

YAG:Ce を用いた高分解能スクリーンモニター

HIGH RESOLUTION SCREEN MONITOR USING YAG:CE SCREEN

○ 内藤孝[#]、三橋利行、荒木栄、浦川順治、奥木敏行、久保浄、黒田茂、照沼信浩
Takashi Naito [#], Toshiyuki Mitsuhashi, Sakae Araki, Junji Urakawa, Toshiyuki Okugi, Kiyoshi Kubo, Shigeru Kuroda,
Nobuhiro Terunuma,
KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We developed a high resolution screen monitor using YAG:Ce screen for the momentum spread measurement at KEK-ATF2 beam line. The monitor consists of a gated CCD camera, a microscope and 3 directional movers. The gated function of the CCD can control the exposure timing, which means the intensity of the scintillation light can be controlled. The microscope lens has a spatial resolution of 4.3 μ m. The movers are used for the adjusting the positions for the vertical/horizontal and the focus. The screen has an angle of 45 degree horizontally for the beam direction and the CCD set to the perpendicular direction for the screen. The setting can avoid the Synchrotron radiation(SR) from the upstream and the Coherent Optical radiation(COTR). The SR and COTR are reflected to 90degree direction. The measured minimum beam sizes for vertical and the horizontal are 7 μ m and 50 μ m respectively. The details of the measurements are described.

1. はじめに

電子加速器ではビーム性能の向上に伴いビーム計測を行うモニターは高分解能である必要が出て来た。リニアックやビームトランスポートに於いてビーム位置や形状を測定するスクリーンモニターも高分解能化を目指して、従来使用されていた蛍光板 Desmarquest から他の材質を使用することが試みられている。^{[1][2][3]} 本稿では、ビームの位置や形状を高分解能で測定するために開発した YAG:Ce を用いたスクリーンモニター(YSM)について報告する。

高エネルギー加速器研究機構先端試験加速器 ATF では、リニアコライダーの最終収束系の開発するためのビームライン ATF2 を建設し実験を行っている。ATF2 へはダンピングリングで生成した 1.3GeV の超低エミッタンスビームを供給しているが、このビームの性質を理解するためにいろいろなモニターが設けられている。Momentum spread モニターもそのひとつである。このモニターは水平方向のビームサイズを

$$X = \sqrt{\left(\sqrt{\epsilon_x \cdot \beta}\right)^2 + \left(\eta \frac{\Delta p}{p}\right)^2}$$

により求めた時、分散関数の十分大きな場所でのビームサイズは第一項が無視出来、 η が既知であれば Momentum spread $\Delta p/p$ を簡単に求めることが出来る。ATF の場合、ビームのエミッタンスが下がると Momentum spread は強いバンチ電流依存性を示す。ATF2 建設以前のビームラインでは分散関数の十分大きな場所($\eta=2$ m)にモニターを設置しており計測されるビームサイズは 1.2mm 前後であったため Desmarquest を使用したスクリーンモニターでも問題が無かったが、ATF2 ではスクリーンモニターの場所での設計分散関数は 0.5m 程度のためビームサイ

ズは 300 μ m 前後と予想され高分解能のスクリーンモニターが必要となった。

YAG:Ce は発光波長 550nm の良好なシンチレーション特性を持ち^{[4][5]}、真空特性、加工性にも優れており、Desmarquest に比べ透明な材質であるためスクリーンモニターの精度の改善が期待される。

2. スクリーンモニターの構成

Fig.1 に YSM のレイアウトを示す。YSM は、ATF で使われている Desmarquest を用いたスクリーンモニターのアクチュエーターチャンバーを改造して使用している。このチャンバーは水平方向からスクリーンをビームラインに挿入しスクリーンは横に 45° 傾けて設置している。Desmarquest を用いたスクリーンモニターでは、横 90° 方向に CCD を設置し撮像しているが YSM では横 45° 方向からプロファイルを撮像するようにした。45° 方向から撮像することによって、スクリーンを正面から見ることになり焦点深度の浅いレンズ系を使用してもビーム位置によって焦点ずれが起きないように設計した。また、上流からの放射光や FEL で問題になっている Coherent Optical Transition Radiation(COTR)は 90° 方向に進むため、45° 方向の発光を使用することによってこれ等の影響をほとんど排除することが出来る。横 45° 方向から撮像するためにレンズから見るとビームはシンチレーターを斜めに横切るため発光は水平方向に広がる。YAG:Ce はほとんど透明なために表面の発光も奥の方からの発光も同様に観測される。結果的に計測しうる水平方向の最小ビームサイズは YAG:Ce の厚みで制限される。Fig.2 は、Gauss 分布のビームを 50 μ m 厚の YAG:Ce 計測した場合の計測されるビームサイズを計算したもので、ビームサイズが大きい場合にはエラーは少ないが 50 μ m 近辺になると急にエラーが増え 50 μ m 以下にはならない。今回の測定では X 方向には 300 μ m 程度の

