

短直線部のある HMBA 型 3GeV 放射光源の設計

DESIGN OF THE 3GEV LIGHT SOURCE OF HMBA TYPE LATTICE WITH SHORT STRAIGHT SECTION

原田 健太郎[#], 小林 幸則, 本田 融, 中村 典雄, 生出 勝宣,
阪井 寛志, 阿達 正浩, 土屋 公央, 船守 展正^{A)}

Kentaro Harada[#], Yukinori Kobayashi, Tohru Honda, Norio Nakamura, Katsunobu Oide,
Hiroshi Sakai, Masahiro Adachi, Kimichika Tsuchiya, Nobumasa Funamori^{A)}
Accelerator Laboratory, KEK, ^{A)} IMSS, KEK

Abstract

The HMBA (Hybrid Multi-Bend Achromatic) lattice was originally developed at the ESRF for the upgrade project of 6 GeV storage ring. Based on the 20 cell version of HMBA lattice from Pantaleo Raimondi of ESRF, we designed a 3 GeV, 130 pm-rad emittance storage ring including 20 long and 20 short straight sections. In this paper, we show the optimization of the HMBA lattice for a new 3 GeV light source.

1. はじめに

蓄積リング型光源の特徴は、多数ビームラインにおける、高輝度、高光束光の同時利用が可能となることである。光のパラメータの内、光束は主に蓄積電流値で、輝度は電子ビームのエミッタンスで決まる。低エミッタンスの蓄積リングのアンジュレータから発生する放射光は高輝度であり、ユーザー実験におけるエネルギー分解能、空間分解能、全光束におけるコヒーレント光子の割合（コヒーレント比）が向上する。

新光源の設計において必要な条件は、VSX (Vacuum Ultra Violet/Soft X-ray, 特徴的には 1 keV) から HX (Hard X-ray, 特徴的には 10 keV) 領域まで十分に高輝度であること、全ビームライン数を 40 本以上とれることである。現在進んでいる ESRF アップグレード計画[1]において開発された HMBA 形式のラティス設計を導入[2]することで、既存の DBA (Double Bend Achromat) や TBA (Triple Bend Achromat) ラティスの光源に比べてエミッタンスを 1 桁以上、輝度を 1~2 桁向上させることができる。現在の PF と比較すると、輝度はおよそ 4 桁向上する[3]。

ESRF のオリジナルラティスは挿入光源用の直線部が 20 本(RF と入射を含む)であるが、我々は PF での経験を活かし、真空封止短周期挿入光源に最適化した短直線部をセル中央に挿入することで、可能なビームライン数を 2 倍にした。

2. ラティス設計

2.1 HMBA ラティスの特徴

HMBA ラティスは、極低エミッタンスの MBA (Multi Bend Achromat) 型ラティスと既存の DBA ラ

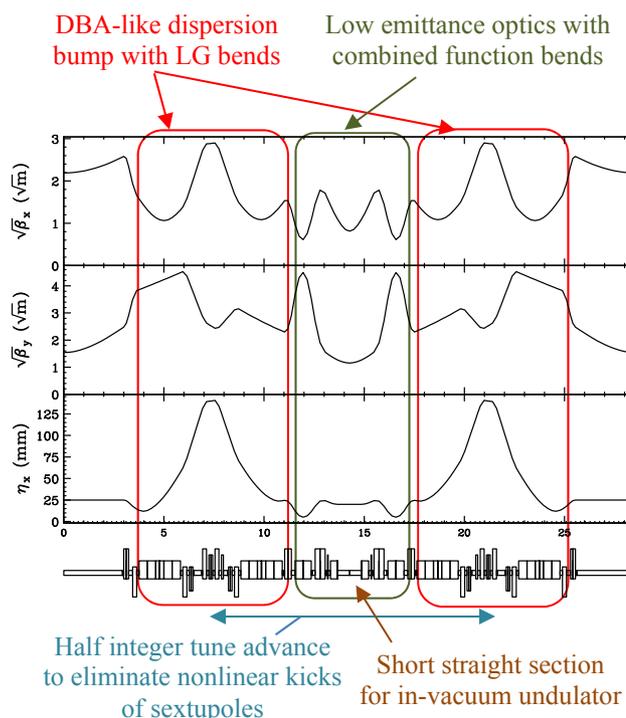


Figure 1: Optics of the normal cell of the optimized HMBA storage ring.

