

フレネルゾーンプレートを用いた高分解能ビームプロファイルモニタの開発

武藤俊哉^a、青木延忠^e、雨宮慶幸^d、飯田健介^b、神谷幸秀^a
 小関忠^c、阪井寛志^b、篠江憲治^b、高木宏之^b、中村典雄^b
 中山光一^e、野村昌治^a、早野仁司^a

^a KEK、^b 東大物性研、^c 理研、^d 東大新領域、^e 東芝

概要

我々のグループでは二枚のフレネルゾーンプレート (FZP) による X 線結像光学系を用いたビームプロファイルモニタの開発を KEK-ATF ダンピングリングの高品质ビームを使って行なってきた [1]。このモニタは X 線領域の放射光を用いることで非破壊的で且つ高分解の測定を行なうことが期待される。今回、装置の改良を行ない、以前の実験で問題になっていた分光器のドリフトを落す事ができ、安定に測定が行なえるようになった。また、エミッタンスのカップリングを変えてビームサイズの測定を行ない、 $\sim 7\mu\text{m}$ 程度のビームサイズとその変化を直接観測した。

1 始めに

第三世代の放射光源やリアコライダー等の加速器において要求されるような低エミッタンスの電子ビーム ($\epsilon < 10\text{nmrad}$) ではそのビームサイズは $10\mu\text{m}$ 以下になる。特に放射光源等においてはユーザーが光を用いているときでもビームの電流や寿命に影響を与えずにビームの情報を得ることが必要となる。そのためビームモニタには非破壊的な特性と即時計測できることが要求される。可視光領域の放射光 (SR) を利用する場合、このような小さなビームサイズを測定することは回折限界のため結像系を用いた方法を用いることは出来ない。他方、SR 干渉計によって可視光の放射光でも $10\mu\text{m}$ 以下のビームサイズが測られている。しかしながら結像系を用いることにより得られるビームプロファイルからはビームサイズだけでなく様々な情報が同時に得ることが出来る。X 線結像系を用いたビームプロファイルモニタはこの様な非破壊的、即時計測という要求を満たす物と期待される。

フレネルゾーンプレート (FZP) は同心円上に (X 線を通す) 明環と (X 線を通さない) 暗環が交互に連続している光学素子で X 線のレンズとして用いられている。我々が開発している FZP ビームプロファイルモニタはこの FZP を 2 枚用いた結像光学系によりビームプロファイルを測定する。

2 フレネルゾーンプレート (FZP)

FZP の n 番目のゾーンの半径 r_n は光の波長 λ とその波長での焦点距離 f を用いて

$$r_n = \sqrt{nf\lambda}$$

と表される。また、 n が十分大きな場合、ゾーンの幅 Δr_n は

$$\Delta r_n \simeq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f\lambda}{n}}$$

と表すことが出来る。一般に n が 100 以上になると FZP は理想レンズと見なすことが出来、分解能 δ は

$$\begin{aligned} \delta &= 1.220\pi \frac{\lambda f}{2\pi r_n} \\ &= 1.220\Delta r_n \end{aligned} \quad (1)$$

となる。

3 実験装置

KEK-ATF ダンピングリングの低エミッタンス電子ビームを用いて実験を行なった。表 1 に ATF のパラメータを示す。

表 1: ATF ダンピングリングのパラメータ

Parameter	value
Beam energy [GeV]	1.28
Natural emittance [nm-rad]	1.028
Magnetic field of bending magnet [T]	0.748
Critical photon energy [keV]	0.816

モニタは主に Si 結晶モノクロメーター、2 枚の FZP (Condenser Zone Plate (CZP)、Micro Zone Plate (MZP))、X 線 CCD カメラ (浜松ホトニクス製 C4880-21) から構成されている。このほかに測定ラインには 3 台のスクリーンモニタ (分光器の下流、CZP の直前、CZP と MZP の間の焦点面) とリングの真空と測定ラインの真空を分けるための Be 窓 ($50\mu\text{m}$ 厚) が設置されている。分光器はヨーとピッチをステップモーターによって振ることが出来、CZP は水平、垂直方向に、MZP は水平、垂直方向に加えて光軸方向にも位置調整が出来るようになっている。ビームプロファイルモニタの全体図を図 1 に示す。偏向電磁石から発生した放射光はまず Be 窓を通ってから分光器によって単色化され、7.3 方向に反射される。単色化された X 線 (3.235keV) の像は CZP によって $1/10$ 倍に縮小された後、MZP によって X 線 CCD 上に 200 倍に拡大された像を作る。したがって、結像系全体の拡大率は 20 倍となっている。この時の結像系全体の分解能は CZP の分