[#] takashi.naito@kek.jp

大きさと見積もられるため、この影響は無視出来る。

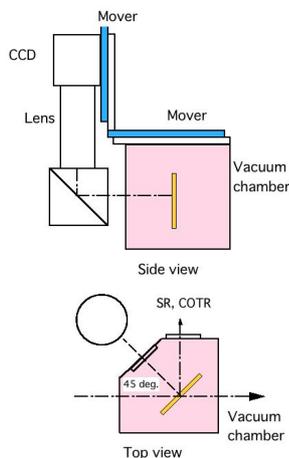


Figure 1: YSM layout.

2.1 結像系

今回測定には、杉藤製 TS-93022 レンズを結像系に使用した。レンズのパラメーターを Table 1 に示す。像の拡大率は最大で3倍になる。焦点深度は 0.3mm のため、後述するように YAG:Ce の厚み方向全体の発光に焦点を合わせることが出来る。CCD にスクリーンからの X 線が直接入らないようにするため、レンズはミラーで光軸を上方に変更して設置した。このレンズは焦点が固定のため、焦点やプロファイルの位置の調整は3軸のムーバーで行っている。分解能は、基準ターゲットを測定し Modulation transfer function から Point spread function を求め、その広がりから求めた。Point spread function の広がり gauss 分布から少しずれているため中心に近い部分を gauss 関数でフィットしてその σ 値を分解能とした。後述するように測定されたビームの分布も同様の分布をしており、結像系が測定に影響している可能性がある。

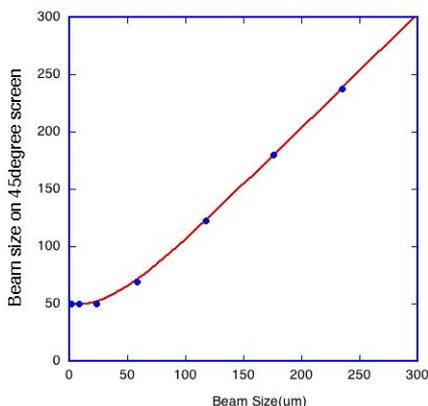


Figure 2: 計測される水平方向の最小ビームサイズ。

Table 1: Parameters of the Lens(SUGITOH TS-93022)

Magnification ratio	0.38~3
Diameter of lens	38mm
Focus length	165 mm
Focal depth	0.3mm
Resolution	4.3 μ m

2.2 CCD の電子シャッターの特性

放射光や COTR はビームが通過している時間だけ発光しているのに対して、YAG:Ce シンチレーターは約 100ns の発光時間を持つ。FEL ではイメージンテンシファイアのゲート機能を使って分離することも試されている。^[6] 放射光やCOTRを排除するために、この発光時間の違いを市販の CCD の電子シャッターの機能により分離出来ないかを検討した。

電子シャッターの機能の評価は、短時間発光するレーザーダイオード (浜松フォトニクス製 C4725 発光時間 30ps) の光を撮像し、撮像のタイミングを決める外部トリガーのタイミングをスキャンすることにより評価した。CCD は、IMPRES 社製 IGV-B0610M、JAI 社製 CM-030GE の2種類を評価した。CCD の撮像のタイミングは外部トリガーとは非同期の内部クロックのタイミングで撮像されるため、最低でも内部クロック 1 周期分(40MHz の場合 25ns)のジッターが発生する。さらに外部トリガーに対する応答速度などが加味されるため、シンチレーターの発光時間に対して無視出来ない値になる。IGV-B0610M の外部トリガータイミングに対する応答を Fig.3 に示す。撮像が非同期であるため、シャッター動作の途中では出力が大きく変動している。このジッターは約 30ns あり、シンチレーターの発光特性の最も急峻に変化するタイミングでの光量変化を見積もるとジッターの効果は約 20%の強度変化になる。