ティスの長所を組み合わせた構造である。ノーマルセルのラティスを Figure 1 に、ラティスを Figure 2 に示す。一般的な DBA 構造のラティスの長所は、2 台の偏向電磁石の間に分散関数の大きい部分ができ、そこに 6 極電磁石を設置することで 6 極の強さを小さくし、広いダイナミックアパーチャを確保できる。ただし、現実的なエミッタンスはおよそ 1~10 nmrad になる。一方、MBA 形式のラティスを採用すると、機能結合型偏向電磁石と強い 4 極電磁石で強く絞っ

[#]kentaro.harada@kek.jp

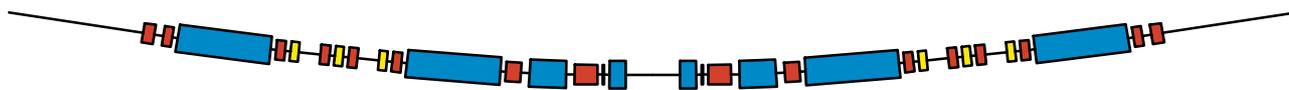


Figure 2: The lattice of the normal cell of the optimized HMBA storage ring.

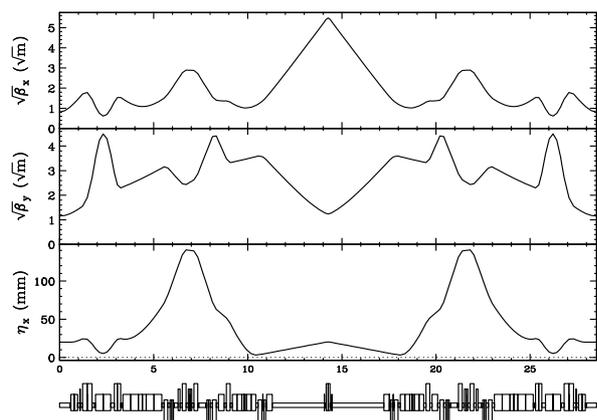


Figure 3: The optics of the injection cell for the optimized HMBA storage ring.

たオプティクスとすることで、 0.1 nmrad のエミッタンスが可能になる一方、小さな分散関数の部分に大きな色収差を補正する為の 6 極を設置する為、非線形力の影響が大きくなり、ダイナミックアパーチャの確保が非常に困難となる。

HMBA 型ラティスは、MBA ラティスを 2 セルの DBA で挟んだような構造をとる。DBA 部分を分散バンプと呼び、エミッタンス増大を防ぐ為に分散関数の増大と共に偏向電磁石の磁場を弱くするという、LG (Longitudinal Gradient) Bend が採用されている。分散バンプに設置した 6 極電磁石間のチューンの進みを半整数とすることで、6 極電磁石の非線形力をセル内で打ち消すことができる。第 3 世代放射光源のほぼ全ての施設が DBA または TBA 構造を採用したのと同様、GMBA は第 4 世代蓄積リング型光源の基本ラティスになりつつある。例えば、ブラジルに建設中のシリウス[4]や、アメリカで計画中の APS アップグレード計画[5]などで HMBA が採用されている。

2.2 真空封止短周期挿入光源の活用

3 GeV で HX (10 keV) 領域のアンジュレータ光を発生させる為には、アンジュレータの磁場周期 λ_u をおよそ 2cm 程度まで短くする必要がある。その場合、磁極列に用いる永久磁石の厚さ $\lambda_u/4$ はおよそ 5mm となる。5mm 厚の磁石でビーム軸上に十分な磁場を作り出す為には、磁極列間のギャップを厚さ程度、す

なわち 4~5 mm 程度まで閉じる必要がある。その為には磁極列を真空チェンバーの中に入れることが必要であり、その様なアンジュレータを真空封止短周期アンジュレータという。真空封止アンジュレータ [6] は PF-AR で初めて開発されたものである。真空封止短周期挿入光源の開発により、3 GeV 光源で 10 keV 領域の高輝度光が使えるようになったと言える。PF リングにおいても 2005 年の直線部増強改造後、磁極長 50cm、最小ギャップ 4mm の 4 台の真空封止短周期挿入光源が設置され、HX 領域の輝度が大幅に向上した。

真空封止短周期挿入光源の利点を新光源でも活かす為、セルの MBA 部分の中央に長さ 1.2m の短直線部を挿入した。低分散、低 b に最適化したオプティクスにより、長さ 60cm の挿入光源で 10^{20} を超える輝度が達成できる。第 3 世代光源相当の性能は新光源では 60cm アンジュレータで十分であり、汎用ビームラインとして活用することが可能である。

