

Development of SR interferometer with reflecting focus mirror and the small beam size measurement at ATF-DR

T. Naito and T. Mitsuhashi,
High Energy Accelerator Research Organization(KEK)
1-1 Oho Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

Abstract

An SR interferometer with reflecting focus mirror has been developed and the performance was confirmed at KEK-ATF damping ring. The beam size measurement by using telescope is limited the measurable minimum beam size for the diffraction limit of the lens system. The SR interferometer is one of solution over come the diffraction limit. KEK-ATF employed the SR interferometer to measure the extremely low emittance beam. The resolution of the SR interferometer was improved by using reflecting focus mirror. The measured vertical beam size was less than $5\mu\text{m}$ and the vertical emittance was $1 \times 10^{-11}\text{m}$.

反射式SR干渉計の開発とATFにおける微小ビームサイズの測定への応用

1. はじめに

電子・陽電子リングのエミッタンス計測は、従来、可視領域の放射光を使い、レンズを用いた結像系で結像させたビームサイズを計測することにより行われていた。可視領域の放射光の発散角は数mradであるため、そのdiffraction limitのために測定可能なビームサイズに限界がある。ATFダンピングリングの場合、発光点から7m下流でdiffraction limitは約 $50\mu\text{m}$ である。ATFダンピングリングでの設計エミッタンスは、それぞれ、水平方向 $1 \times 10^{-9}\text{m}$ 、水直方向 $1 \times 10^{-11}\text{m}$ であり、放射光モニタの発光点に於ける β 関数をそれぞれ、1.5m、2.5mとすると予想されるビームサイズは $26\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ である。このビームサイズの計測はレンズを用いた結像系では不可能であることが解る。

SR interferometerは、KEK三橋により開発されKEKBやATFダンピングリングのモニタとして使用されて来た。[1][2][3] 当初、ATFで計測された垂直方向ビームサイズは $14\mu\text{m}$ 前後であり使用波長 500nm で問題はなかった。しかし、加速器の調整が進むにつれてビームサイズは小さい値が計測されるようになったが $6\sim 7\mu\text{m}$ 以下の測定に精度が出ないことが解って来た。測定精度を上げるために使用波長を 500nm から 400nm へ変える必要が出てきたが干渉縞の結像点を決めているレンズの収差が問題になり、波長による収差の影響を受けにくい球面ミラーを用いたSR interferometerによって $5\mu\text{m}$ 以下のビームサイズの計測が可能となった。

2. 測定原理

van Cittert-Zernikeの定理より、空間干渉度は光源の強度分布のフーリエ変換で与えられることから光源

点の大きさはフーリエ変換した関数の干渉度を測定する事によって求められる。[4] 関数 $f(y)$ の複素空間干渉度 γ は

$$\gamma(\nu) = \int f(y) \cdot \text{Exp}(-i2\pi\nu \cdot y) dy \quad (1)$$

と表され、Spatial frequency ν は、

$$\nu = \frac{2\pi}{\lambda L} D \quad (2)$$

である。ここで λ :波長、 L :光源からスリットまでの距離、 D :スリット幅である。実際に計測される干渉縞の強度分布 I はポジション y_0 の関数として、

$$I(y_0) = I_0 \left[\text{sinc} \left(\frac{2\pi a}{\lambda R} y_0 \right) \right] \cdot \left[1 + |\gamma| \cos \frac{2\pi D}{\lambda R} y_0 + \varphi \right] \quad (3)$$

で表される。ここで a :スリットの開口幅、 R :レンズから結像点までの距離である。

光源点の分布をgauss分布とするとそのフーリエ変換である γ もgauss分布であることから、そのRMS値を σ_γ とすると光源点の大きさ σ は、

$$\sigma = \frac{\lambda L}{2\pi\sigma_\gamma} \quad (4)$$

測定するスリット幅 D を固定するとその点での γ は、

$$\gamma = \text{Exp} \left(-\frac{D^2}{2\sigma_\gamma^2} \right) \quad (5)$$

なので(4)式に代入すると、

$$\sigma = \frac{\lambda L}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)} \quad (6)$$