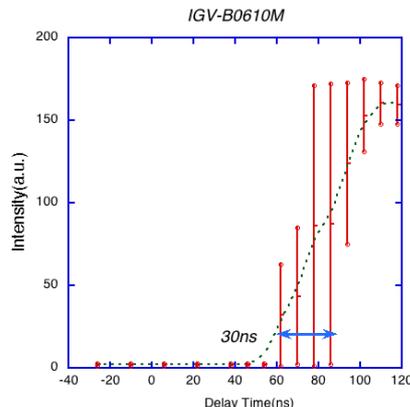


Figure 3: IGV-B0610M の電子シャッターの特性。

2つの CCD の電子シャッターの特性を Table 2 に示す。CM-030GE はトリガー入力に対して 3.2 μ m 遅れて撮像を開始する。これはトリガー入力回路に回路を保護するためのフォトカプラーが入っているた

めで、入力回路にフォトカプラーが入っている方が一般的である。その分、ジッターも立ち上がり時間も多くなっている。IGV-B0610M のジッターを含めた応答は約 60ns であった。

この測定の結果から、市販の CCD の電子シャッターの機能を使いシンチレーション光の発光タイミングにあわせることによって、放射光や COTR を分離することが可能である。ビーム試験では主に IGV-B0610M を使用した。

Table 2: 電子シャッターの特性

	IGV-B0610M	CM-030GE
Delay time	50ns	3.2 μ s
Jitter	30ns	40ns
Rise time	60ns	120ns

3. 測定結果

3.1 水平方向ビームサイズの測定

測定されたプロファイルの例を Fig.4 に、水平方向ビームサイズの電流依存性を Fig.5 に示す。電流値が少ない条件でもショットごとの測定値のばらつきが増加することなく測定されているのが分かる。

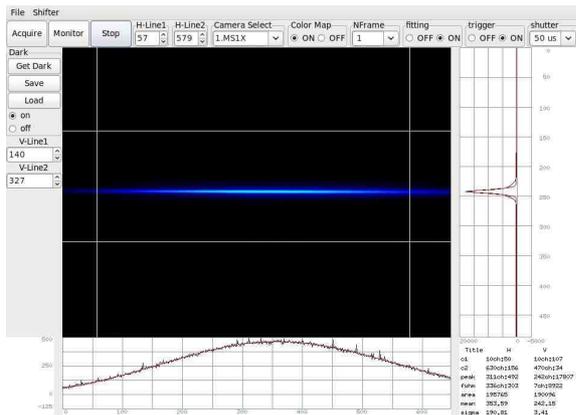


Figure 4: YSM で計測されたビームプロファイル.

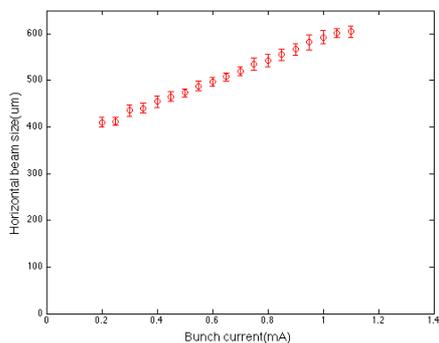


Figure 5: 水平方向ビームサイズの電流依存性.

3.2 垂直方向ビームサイズの測定

垂直方向のビームサイズの計測に関しては、ATF の取り出しビームを評価するには数 μ m 以下の精度が必要になる。しかし、他の報告から 15 μ m 程度の精度と報告されており^[2]、当初、ATF の取り出しビームを評価するのは難しいと考えられた。このモニターの分解能を評価する目的から、上流の 4 極電磁石の強度を変え、垂直方向にビームをフォーカスさせて、測定値がどこまで小さくなるかを測定した。YAG:Ce スクリーンを変えて測定したところ、Fig.7 に示すような結果を得た。この測定は同一ビーム条件での測定ではないため精度がないが、ダンピングリングでのエミッタンスの測定から YSM 上での垂直方向のビームサイズは数 μ m 程度になるものと推測される。