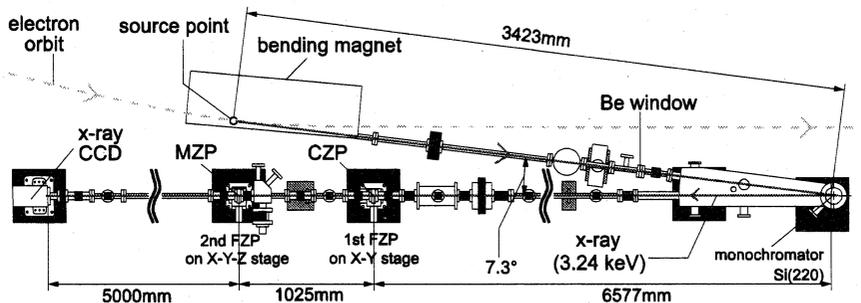


図 1: FZP プロファイルモニタ全体図

解能で決められ $1.7\mu\text{m}$ になる。各装置のパラメータを表 2 にまとめる。

表 2: 光学素子 (X 線のエネルギー 3.235keV の場合)

Fresnel zone plate	CZP	MZP
ゾーン数 N	6444	146
半径 r_N	1.5mm	$37.3\mu\text{m}$
最外ゾーン幅 Δr_N	116nm	128nm
焦点距離 f	910mm	24.9mm
像倍率 M	$M_{CZP} = 0.1$	$M_{MZP} = 200$
分光器		
分解能 $\Delta E/E$	5.6×10^{-5}	
ブラッグ角 θ_B	86.35°	
X 線 CCD カメラ		
量子効率	90%	
ピクセル数	512 × 512	
ピクセルサイズ	$24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$	

これまでの実験での問題点として

- 分光器の角度ドリフト
- FZP のアライメント

等があった。

ドリフトについては結晶を動かすためのモータが真空中にあるためモータを動かすとモータで発生した熱が結晶を支えているフレームに伝わり、熱膨張による変形を起こすために起こると考えた。そこでモータとフレームの間にセラミックを挟むことでモータの熱がフレームに流れることを防ぎ、モータで発生した熱は銅線を用いて冷却配管に逃してやる改良を分光器に施した (図 2)。改良前には X 線 CCD 上のビーム像が 30mm 程移動しておりビーム像が X 線 CCD の受光面から外れていたが改良後は $200\mu\text{m}$ 程度に抑えられた。測定結果を図 3 に示す。

以前のアライメントはインストール前に CCD 側から参照用のレーザーを分光器まで通し、そのレーザー光と FZP ホルダーの中心とを合わせることで初期アライメントを取った。同時に 3 台のスクリーンモニタでのレーザーの位置を記録しておいた。そして実験時にまず上流の 2 台のスクリーンモニタを用いて分光器の角度を

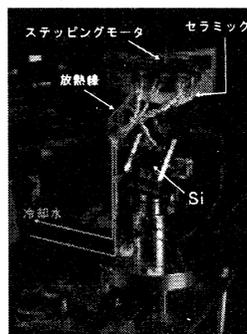


図 2: 改良後の分光器

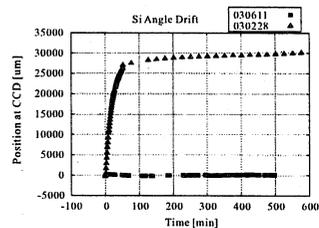


図 3: ドリフト測定。縦軸は X 線 CCD 上でのビーム像の位置、横軸は時間を示す。改良前 (2003/02/28) と改良後 (2003/06/11) でドリフト量が改善されている。

決めた。次に 3 台目のスクリーンを見ながら CZP が作る像の位置を初期アライメントの時のレーザー位置に合わせるように CZP を動かした。最後に CCD 上に像が見えるように MZP を動かした。この方法では光軸が一直線である補償がない。また、像を得るまでにかかなりの時間がかかってしまっていた。これを改善するために FZP をビームラインから退避する構造を追加した。また FZP を退避させることにより FZP 部での真空のコンダクタンスが改善され、真空作業時の FZP の損傷を防止することが期待できる。この改良によって FZP を退避させた状態で分光器から反射された放射光を直接 X 線 CCD 上で観測することによって光軸の直線性を確保することが出来る。分光器を反射した放射光は図 4 のように観測される。その後、まず CZP のみをビームライン上に挿入する。製作した FZP は暗環でも完全に X 線を吸収出来ないため X 線の一部は CZP に集光されずに図 5 に示すように透過してくる。透過光によって CZP の外形が X 線 CCD 上に投影され、この外形より CZP 中心が求まり、先程得た直接来た放射光の位置と合わせてやることでアライメントが取れる。つぎに MZP をいれビーム像をそれらに合わせることで全体のアライメントを取った。この方法により CZP は X 線 CCD のピクセルサイズ ($= 24\mu\text{m}$) 程度に、MZP に関してはビーム像を合わせていることからピクセルサイズと像倍率の逆数 ($\sim 1/200$) 積程度にアライメント出来る。

