

交叉型アンジュレータにおける移相器の設計と開発

DESIGN AND DEVELOPMENT OF PHASE SHIFTERS FOR CROSSED UNDULATOR

森田希望[#], 武藤 俊哉, 柏木 茂, 日出 富士夫, 三浦 禎雄, 南部 健一, 長澤 育郎, 高橋 健,
鹿又 健, 柴田 晃太郎, 齋藤 寛峻, 山田 悠樹, 濱 広幸

Nozomu Morita[#], Toshiya Muto, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Sadao Miura, Kenichi Nanbu, Ikurou Nagasawa,
Ken Takahashi, Ken Kanomata, Koutaro Shibata, Hirotooshi Saito, Hiroki Yamada, Hiroyuki Hama
Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

Abstract

A variable polarized terahertz light source employing a crossed undulator configuration has been developed at Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University. This system is consisted of two planer undulators and a phase shifter. The phase shifter between two undulators plays important role which separates the THz radiation of 1st undulator from the electron beam introducing light delay time and transports the electron beam into 2nd undulator with same beam parameters as ones in 1st undulator. We considered two different phase shifter configurations such as chicane type and an arc type respectively. In this article, we show two designs of phase shifter for the crossed-undulator. From the beam tracking by SAD code, a bunch lengthening brought by the phase shifter was calculated. For proof of principle experiment, some magnets of the phase shifter were designed.

1 はじめに

テラヘルツ光(THz 光)は水素結合やファンデルワールス力による分子間相互作用、分子の振動モードに対応しており吸収されることが知られているため、円偏光した THz 光をカイラリティを持つ物質に照射した場合、右回り円偏光、左回り円偏光では異なる吸収を示すため、たんぱく質、核酸、糖類といった生体分子の構造解析に用いることができる(円偏光二色性分光法)[1]。しかし THz 領域には高い透過率を持つ複屈折物質が少ないために、他の周波数に比べて偏光制御技術が遅れている。

東北大学電子光物理学研究センターでは加速器による高輝度のコヒーレント THz 光源の開発研究を行っている。その一つとして交叉型アンジュレータを用いた偏光可変 THz 光源の開発を行っており本研究は交叉型アンジュレータにおける重要な要素である光学移相器についての設計と開発について報告する。

2 交叉型アンジュレータ

交叉型アンジュレータは異なる偏向方向を持つ2台の平面アンジュレータとその間の光学移相器で構成される[2]。各アンジュレータから発生する水平、垂直偏光の放射を適当な位相差で重ね合わせることで任意の偏光状態の光を得ることができる。また、バンチ長が放射波長よりも十分短い場合、発生する放射はコヒーレントであるので非常に高い強度を得ることが期待できる。

3 光学移相器への要求

交叉型アンジュレータにおいて光学移相器は2台のアンジュレータ間に設置される。

この光学移相器の役割は

- 水平、垂直二つの偏光アンジュレータ放射を任意

の位相差で重ね合わせるための光の遅延回路を設置するために1台目から出たアンジュレータ光と電子ビームの分離を行うこと。

- 1台目と2台目のアンジュレータに入るビームのパラメータを一致させること。

である。特に2点目についてはTHz領域で強いコヒーレント光を得るためにバンチ長の伸長を100 fs以下に抑制する必要がある。また実験室の物理的な制約で実証実験の移相器は長さ3 m程度に収めなくてはならない。

4 アンジュレータにおける R_{56}

4.1 R_{56}

6次元移相空間($x, x', y, y', z, \Delta p/p$)におけるビームの転送は6次元の行列で表すことができる。そのうちエネルギー偏差に対するバンチの縦方向の位置 z への応答を表す行列要素は R_{56} と呼ばれる。今、あるビームラインを考えた時の R_{56} は

