

DEVELOPMENT OF A HALO MONITOR FOR UNDULATORS

Hideki Aoyagi^{A, B)}, Toshiro Itoga^{B)}, Teruhiko Bizen^{A, B)}, Kenji Fukami^{A, B)}, Xavier Marechal^{A, B)},
Nobuteru Nariyama^{A, B)}, Hideo Kitamura^{A, B)}, Yoshihiro Asano^{A, B)}

A) SPring-8 Joint-Project for XFEL/JASRI, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

B) SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan

Abstract

We have been developing a halo monitor for protection of undulator permanent magnets against radiation damage. Diamond detector, which operates in photoconductive mode, is good candidate for electron beam sensor. The beam test of the diamond detector head has been performed at the SPring-8 synchrotron beam dump. Minimum number of injected electron beam was around 10^5 /pulse, and we observed the pulse height of 0.1V with the pulse length of 0.6nsec FWHM, when the bias voltage is +100V. The linearity of output signal on injected beam was also measured.

アンジュレータ用ハローモニターの開発

1. はじめに

XFEL/SPring-8は、低エミッタンス電子入射器、Cバンド加速器、及び真空封止型アンジュレータによって、オングストローム領域にてSASE-FELを実現しようとするものである。

アンジュレータに用いられる永久磁石は、照射された電子数の積分値に応じて減磁してしまい、自然には、ほとんど回復することはない[1]。これを防ぐためには、永久磁石に照射される電子強度を常に監視し、かつ、その強度がしきい値を越えた時に入射器の運転を速やかに停止させることが求められる。一方で、電子ビームは、ビーム強度の大半が集中するコアの部分とその周辺部のハローの部分からなり、有限のビーム広がりを持っている。コアの位置は正確に制御されているため、コアが永久磁石を直接照射することは通常は起こらない。しかしながら、ビーム広がりには僅かなビーム条件の変動により増大し、コアの位置が変動していないにもかかわらず、ハローが永久磁石を照射することが考えられる。そこで、超高真空中の永久磁石の近傍にセンサーを取り付け、電子ビームの照射量が規定量を超えたことを検知し、ビーム運転を停止させるアラーム信号を発報するシステムを検討している。

インターロックのセンサーとして、シンチレータを用いる方法があるが、超高真空中に有機物を入れることは好ましくなく、感度の点においても不十分である。また、大気側で使用する場合には、電子ビームが損失されたことによる二次的な現象を捉えることになり、永久磁石に照射される電子ビームの絶対量の算定には適していない。

これらの問題点を克服するために、ダイヤモンド検出器を用いて、電子ビームのハロー部の電子強度を直接的に計測するハローモニターの開発を進めている。目標とする検出素子の検出感度は、電子ビーム強度 1nC/pulse (60Hz) に対して 3×10^{-6} に相当する約 2×10^4 個/pulse である。

2. ダイヤモンド検出素子

2.1 特徴と原理

センサーとしてはダイヤモンド検出器が有力候補である。ダイヤモンドは、高い耐放射線性や絶縁耐圧などの優れた特性を待つ半導体デバイスであり、超高真空下でも比較的容易に使用することが出来る。ダイヤモンド検出素子の物理素過程は、半導体検出器と同じく、入射電子により生成される電子・正孔対をバイアス電圧の印加によって出力電極に引き出すものである(図1)。ダイヤモンド検出素子は、既にX線センサーとして、アンジュレータ・ビームラインの高温負荷・超高真空の下で動作が確認されている[2, 3]。

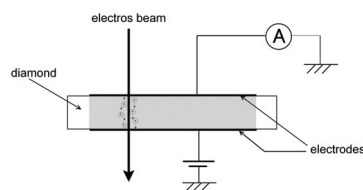


図1：ダイヤモンド検出器の動作原理

2.2 構造と回路

図2に検出素子の構造図を示す。多結晶のCVDダイヤモンド板を母材とし、その両面に一對のアルミニウムの電極を配したもので、片方を信号の読み出し用、他方をバイアス電圧印加用としている。電極間隔は $300\mu\text{m}$ である。本検出器は、X線ビーム位置モニター用に開発したもので、有感領域は $1\text{mm} \times 5\text{mm}$ に設計されている[3]。実機用には、有感領域を最適化する必要があるが、これに関しては問題なく実現できると考えている。信号の読み出し方式は、検出感度を高めるために、パルス・モードを採用し

ている。実機における信号処理回路は、フラッシュADC等を用いて高速応答でAD変換を行い、かつ波形解析ソフトを用いることにより、アラーム信号を発報させることが適当であると考えている。

本実験では、リアルタイム・オシロスコープ(20GS/sec, 4GHz B.W.)を用いて測定した。また、以下に述べる入射電子ビームの較正のために、シリコン検出器(シリコンPINフォトダイオード、浜ホト、S5377-05)をダイヤモンド検出器の直下流に取り付けている。