スクリーンの厚みを薄くすると計測されるビームサイズは小さくなり、また、焼結セラミックと結晶のスクリーンを比較すると結晶の方が僅かではあるが小さく測定された。

計測される最小のビームサイズは、

- 1) スクリーンの'にじみ'効果
- 2) レンズの分解能
- 3) スクリーンの Saturation

の影響を受ける。1)に関しては、Scintillator はほとんど透明であるために表面からの発光、深奥からの発光に加えて前方への発光が反射したものが撮像される。100 μ m 厚セラミックの計測で、ベースラインが大きく広がっているのはこの効果の可能性がある。2)に関しては、測定値が 7 μ m 程度になるとレンズの分解能の効果がビームサイズの測定値に大きく影響する。また、測定したプロファイルは gauss 分布から少し外れており結像系の Point spread function に近い分布をしている。プロファイルの中心値付近が合うようにフィットすると測定値はさらに小さくなり 50 μ m 厚みの単結晶では 6.5 μ m まで下がる。もし、この効果が支配的であれば分解能の高いレンズを使用することにより測定値は下がる可能性がある。3)に関しては、電子密度が一定以上高くなると Scintillator は飽和状態になり測定値に影響をあたえるが測定ではビーム強度を 2、3 倍変えても測定値に大きな変化はなかったため、この測定ではそれほど大きく影響されないものと推測される。

ここまでの測定は、水平方向に分散関数の大きな場所での測定であったためにビーム形状は水平方向に大きく広がり Saturation の効果を測定するには適していないと考えられた。そのため YSM を分散関数の無い場所へ移動して、測定を行い Saturation の効果を評価した。測定したプロファイルが Saturation した例を Fig.7 に示す。水平方向のプロファイルの積分を 1 ラインだけにした時、ビームの分布は gauss 分布であるはずであるが明らかに発光量が飽和している。この時の電子密度を電荷量とプロファイルの面積(σ 値)から計算すると 0.25pC/ μ m²であった。この値は、プロファイルの形状が明確に変形する値であるため Saturation はさらに小さい値から始まっている可能性がある。

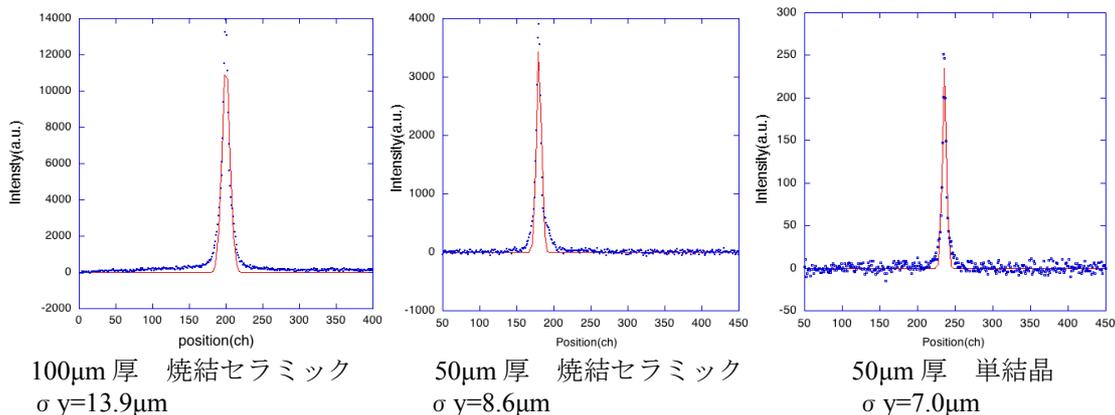


Figure 6: YAG:Ce スクリーンの違いによる計測された最小ビームサイズ.