$$R_{56} = L_0 \left(\frac{1}{\gamma^2} - \alpha_p \right) \quad (1)$$

と表せる[3]。ここで L_0 はビームラインの長さ、 γ は電子ビームのローレンツファクター、 α_p はモーメントコンパクションファクターで

$$\alpha_p = \frac{1}{L_0} \int_0^{L_0} \frac{D(s)}{\rho(s)} ds \quad (2)$$

で与えられる。ここで $D(s)$ は分散関数、 $\rho(s)$ は曲率半径を表す。式(2)にあるようにビームラインに曲率があれば α_p は有限の値をとる。交叉型アンジュレータの実証実験で用いられる THz 光源のための試験加速器 t-ACTS[4] はエネルギー22 MeV でバンチ長約80 fsの電子ビームを生成することができる。一般に電子加速器の場合、 γ は十分に大きいので式(1)において γ^2 の項は無視できるがエネルギーが22 MeV ($\gamma = 43$)とそれほど大きくなく100 fs

[#] morita@lms.tohoku.ac.jp

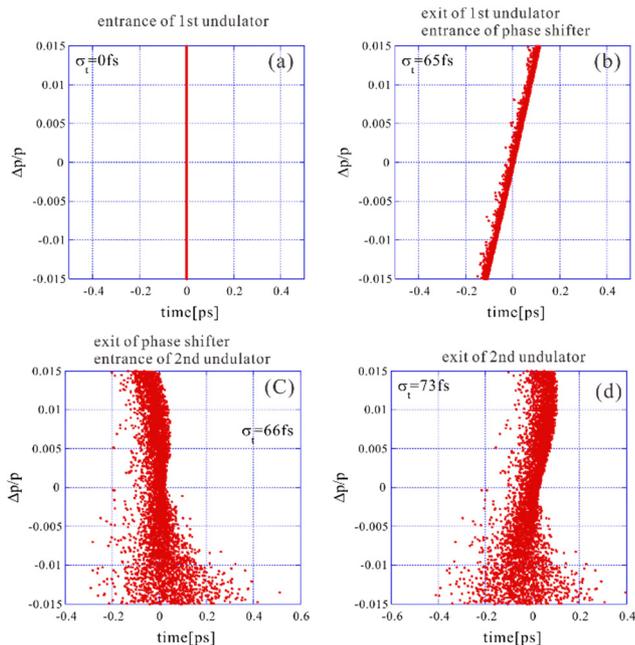


Figure 3: Longitudinal phase space distribution deduced by tracking of the chicane configuration. (a) at entrance of 1st undulator, (b) at exit of 1st undulator or at entrance of the phase shifter, (c) at exit of the phase shifter or at entrance of 2nd undulator, (d) at exit of 2nd undulator.

に達しておりこの伸長は横方向のエミッタンスによるものであることが分かった。

計算結果からシケイン型移相器では T_{566} などの高次の効果が無視できないために強い6極が必要でありそのためにより高次の効果を誘発していることが確認された。

6 マルチバンド型移相器

次にマルチバンドを用いたアーク型移相器の検討を行った。先に述べた通り通常のシケインは $a_p < 0$ であるので $R_{56} > 0$ であり、 $R_{56}^{\text{Und}} = 2.2317\text{ mm}$ を打ち消すためにはバンドの間に比較的強い四極電磁石が必要だった。一方アーク型では一般に $a_p > 0$ であるために R_{56} を負にしやすい。2 台のバンドで構成されたアークではアクロマート条件を課すと R_{56} は一意に決まってしまう。 R_{56} の調整が行えるようにするために 3 台のバンドを用いたトリプルベ

ンドアクロマート(TBA)型の移相器について検討を行った。レイアウトを Figure 4 に示す。バンドは 4 極成分を持つ機能複合型偏向電磁石で偏向角は高次の効果の抑制と実験室の制約のため 7 度としており全偏向角は 21 度となっている。

計算した光学系を Figure 5 に示す。先ほどと同様にこの光学系を使ってトラッキングを行った。結果を Figure 6 に示す。Figure 6 (b), (c)からわかるように 1 台目のアンジュレータで発生した分布の傾きを移相器が補正して 2 台目のアンジュレータに縦方向移相空間で立ったビームを入射できている。またその時のバンチ伸長は 16 fs に抑えられており 100 fs 程度のビームにとっては十分無視できる値となっている。Figure 6 (C)を見ると若干 T_{566} の効果は見て取れるが十分小さいことがわかる。