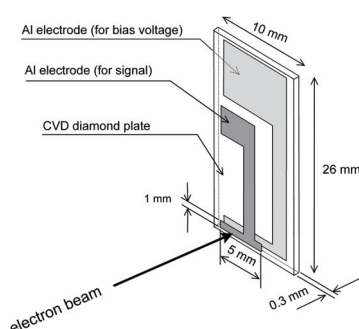


図2：ダイヤモンド検出器の構造

3. 電子ビーム照射試験

3.1 8GeV電子加速器

8GeV電子の照射試験をSPring-8シンクロトロン・ビームダンプ・エリアにおいて行った。線形加速器[4]は全長140mで、シンクロトロンに対する前置入射器として運転されている。電子ビームは電子銃から約180kVの電圧で引き出され、パルスの時間幅は1nsまたは40nsが選択できる。電子銃のグリッド・パルサーの電圧を調整することにより、線形加速器の出射ビームの電荷を再現性良く制御することができる。この時の線形加速器の電荷(CT)とシンクロトロンの電流値(DCCT)の線形性を図3に示す。本実験においては、1ns/1ppsを用いた。電子ビームはバンチャーを通過した後、25本の加速管(2856MHz)で1GeVまで加速される。その後、エネルギー圧縮システム(ECS)部でエネルギー幅を小さくしてからシンクロトロンへと送られる。シンクロトロン[4]は周長400mのレーストラック型の加速器で、線型加速器で1GeVに加速された電子ビームを入射し、電子のエネルギーを蓄積リングで運転するエネルギー(8GeV)まで加速するブースターとして、1Hzの繰り返しで運転される。パルス長は、 1σ で約50psecである。シンクロトロンのダンプ・ラインの最下流には厚さ1mmのアルミニウム窓が使われており、本実験においてバックグラウンドの影響は無視できるレベルである。

3.2 入射電子数の見積り

シンクロトロンのDCCTの分解能は0.1 μ Aのオーダーであるため、パルスあたり 10^5 個程度の電子数を

直接計測することはできない。従って、DCCTで読み取りが可能な電流値を基準とし、電子銃のグリッド電圧を変化させ入射電子数を調整した。グリッド電圧60Vから26Vへの変化でビーム電荷を減衰率1~0.025で削れることを確認した。電子銃のグリッド電圧とシリコン検出器の出力の関係を図4に示す。さらに電荷を減らすために、線形加速器とシンクロトロンをつなげるビームライン(LSBT)に設置されているOTRスクリーン等を挿入し、ビーム電荷を減衰率0.046で削った。この減衰率もシリコン検出器を用いて較正した。ダイヤモンド検出器のビーム照射実験では、シンクロトロンのDCCTの読み値6.7 μ A(電子数換算で 5.5×10^7 個)を基準とし、以上の2通りの方法によって入射電子数を減少させた。従って、入射電子数の最小値は、このDCCTの基準値に2つの減衰率を乗じた 6.4×10^4 個である。

一方、シリコン検出器の出力値の絶対値から見積もった電子数は、 4.0×10^4 個であった。両者の値は、概ね一致しているが、以下のような点で注意しなければならない。減衰率から相対的に計算する前者の方法では、読取誤差が約20%あり、手順が複雑なため系統的誤差も大きいと思われる。絶対量を直接計測した後者の方法では、シリコン中で1つの電子・正孔対を作るのに必要な平均エネルギーの値として3.68eVを採用したが、この値が8GeVの電子にも適用できるか否かを今後検討する必要がある。

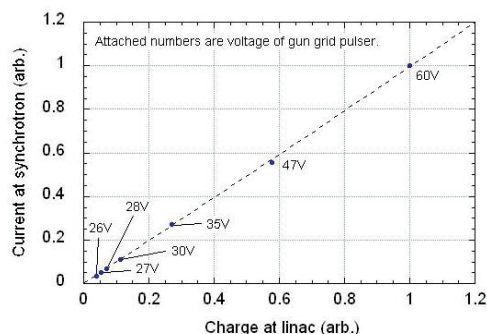


図3：線形加速器の電荷とシンクロトロンの電流値の線形性。縦軸と横軸は、それぞれグリッド電圧60Vの値で規格化している。

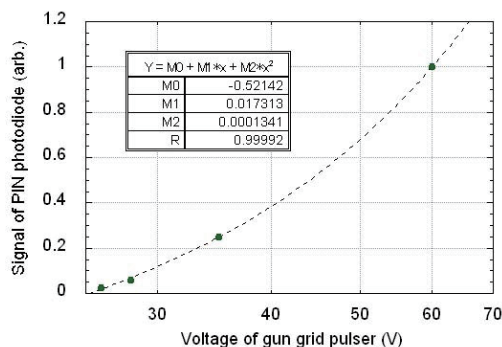


図4：電子銃グリッド電圧とシリコン検出器出力の関係。縦軸は、グリッド電圧60Vの値で規格化している。

3.3 ダイヤモンド検出器の出力信号

ダイヤモンド検出器から出力するパルス波形を図5に示す。信号用ケーブルとバイアス電圧印加用ケーブルの特性インピーダンスを検出素子の直前まで50Ωに整合させることにより、パルス長の半値全幅(FWHM)を約0.6nsecにすることに出来た。検出素子自体がもつ電気容量をさらに小さくすることによりさらにパルス長を短くできると思われる。平均操作をしなくても比較的ノイズレベルが低いため、実際にインターロック用センサーとして使用する際は、しきい値を低く設定することも出来る。