として求めることが出来る。

3. 測定セットアップ

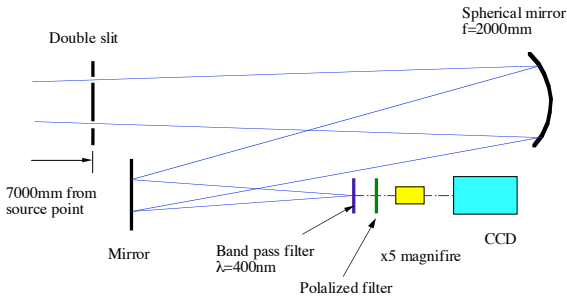


図1 測定レイアウト

図1に測定レイアウトを示す。

ダブルスリットを通過した光は2000mmの球面ミラーによって結像され干渉縞が作られる。Band pass filterによって波長が選択され、Polarization filterによってσモードの光が選択される。放射光の発散角から計測可能なダブルスリットの間隔は制限されATFの場合40mm程度である。図2に各beam sizeによるvisibilityの変化を示す。スリット間隔40mmでは、beam sizeが5~15mmまで変化した時に、visibilityは0.95~0.6まで変化する。しかし、visibilityが1に近づくともCCDのノイズやダブルスリットを通過する光量のアンバランスなどの寄与が大きくなり測定精度が悪くなる。(6)式で波長λを下げることによってvisibilityを下げる事が出来る。図3にその様子を示す。スリット間隔40mmでは、λが550~400nmの変化で、visibilityは0.95~0.90まで上げることが出来る。400nmの波長を使用した場合、レンズを使用するとアクロマチックレンズを使用しても収差のためにvisibilityが悪化する。そのため、レンズに変

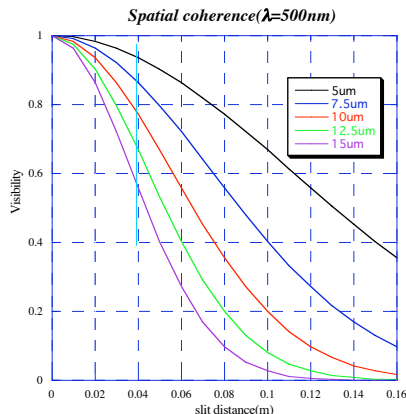


図2 Beam sizeによるvisibility の変化

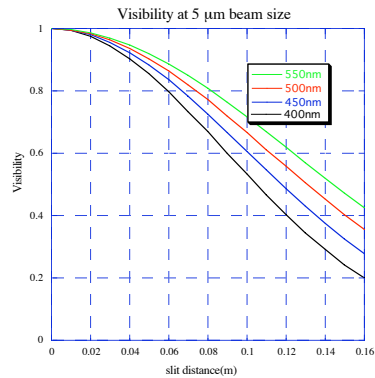


図3 波長λによるvisibilityの変化

わって球面ミラーを用いる必要がある。

4. ATF での縦方向ビームサイズの測定

ATF ダンピングリングでは、以前からSR interferometerによるビームサイズの測定をおこなってきたが[2]、emittanceの調整技術が進み垂直emittanceは~1x10^-11まで調整可能となりSR発光点でのビームサイズは5μm程度が期待されるようになりと予想されるようになった。今回、球面ミラーを使ったSR interferometerによって400nmの波長を使った計測を行った。図4にATFで計測された干渉パターンの例を示す。ビームサイズは、このProjectionの干渉度を(3)式の関数でfitすることによって求めた。

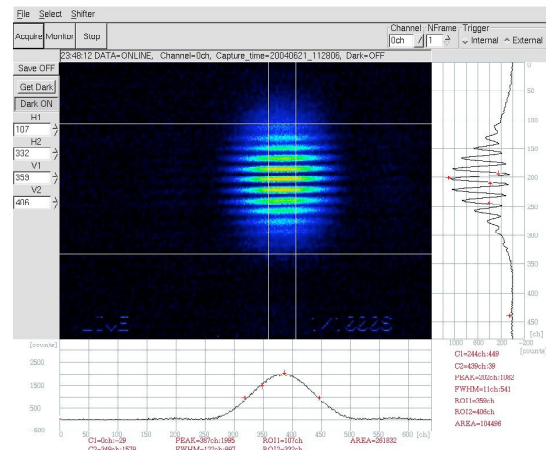


図5 SR干渉パターン

図5は、Single bunch運転に於いて Stored currentを変えた時の垂直ビームサイズの変化の測定結果である。垂直方向エミッタンス調整ノブとして、xy-couplingを制御するskew成分を六極マグネットの補助コイル(SD, SF)の電流によって行っている。従って、垂直ビームサイズを変えるパラメータとしてSD, SFの電流ON/OFF状態の違いによって、垂直ビームサイズの変化を見ることが出来る。

