

FEASIBILITY TESTS OF BEAM HALO MONITOR USING DIAMOND DETECTOR

Hideki Aoyagi^{A, B)}, Toshiro Itoga^{B)}, Nobuteru Nariyama^{A, B)}, Teruhiko Bizen^{A, B)}, Takashi Tanaka^{A, B)},
Hideo Kitamura^{A, B)}, Yoshiro Asano^{B)}

^{A)} JASRI/SPring-8 Joint Project for XFEL

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{B)} RIKEN/SPring-8 Joint Project for XFEL

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

Abstract

An electron beam halo monitor using diamond detectors has been developed as an interlock sensor, in order to protect the permanent magnets of undulators against radiation damage for the X-ray free electron laser facility at SPring-8 (XFEL/SPring-8). The diamond detectors are operated in photoconductive mode. Pulse-by-pulse measurements were adopted to suppress the background noise effectively. The feasibility tests of this monitor have been performed at the SPring-8 compact SASE source (SCSS) test accelerator for XFEL/SPring-8. We observed the unipolar pulse signals with the pulse length of 0.4 nsec FWHM. The RMS noise signal level is about 1 mV for the one-shot measurement. The beam profiles of the halo can be also measured by scanning the sensor of this monitor. The results suggest that the halo monitor is useful for the interlock sensor for XFEL/SPring-8.

ダイヤモンド検出器を用いた電子ビームハロー・モニタの実証試験

1. はじめに

8GeVのエネルギーを有する電子ビームの微少なハロー部がアンジュレタ永久磁石へ継続的に照射されると、その積分電子数に応じて減磁する[1]。減磁を防ぐインターロック用センサとして、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計測するハロー・モニタを導入すべく検討を進めている。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。

電子ビーム照射によるアンジュレタ永久磁石の許容減磁率を1%、これに達する期間を10年とすると、許容される電荷損失率は 3×10^{-6} 以下とされている（加速される全電子数を1nC/pulse (60Hz) と仮定）。したがって、ダイヤモンドの検出器の検出感度は 1.8×10^4 e/pulse以上であることを確認することが必要である。

他の施設では、電子ビームの損失をTLD結晶、光ファイバー、シンチレータ、トロイダル・コイル等を用いる方法が提案されているが、いずれも応答時間または分解能において不十分なものである。ダイヤモンド検出器を用いたハロー・モニタは、いずれの観点においても要求を満たすものである。

1.1 ダイヤモンド検出素子の構造

図1に、検出素子の構造図を示す[2]。多結晶のCVDダイヤモンド板(26mm×10mm×0.3mm)を母材とし、その両面に一対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。有感領域は、一対の電極に挟まれた5mm×1mm×0.3mmの領域である。検出感度を高めるために、パルス・モードで信号読み出しを行っている。従って、高周波特性を高めるために、50Ω同軸ケーブルを可能な限り、素子の電極に近付けるように工夫をしている。

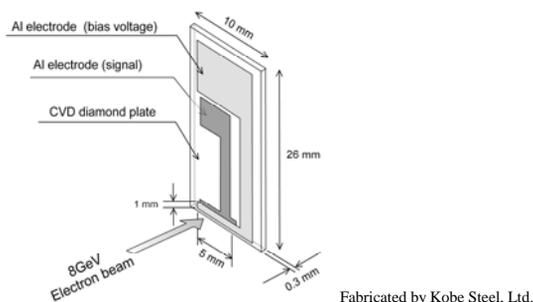


図1：ダイヤモンド検出器の構造

1.2 ダイヤモンド検出素子の評価試験

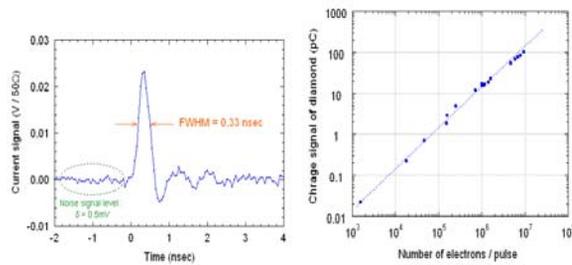
ダイヤモンド検出器の特性を評価するために、SPring-8シンクロトロン・ビームダンプエリア(8GeV)においてビームテストを行った[3,4]。パルス出力信号は、リアルタイム・オシロスコープ(20GS/sec, 4GHz B.W.)を用いて測定した。また、入射電子ビームの較正のために、シリコン検出器(シリコンPINフォトダイオード、浜ホト、S5377-05)をダイヤモンド検出器の直下流に取り付けている。オシロスコープを加速器トンネルの外に設置する必要があるため、信号の減衰率の低いケーブル