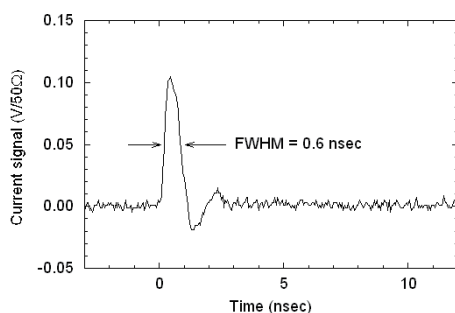


図5：パルス波形 (one shot)

ダイヤモンド検出器のバイアス電圧を変化させた際のパルス波形の変化を図6に示す。このグラフは10回の測定を平均しているため高周波成分が落とされている。入射電子数は、 6.4×10^4 個(推定値)である。図7より、パルス波高とバイアス電圧がほぼ比例する関係にあることが分る。

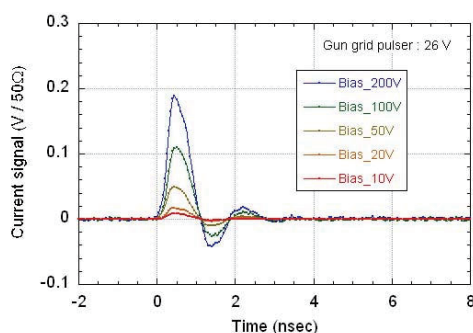


図6：パルス波形 (10回平均)

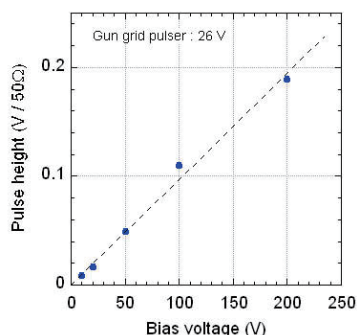


図7：パルス波高のバイアス電圧依存性

ダイヤモンド検出器の出力(積分値)とシリコン検出器の出力(積分値)の関係を図8に示す。ダイヤモンド検出器とシリコン検出器のバイアスは、それぞれ100Vと60Vである。入射電子数が、 $6.4 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^6$ 個の範囲で線形性を示している。

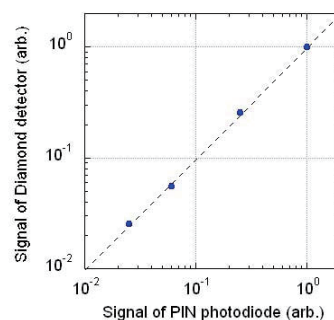


図8：ダイヤモンド検出器とシリコン検出器の線形性。縦軸と横軸は、それぞれグリッド電圧60Vの値で 10^0 に規格化している。

4. まとめ

XFELの挿入光源の電子ビーム照射を防ぐ目的で開発を進めているハローモニターのダイヤモンド検出器のビーム試験を行った。 6.4×10^4 個の8GeV電子ビームを入射した時の出力波高は、バイアス電圧100Vで約0.1Vあった。入射電子数に対する出力信号の応答も線形性を示していた。S/N比やさらにバイアス電圧を上げることが可能なことから、1パルスあたりの電子数が 10^4 個程度まで検出が可能であると考えられる。今後は、入射電子ビーム算定の精度を上げるとともに、入射電子数に対する出力の線形性をさらに広い入射電子数の範囲で確認する予定である。また、検出器の均一性や個体毎の感度のばらつきについても調べていく予定である。放射線による劣化は今のところみられないが、今後も注視しなければならない。

謝辞

ダイヤモンド検出器のビーム試験、及びその準備において、JASRI光源・光学系部門の高橋直氏、渡辺篤雄氏、JASRI加速器部門の青木毅氏らにサポートをして頂いている。

参考文献

- [1] T. Bizen, et al., "High-energy electron irradiation of NbFeB permanent magnets: Dependence of radiation damage on the electron energy", Nucl. Instr. Meth. A 574(2007) 401
- [2] H. Sakae, et al., "Diamond Beam-Position Monitor for Undulator Radiation and Tests at the Tristan Super Light Facility", Journal of Synchrotron Radiation, 4 (1997) 204
- [3] H. Aoyagi, et al., "New Configuration of Photoconductive Type Diamond Detector Head for X-ray Beam Position Monitors", AIP Conf. proc. (SRI2003) Vol. 705 (2004) 933
- [4] <http://www.spring8.or.jp/>