2.3 入射部とダイナミックアパーチャ

キッカーセプトラムを利用した通常の入射を行う為に実寸のダイナミックアパーチャを広く確保する為、直線部で水平 β 関数を大きくしたセルを 1 セル、入射用に導入する。入射セルのオプティクスを Figure 3 に、ラティスを Figure 4 に示す。

リングのパラメータを Table 1 に、入射セルありでのリングのダイナミックアパーチャを Figure 5 に示す。考慮した電磁石の誤差はガウス分布の乱数誤差で、 1σ が据え付け誤差 $50 \mu\text{m}$ 、磁場強さの誤差 0.05%、電磁石の回転誤差 0.1 mrad であり、図は 100 通りの平均値である。入射点で β_x は 28 m であり、実寸のダイナミックアパーチャは誤差ありでおよそ 1 cm となる。入射点での蓄積ビームサイズは 0.1 mm 、セプトム厚 2mm、入射ビームのサイズを約 0.5 mm と仮定しても、入射アパーチャは十分である。

3. 輝度

Figure 6 に典型的なパラメータを仮定して計算した挿入光源の輝度を示す。実線は 500 mA 蓄積時の、IBS (Intra Beam Scattering, バンチ内散乱) の効果を全く抑制しない場合で、点線は完全に抑制した場合である。垂直エミッタンスは水平エミッタンスに依らず 8 pm-rad とした。IBS の効果は、例えば 3 倍波空

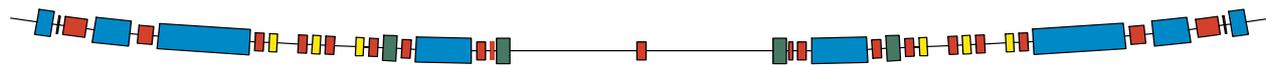


Figure 4: The lattice of the injection cell for the optimized HMBA storage ring.

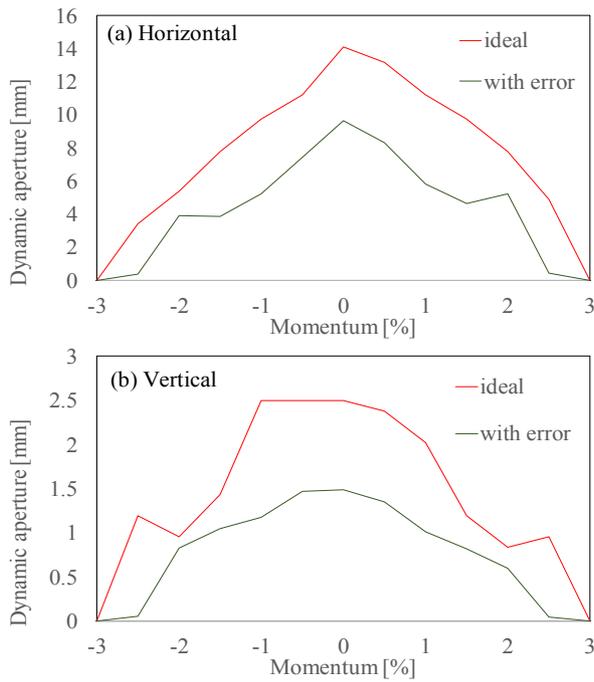


Figure 5: Dynamic aperture at the injection point with the magnetic errors after the COD correction. “with error” shows the average of 100 cases with random magnetic errors.

Table 1: Parameters of the Optimized HMBA Storage Ring

Energy [GeV]	3
Circumference [m]	570.7
Numbers of 1.2m straight sections	20
Numbers of 5.6m straight sections	20 (Including injection and RF)
Numbers of cells	20
RF frequency [MHz]	500.1
Harmonic number	952
RF voltage [MV]	2.0
Bucket height [%]	4.0
Energy loss [MeV/rev]	0.30
Momentum compaction	2.2×10^{-4}
Betatron tune (ν_x, ν_y)	48.58, 17.62
Damping time (x,y,z) [ms]	29.25, 38.28, 22.63
Beam current [mA]	0 500 natural (with IBS)
Horizontal emittance [pmrad]	132.5 314.7
Vertical emittance [pmrad]	- 8.2
Touschek lifetime [h]	- 1.8
Energy spread $\times 10^{-4}$	6.4 7.9
Bunch length [mm]	2.7 3.3