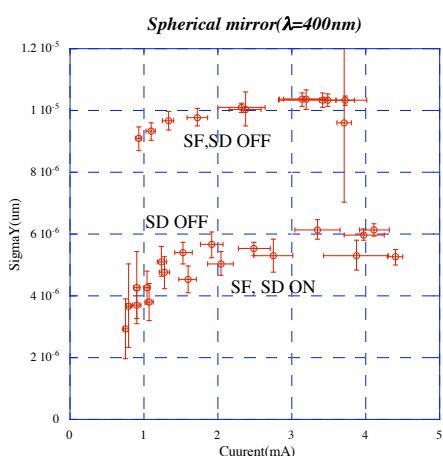


図 4 a 球面ミラーによる測定($\lambda=400\text{nm}$)

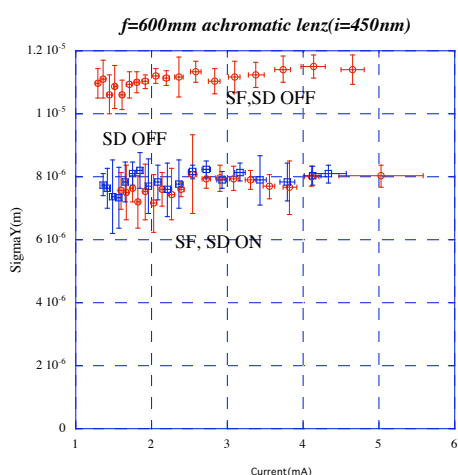


図 4 b レンズによる測定($\lambda=450\text{nm}$)

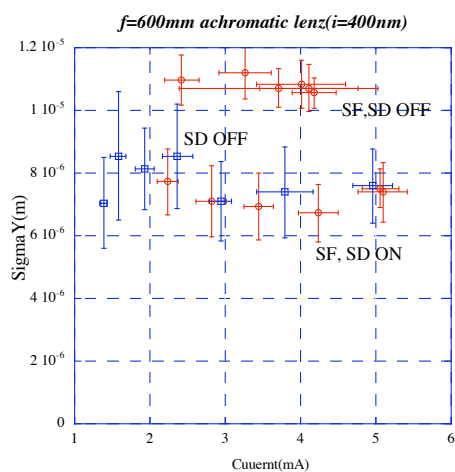


図 4 c レンズによる測定($\lambda=400\text{nm}$)

図 5 aは、球面ミラーを用いた干渉計でSD,SF-ON、SD-ON、SD,SF-OFFの3条件で3mA(1×10^{10})の時、ビームサイズはそれぞれ $5.2 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 、 $6.1 \pm 0.3 \mu\text{m}$ 、 $10.3 \pm 0.3 \mu\text{m}$ であった。また、ATFのemittanceはIntra-beam scatteringの効果が著しいことが計算で示されているが、ビームサイズはIntra-beam scatteringの効果で強度依存性を持つ様子が観測されている。

図 5 b,cは、 $f=600\text{mm}$ のアクロマチックレンズを用いた計測で、それぞれ $\lambda=450\text{nm}$ 、 $\lambda=400\text{nm}$ の場合である。couplingを制御しても $7\sim 8 \mu\text{m}$ 以下に下がらない様子が観測された。450nmより400nmの方がvisibilityが低い値で同じビームサイズになることから、400nmの方が収差の影響が大きいと考えられる。

5. まとめ

球面ミラーを使った反射光学系のSR interferometerの開発を行い、ATFダンピングリングに於いて $5 \mu\text{m}$ 以下のビームサイズの計測が可能であることを実証した。ATFでの垂直方向ビームサイズは、Stored current 4~1mAの変化に於いて $5\sim 4 \mu\text{m}$ の変化であった。この時の β 関数は、1.7mであり、この値から垂直emittance値は $1.4\sim 0.97 \times 10^{-11}\text{m}$ と計算された。

参考文献

- [1] T. Mitsuhashi, "Spatial coherency of the Synchrotron Radiation at the Visible light Region and its Application for the Electron Beam Profile Measurement", Proceedings of the Particle Accelerator Conference, Vancouver, May 12-16 1997
- [2] J.W. Flanagan et al., "Development of automatic beam size measurement system for KEKB", Proceedings of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, Wako, Oct27-29, 1999
- [3] T. Mitsuhashi et al., "MEASUREMENT OF BEAM SIZE AT THE ATF DAMPING RING WITH THE SR INTERFEROMETER", PROC. OF SIXTH EUROPEAN PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE, Stockholm, 22 to 26 June 1998
- [4] M. Born and E. Wolf, "Principle of Optics", Pergamon press, (1980)