(20m, SUCO FEED 1/2") を用いている。XFEL実機搭載の際には、長さ40m程度のケーブルによる信号伝送を想定している。

1.3 出力信号の波形と比例性

図2(a)に、ダイヤモンド検出器から出力するパルス波形(バイアス電圧100V)を示す。半値全幅0.33nsecのパルス出力が得られた。単ショット計測でのノイズ信号レベルの標準偏差は0.5mVであった。したがって、波高分析で必要とされるS/N比を10以上とすると、検出可能なパルス波高は約5mVとなる。

図2(b)に、バイアス電圧100Vにおけるダイヤモンド検出器の出力(パルスあたりの積分電荷)と入射電子数の比例性を示す。入射電子数は、シリコン検出器の出力より算出した。ダイヤモンド検出器のバイアス電圧は1kVまで印加することが可能であるが、動作の安定性の観点から200V程度以下とするのが適当である。パルス当たりの入射電子数が、概ね $10^3 \sim 10^7$ 個の範囲で比例性を示している。実際に検出可能となる入射電子数は、S/N比の制限から、1パルス当たり 2×10^3 個程度である。



(a) パルス波形 (b) 出力信号の比例性

図2：シンクロ・ダンプでの評価試験

2. SCSS試験機における実証実験

ダイヤモンド検出器を装着したビームハロー・モニタを250MeV SCSS 試験機において実証試験を行った[5]。図3(a)~(c)は、ダイヤモンド検出器とハロー・モニタ本体の写真である。検出素子は、上下方向に駆動可能なアクチュエーターに取り付けられており、アンジュレータ永久電磁石のGapの開閉に応じて動作可能な構造としている。

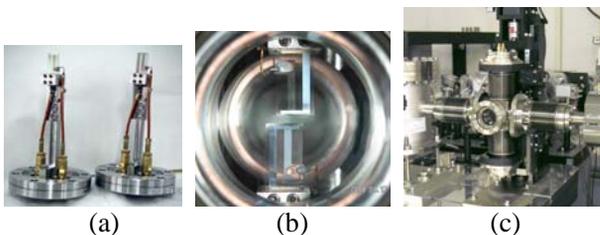


図3：写真 (a) 検出素子を ICF70 に装着 (b)ビーム・コア部の上下に配置(ビーム方向は手前から奥) (c)モニタの設置(ビームは左から右)

実証実験は、(1)出力波形の確認、及び、サイラトロン等に起因する環境ノイズによる影響の評価、(2)誘導電流(航跡波)による影響と高周波遮断フィルターによる抑制、(3)真空パイプ内壁等で生ずる二次電子や輻射による信号の評価、(4)検出器がビームの至近距離に配置された時のレーザー発振に対する影響の評価の各項目について行った。

2.1 出力波形の確認

図4にハロー・モニタの出力波形を示す。このデータは、1パルス当たりの 10^4 個程度の電子ビームのコア部をダイヤモンド検出器の有感領域の中心に照射して得たものである。図3のデータに比べて、半値全幅FWHMが大きくなっているのは、同軸信号ケーブルを25mと長くしたことが要因である。ノイズ信号レベル($\sigma=1.0\text{mV}$)は十分小さいことから、サイラトロン等に起因する環境ノイズによる影響はないことがわかった。

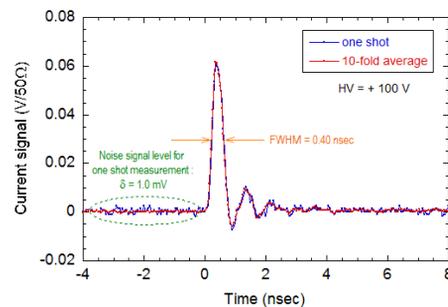


図4：ハロー・モニタのパルス波形(青線は10回平均、赤線はシングル・ショット計測)

2.2 誘導電流(航跡波)による影響とその抑制

図5は、パルス当たりの電子数 1.2×10^8 個の電子ビームのコア部を検出素子の近傍を通過させたときの信号である。上のグラフは、誘導電流(航跡波)による影響が生じていることを示している。この周波数は、モニタ筐体の共鳴周波数である。下のグラフのように、高周波遮断フィルター(LPF)を導入することによって、電子ビームのハロー部に由来する正味の信号量を計測することができる。