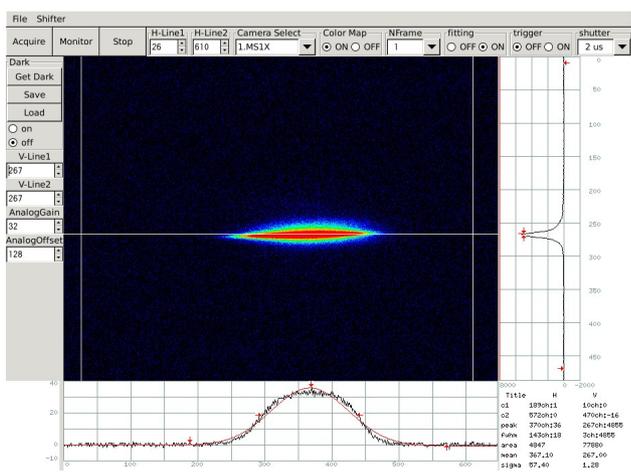


Figure 7: 飽和したビームプロファイルの例.

3.3 電子シャッターのタイミングによる測定光量の変化

2.2で示した電子シャッターのタイミングによる測定光量の変化を実際のビームを使って測定した。Fig.8 に外部トリガーのタイミングを変えたときの CCD で観測される光量 (赤丸) と垂直方向のビームサイズ (青丸) を示す。CCD の撮像時間は 2µs である。ここで測定された光量は、YAG:Ce の発光時間特性を 2µs の時間ウインドウで測定したことに相当し、発光量の変化は線源での発光特性にほぼ一致する。^[4] この測定でトリガーをビームタイミングから遅らせて測定すると光量が下がっても垂直方向のビームサイズにはほとんど変化がなくプロファイルの測定には問題がないことが確認された。ビーム通過から 0.5µs 以上経過したタイミングで撮像しても、光量は一桁以上下がるがプロファイルの測定には問題がなく、光量の調整に使用することが可能である。

4. まとめ

ATF2 ビームラインに於いて、Momentum spread を測定するための高分解能スクリーンモニターの開発を行い測定に必要な精度が十分得られることを確認した。また、CCD の外部トリガー機能を使い撮像のタイミングを変えることによって、YAG:Ce の発光時間の任意のタイミングを撮像し、入射光量を調節した場合でも計測されるビームサイズに変化がないことを確認した。

計測された最小のビームサイズは 50µm 厚みの単結晶を使った場合で 7µm であった。この値は使用した結像系の分解能に近く。現在のセットアップではほぼ限界であると考えられる。考え得る測定エラーとしてスクリーンの'にじみ'効果、レンズの分解能、Saturation 効果に注意する必要がある。'にじみ'効果はスクリーンの厚みを薄くすることによって少なくすることが出来る。

今後、高分解能のレンズを使用し、薄いスクリーンを使用することによって、さらに小さなビームサイズの計測が可能になるものと期待される。

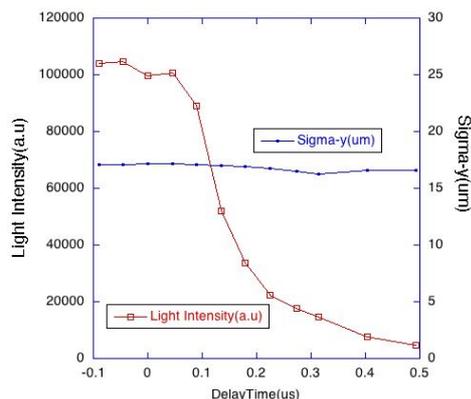


Figure 8: 外部トリガーのタイミングを変えたときの CCD で観測される光量と垂直方向のビームサイズ.

4. 謝辞

本研究を支援していただきました生田施設長、山口主幹、山本 ILC 推進室長に感謝致します。また、YAG:Ce スクリーンに関する情報を教えていただきました Spring8 松原氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] W. J. Berg, et al., Proc. of XX Int. Linac Conf., MOC06, Monterey, California(2000)
- [2] H. Maesaka, et al., Proc. of DIPAC, MOOA03, Basel, Switzerland (2009)
- [3] S. Matsubara, et al., Proc. of PASJ2012, WEPS093, (2012)
- [4] W. Chewpraditkul, et al., IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 56, NO. 6, DECEMBER 2009, pp3800-3805
- [5] T. Yanagida, et al., IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 52, NO. 5, OCTOBER 2009, pp1836-1841
- [6] C. Behrens, et al., PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS-ACCELERATORS AND BEAMS 15, 062801(2012)