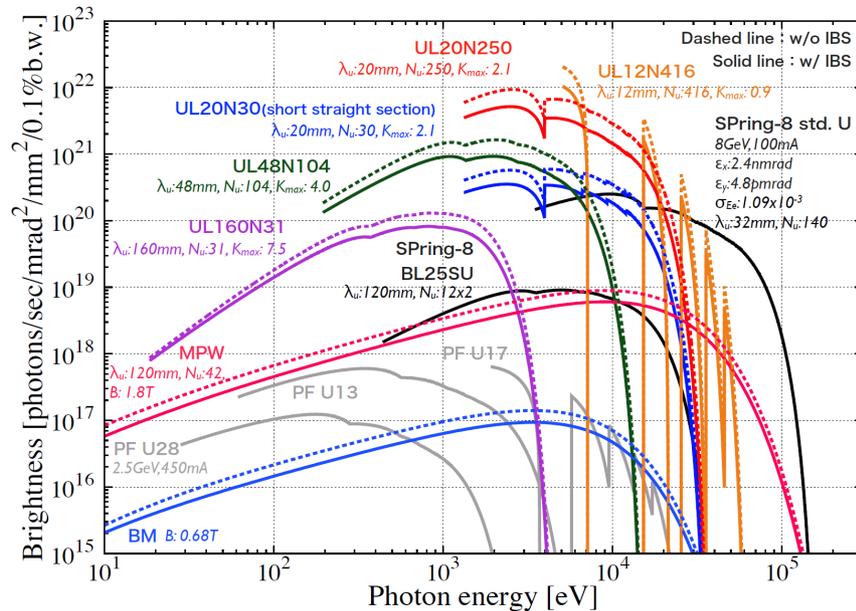


Figure 6: The brightness with typical insertion devices for the optimized HMBA storage ring compared with other existing SR facilities in Japan.

洞を導入してバンチを伸張し、電荷密度を下げることで大幅に抑制することが可能である。輝度は 1 keV 領域でおよそ $10^{20} \sim 10^{21}$ 、10 keV 領域で $10^{21} \sim 10^{22}$ となる。既存の第 3 世代光源と比べて 1~2 桁向上、PF に比べるとおよそ 4 桁の向上となる。

4. 詳細設計に向けて

新光源では低エミッタンスを実現する為に、4 極電磁石の磁場勾配は MBA 部分で大きく、PF の約 2 倍の 50 T/m となる。4 極電磁石の磁極ポア直径は 3 cm 程度まで小さくする必要がある。一方、6 極は既

存の第3世代光源並の強さで十分である。真空ダクトの内径はおよそ2.5 cm程度になることが予想されるが、細いダクトで放射光による熱とガス放出を処理する真空系が必要となる。

新リングでは周長が長く、ダンピングタイムも長い。RF空洞の高次高調波による不安定性の影響はPFに比べて厳しくなる。細い真空ダクトも含めて、リング全体のビームに対するインピーダンス評価が必須である。また、ビーム不安定性抑制のためのバンチバイバンチフィードバックの導入も必要である。高調波空洞を導入してバンチを伸長させることで、エミッタンス増大による軌道の低下だけでなく、不安定性も抑制することができる。

典型的なビームサイズは水平50 μm 、垂直5 μm である。ビームサイズの1/10を振動抑制の目標とすると、ビーム位置はサブミクロンの安定性が必要となる。BPMの精度やフィードバックの速さとしては十分であるが、そもそも振動を起こさない設計にすることが最も重要である。すなわち、地盤振動に対する建物の安定性、建物内部の局所的な振動源の排除など、きちんと設計と対策を行うことが必要である。

それらを踏まえたCDR[7]の加速器部分は6月に公開されており、現在はTDRに向けての詳細検討を行っている最中である。

参考文献

- [1] ESRF upgrade; <http://www.esrf.eu/>
- [2] Pantaleo Raimondi, Private communications, June, 2013.
- [3] T. Honda *et al.*, "Present Status of KEK Photon Factory and its Future Project", presented at IPAC'16, Busan, Korea, May 2016, paper WEPOW020, this conference.
- [4] Sirius; <http://lnls.cnpem.br/>
- [5] APS upgrade; <https://www1.aps.anl.gov/aps-upgrade>
- [6] S. Yamamoto *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 60, 400 (1992).
- [7] <http://www2.kek.jp/imss/notice/2016/06/kekconceptual-design-report.html>