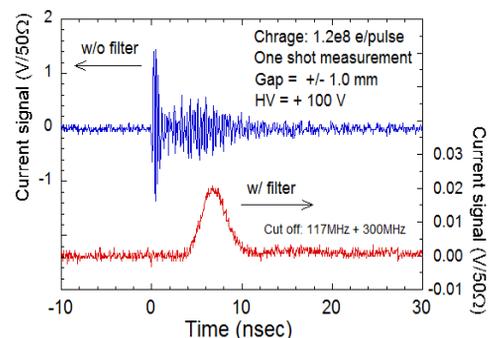


図5：誘導電流の影響とその抑制(上：LPF 無、下：LPF 有)。

2.3 二次電子や輻射による信号の評価

図6は、電子ビーム・エネルギーが50MeVの位置に設置された空間スリットを変化させながら、本モニターを使って、電子ビームのハロー部の鉛直方向のビームプロファイル測定をしたものである。スリットサイズの変化によりハロー部のプロファイルが変化している様子が観測された。二次電子や輻射による電子線・ガンマ線の広がりにはビームパイプ($\phi=20\text{mm}$)全域に亘ると考えられるが、 $\pm 2\text{mm}$ 程度以上の場所では信号が検出されないことから、二次電子や輻射の影響は無かったと判断できる。

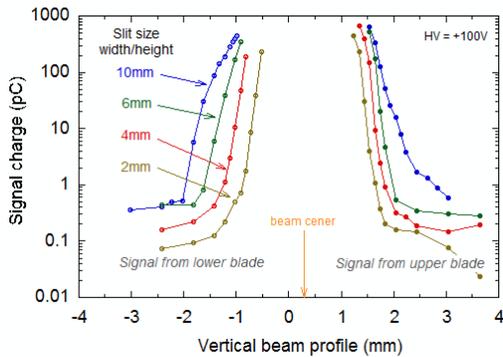


図6：鉛直方向のプロファイル測定

2.4 レーザー発振に対する影響の評価

図7は、レーザー発振に対する影響を評価したものである。検出素子の先端が、電子ビーム中心から1mm程度離れていればレーザー出力に影響はないことが分かった。但し、XFELで電子ビームに対する要求が高いので、ビームパイプとの接続をより滑らかにすることが必要である。

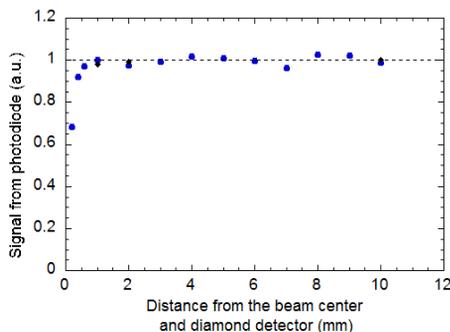


図7：レーザー発振に対する影響

3. 結論と今後の予定

ハロー・モニタの実証試験を、XFEL用試験加速器SCSS (250MeV) において行い、微弱なハロー部の強度プロファイルの測定に成功する等、良好な結果を得た。実機においてもハロー・モニタは、十分機能すると考えている。

本モニターをXFELに実装させるための開発研究の次の段階として、レーザー発振に対する影響を最小限に抑えるためRFコンタクトを最適化した実機的设计を進めている。図8に示すように、RFフィンガーを備え、ビームへの影響を最小限にする。また、真空容器を小型化するために、真空内のケーブルを廃止してストリップライン型伝送線路を採用する予定である。

また、信号処理回路を製作し、出力値をデータベース化することにより、中長期にわたり連続的にモニタリングするテストをSCSS試験機で行うなど、実機用のインターロック・システム全体の構築にむけて整備を進める予定である。

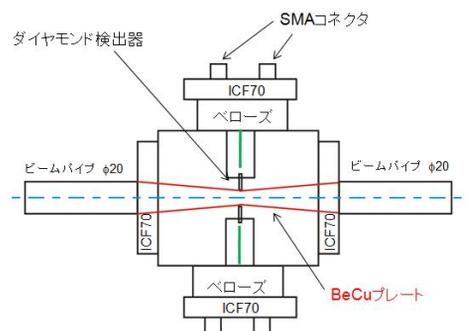


図8：RFフィンガー（BeCuプレート）を備えた実機用ハロー・モニタの概念図

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加速器部門の深見健司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. 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.
- [3] H. Aoyagi et al., "Development of a halo monitor for undulators", WP47, PASJ4-LAM32, August 2007, Wako, Japan.
- [4] H. Aoyagi et al., "Beam Halo Monitor using Diamond Detectors for XFEL/SPring-8", THPC146, EPAC 2008, Genoa, Italy.
- [5] H. Aoyagi et al., "Beam Halo Monitor using Diamond Detector for interlock sensor at XFEL/SPring-8", TUPB24, DIPAC 2009, Basel, Switzerland.