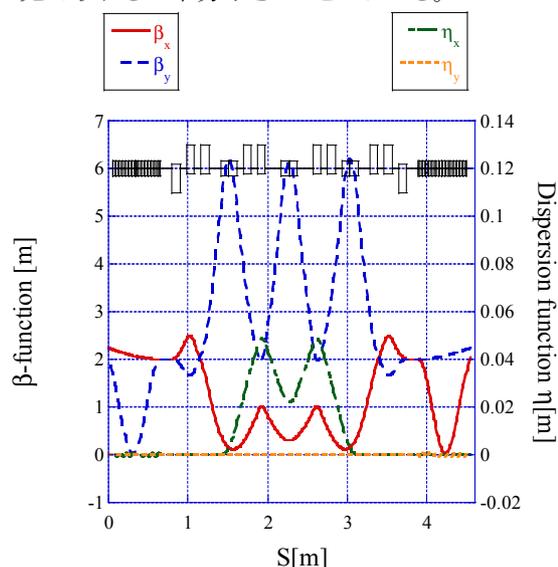


Figure 5: Beam optics of TBA type phase shifter.

計算結果から TBA 型の移相器は高次の磁石を使用することなく十分にバンチ伸長が抑えられると分かったので実証実験に向けて TBA 型の移相器の実機の検討に入った。

7 磁石設計

前節の計算から各磁石の強度は決まったが交叉型アンジュレータの実証実験を行う上で 1 台目のアンジュ

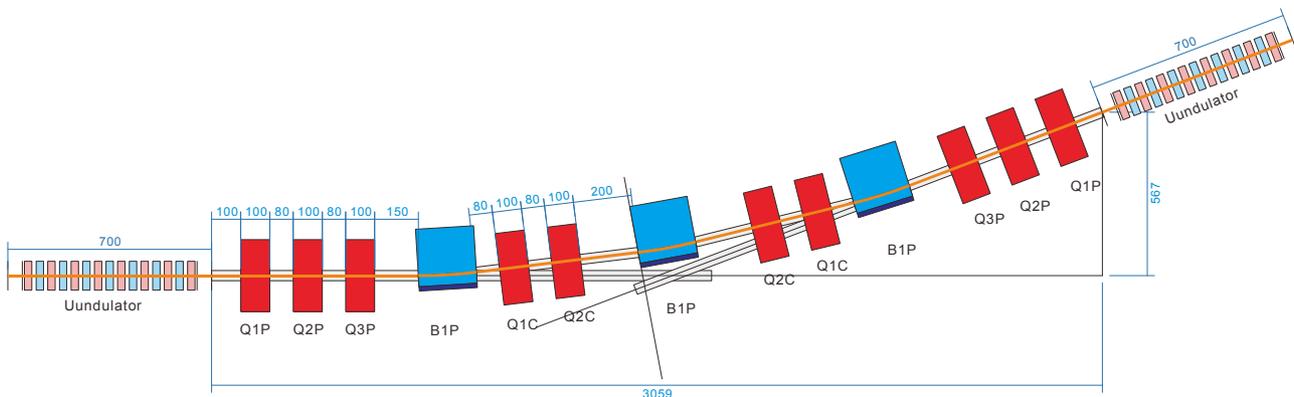


Figure 4: Layout of triple bend achromat phase shifter.

レータ光からの THz光をビームラインの外の光学遅延回路に通さなくてはならない。Figure 4 にアンジュレータ光の光軸も示してあるが偏向電磁石の偏向角が7度と浅いために非常にタイトな構成になっている。特にベンド間にある4極電磁石(Q1C, Q2C)は光のダクトが磁石内を通過する必要がある。また、偏向電磁石は4極との機能複合型電磁石でありその強さはそれぞれ0.0448 T(二極成分)、1.16 T/m(四極成分)で n 値は42.4 と非常に大きな値になる。このように光学移相器に用いる偏向電磁石は大きな n 値を持つためにほとんど4極磁石に近い設計になる。

