplitude as a function of the bias voltage.

通常の電子ビームのコア部分のプロファイルはスクリーンモニタで計測でき、そのサイズは全幅 0.4 mm 程度以下であった。ハローモニタのブレードに取り付けられている電極の垂直方向の幅は 1 mm でありビームの垂直方向のサイズより大きいことから、ブレードを近づけた時に得られる信号は、電子ビームのプロファイルを積分した値に相当することとなる。

このことを踏まえ、ハローモニタの利得を下げた状態で、3.2 pC の電子ビームにダイヤモンド検出器を近づけていった。ダイヤモンドブレードの位置とモニタ出力との関係の測定結果を Figure 5 に示す。Upper blade の位置を 0 mm まで動かしたときに電子ビームからの信号が見られ始めた。さらにビームに近づけた結果、-0.4 mm でほぼ平坦な構造が見られ

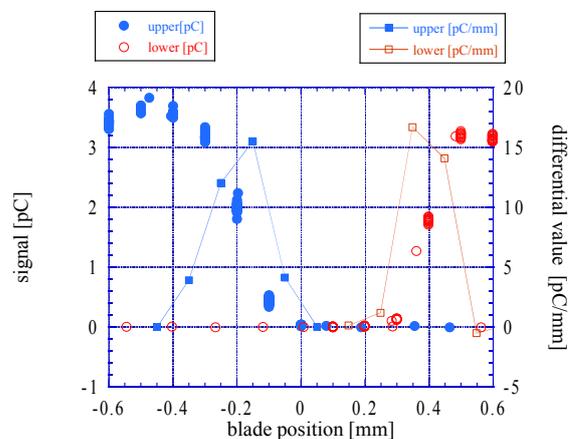


Figure 5: output signal of the halo monitor in the vertical position scan.

た。電子ビームの垂直方向のプロファイルはダイヤモンド検出器の出力を垂直方向の位置について微分することによって求めることができ、Figure 5 にはその結果も合わせて示す。upper blade の信号からは、この時のビームの中心は-0.2 mm であることが示された。同様の測定を lower blade についても行った。Lower blade の信号から求めたビームの中心は+0.4 mm であった。2つのブレードで測定したビームは同一の電子ビームなので、upper blade と lower blade のオフセットはそれぞれ、+0.2 mm と-0.4 mm と求められた。2つのブレードのオフセットの和の 0.6 mm という値は、ブレード先端と電極との間隙の 0.3 mm の 2 倍に対応することから、ブレードのアライメントが良い精度で行われていたことが示されている。また、電極に全電子ビームが当たった時の電荷量は 3.2 pC であるので、この値をもとに ADC 積分値と電荷量との換算係数を求めた。増幅器の利得を 30 dB で、バイアス電圧を 100 V とした場合には、この時に求めた換算係数を 1/31.6 倍することとなる。

2.3 通常運転時の電子ビームの垂直プロファイル

ハローモニタは微弱な電荷を検出することを目的としているため、主ビームのコアの部分のプロファイルの測定はできない。そこで、強度の大きな部分でのプロファイル測定にはスクリーンモニタを使用した。BL3 には複数のスクリーンモニタが設置されているが、今回の測定ではハローモニタの下流にある BL3-1-3 のスクリーンを使用した。垂直方向のビームプロファイルを求めるため、スクリーンの画素信号の垂直方向への射影を求めた。この射影した値を測定範囲で積分した値は、電子ビームの電荷量に比例している。従って CCD カメラの 1 カウントあたりの電荷量は、前記の積分カウント数を BL3-0-1 の CT で求めた電荷量（この測定時には 143 pC であつ

た。）で規格化することで求めることができる。CCD カメラのピクセルあたりの長さは別途罫書き入りのスクリーンを用いて 31 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ と求めた。スクリーンを用いて測定した電子ビームの垂直方向の密度分布を Figure 6 b)に小さなドットで示す。この測定時の S/N 比はおよそ 30 程度であった。このプロファイルをガウス分布で近似した場合、強度が 1/e になる垂直方向の半幅は 0.11 mm であった。

強度の小さなハロー部分についてはハローモニタを用いて計測を行った。2.2 節で述べたのと同様にビームの垂直方向のサイズはモニタの電極の幅 1 mm よりも小さいので、垂直方向にハローモニタのブレードの位置をスキャンすることによって電荷の積分値を得ることができる (Figure 6 a) 参照)。電子ビームの水力方向の密度分布はこの積分値を位置でビムンすることで求められる。ピークの 1/10、1/10000 となる全幅は 0.35 mm、1.1 mm であった。ビームのハロー成分は十分に狭い範囲にとどまっておき、永久磁石の減磁に対する影響をこのハローモニタを用いて予防することが可能であることが確認できた。

3 まとめ

ハローモニタを用いたビームの垂直方向のプロファイルの測定を行った。スクリーンモニタの測定結果とハローモニタの測定結果とを組み合わせることにより 7 桁の広いダイナミックレンジに渡って電子ビームの垂直方向のプロファイルを求めることができた。電荷量 143 pC のビームに対して電子密度がピークの 1/10、1/10000 となる領域は全幅でそれぞれ 0.35 mm、1.1 mm であった。SACLA ではユーザー運転時に垂直方向の電子密度の広がり十分に小さいビームが安定に供給されていて、そのハロー成分を 1 fC 以下の分解能で測定できることがこのモニタを用いて確認された。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region", Nature Photonics (2012) doi:10.1038/nphoton.2012.141
- [2] H. Aoyagi, et al., "Pulse-mode measurement of electron beam halo using diamond-based detector", Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 022801 (2012)
- [3] T. Bizen, et. Al., "High-energy electron irradiation of NdFeB permanent magnets: Dependence of radiation damage on the electron energy", N.I.M. A 574, (2007)401-406

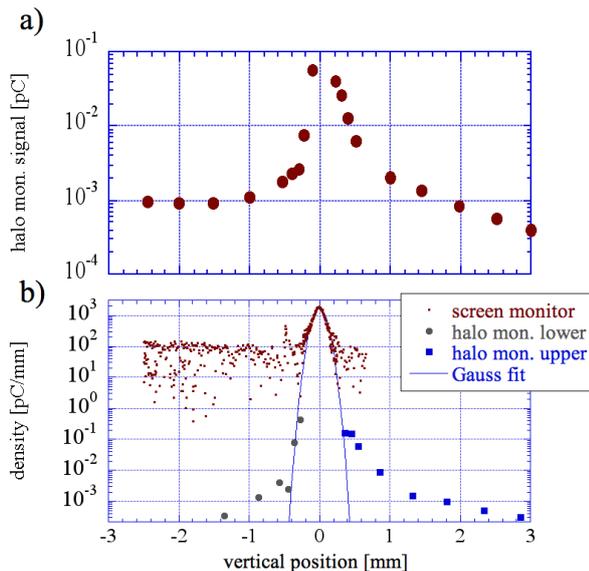


Figure 6: Output of halo monitor a) and a vertical beam profile measured by using the halo monitor and the screen monitor b).