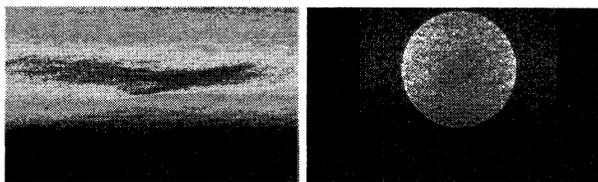


図 4: X線 CCD 上での放射の分布
図 5: CZP を入れたときの X線 CCD 上での光の分布

4 実験

図 6,7 に MZP を光軸方向に動かしたときの水平、垂直方向のビームサイズの変化を示す。図から両方向に対してビーム像の焦点が同じであることが見て取れる。以後、MZP の光軸方向の位置は焦点の位置に固定する。

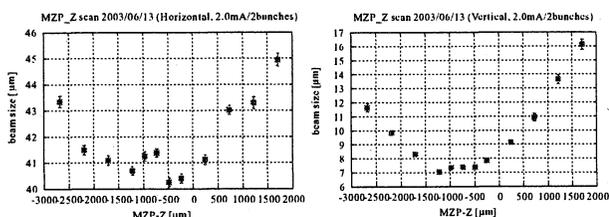


図 6: 水平方向ビームサイズの MZP 光軸方向に対する依存性
図 7: 垂直方向ビームサイズの MZP 光軸方向に対する依存性

次に像倍率 M の測定を行なった。測定方法に関しての詳細は文献 [1] に譲る。測定では $M = 20.5 \pm 0.6$ と求まり設計通りの光学系であることを確認した。ATF ダンピングリングは SD、SF と呼ばれる 2 種類の 6 極電磁石群に巻かれているスキュー四極成分を持つ様に接続された補正コイルを変えることでリングのエミッタンスのカップリングをわずかに変更することが出来る。以下の 4 つの条件について電子ビームサイズの電流依存性を測定した。

1. 通常の運転状態 (SD-on,SF-on)
2. SF 補正コイルの電流値をゼロ、SD 補正コイルの電流値は通常の設定値 (SD-on,SF-off)
3. SD、SF 両補正コイルともゼロにする (SD-off,SF-off)
4. SF 補正コイルの電流値をゼロ、SD 補正コイルは通常時と極性を逆にする (SD-reverse,SF-off)

電流値 $I = 2\text{mA}$ の時、各条件におけるビームプロファイルを図 8,9,10,11 に示す。それぞれの条件においてビームプロファイルが変化しているのが良く分かる。

水平、垂直方向ビームサイズの電流依存性を図 12,13 にそれぞれ示す。ビームサイズ $\sigma_{x,y}$ は測定点でのベータ関数 $\beta_{x,y}$ 、エミッタンス $\epsilon_{x,y}$ 、デイスパージョン関数 $\eta_{x,y}$ 、運動量分散 $\Delta p/p$ を用いて $\sigma_{x,y} = \sqrt{\beta_{x,y}\epsilon_{x,y} + \left(\eta_{x,y} \frac{\Delta p}{p}\right)^2}$ と表せる。ATF ダンピングリ



図 8: 条件 1 のときのビームプロファイル ($I = 2\text{mA}$)
図 9: 条件 2 のときのビームプロファイル ($I = 2\text{mA}$)



図 10: 条件 3 のときのビームプロファイル ($I = 2\text{mA}$)
図 11: 条件 4 のときのビームプロファイル ($I = 2\text{mA}$)

ングでは intrabeam scattering によってエミッタンスや運動量分散は電流量に依存する。実験を行なった測定点は η_y は十分小さくビームサイズはエミッタンスのみで決まる。水平方向では η_x が大きくビームサイズはほぼ運動量分散で決まってしまう。図 12 に示した電流依存性は運動量分散の電流依存性による変化である。

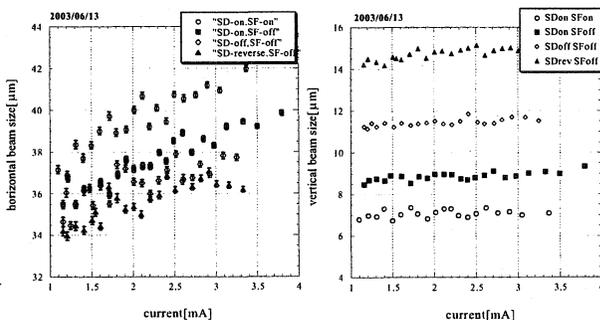


図 12: 水平方向ビームサイズの電流依存性
図 13: 垂直方向ビームサイズの電流依存性

5 まとめ

KEK-ATF ダンピングリングにおいてフレネルゾーンプレートを使用したビームプロファイルモニタの開発を行なった。そのなかで分光器の改良によってモーターの発熱による像の移動を抑えることに成功した。また、FZP ホルダーの改良によってアライメントの向上を図った。

ビーム測定において図 13 に示したとおり FZP ビームプロファイルモニタは $7\mu\text{m}$ 程度のビームサイズとその変化を直接測定した。

今回の実験から FZP ビームプロファイルモニタが $7\mu\text{m}$ 程度のビームサイズを測定するモニタとして利用することが出来ることを確認した。今後、他モニターとの比較による性能評価、さらなる精度の向上を行なっていく。

参考文献

[1] K. Iida et al ,NIM A506 41-49,2003