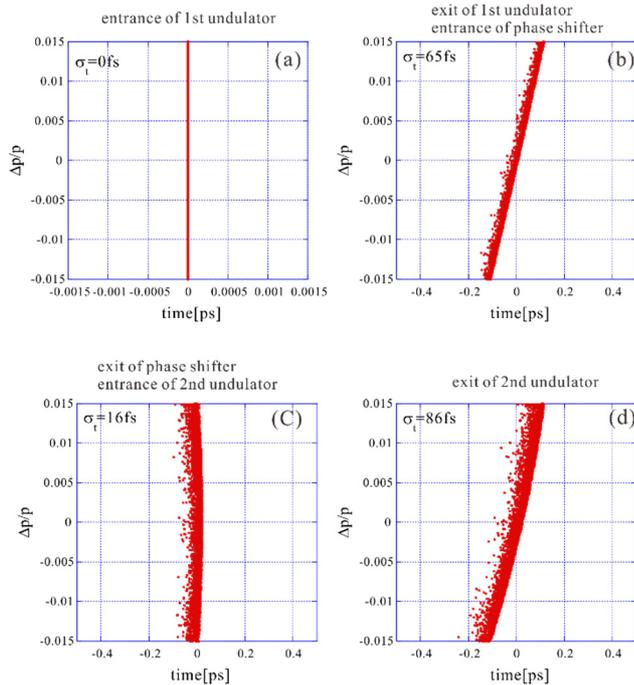


Figure 6: Longitudinal phase space distribution deduced by tracking of the TBA phase shifter. (a) at entrance of 1st undulator, (b) at exit of 1st undulator or at entrance of the phase shifter, (c) at exit of phase shifter or at entrance of 2nd undulator, (d) at exit of 2nd undulator.

Figure 7 に現在検討中の偏向電磁石を示す[7]。非常に大きな n 値のために4極電磁石を半割にしたような構造をしており磁場の均一性を上げるために磁気ミラープレート配している。

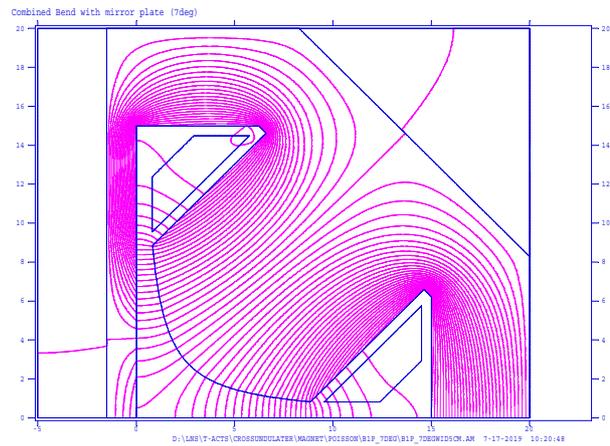


Figure 7: POISSON result of the combined magnet of phase shifter.

4極電磁石 Q1C, Q2C についても同様の検討を行っており光のダクトとの共存は可能であることが示唆されている。

8 まとめと今後の展望

交叉型アンジュレータにおける重要な構成要素である光学移相器の設計を行った。シケイン型とマルチバンド型の移相器について検討を行ったがマルチバンド型 TBA の移相器を用いることで高次の磁石を用いることなしにバンチ伸長は16 fs に抑えることができることが分かった。現在実証機に向けた詳細設計を行っており電磁石についての形状をほぼ決定した。今後アンジュレータ光の遅延回路の詳細を詰めて移相器の設計を固めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] J. Xu *et al.*, *Astrobiology* 3, 489 (2003).
- [2] H. Saito *et al.*, *Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. Melbourne, Australia, May, 1769-1771* (2019).
- [3] H. Wiedemann, "Particle Accelerator Physics I", Springer-Verlag, 1999.
- [4] S. Kashiwagi *et al.*, *Energy Procedia*, vol.89, pp. 346-352, 2016.
- [5] H. Saito in these proceedings.
- [6] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/SADHelp.HTML>
- [7] J. H. Billen and L. M. Young, "Poisson Superfish", LA-UR-96-1834.