

横方向傾斜磁場アンジュレータの検討

STUDY OF TRANSVERSE GRADIENT UNDULATOR

武藤俊哉[#], 柏木 茂, 日出 富士雄, 南部 健一, 三浦 禎雄, 長澤 育郎, 高橋 健, 鹿又 健, 柴田 晃太郎, 齊藤 寛俊, 山田 悠樹, 山本 大貴, 山田 志門, 濱 広幸

Toshiya Muto[#], Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Kenichi Nanbu, Sadao Miura, Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi, Ken Kanomata, Koutaro Shibata, Hirotohi Saito, Hiroki Yamada, Daiki Yamamoto, Shimon Yamada, Hiroyuki Hama
Reserch Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

Abstract

Laser Wake-Field Acceleration (LWFA) can produce high energy electron beam with low emittance and high peak current. However, the energy spread of beam is quite large. By the large energy spread, enough coherent FEL radiation can't be generated. Transverse gradient undulator (TGU) which has transverse field variation is one of solutions to reduce the effects of energy spread on FEL performance. The validity of TGU will be demonstrated at test Accelerator as Coherent THz Source (t-ACTS), ELPH, Tohoku University. In this report, we will introduce our TGU experiment and some calculation of TGU.

1. はじめに

レーザー航跡場加速(Laser Wake-Field Acceleration: LWFA)[1]は、理論的にわずか 1 cm 程度の加速距離で 1 GeV 級の高エネルギー電子ビームの生成が可能とされ、現在使われている高周波(RF)加速器を凌駕する革新的な加速技術と期待されている。既に数 GeV の電子ビームの生成が実証されており、世界各国で実用化に向けた研究開発が行われている[2-9]。LWFA を用いた加速器はその高加速勾配から、世界に数台しかない X-FEL 施設のような大型加速器[10-12]を大幅に小型化する可能性を有している。しかしながら現在の LWFA では X-FEL 等が要求するような安定で高品質な電子ビームを生成することは難しい。その電子ビームのエネルギー広がりには数%持ち、またショットごとに中心エネルギーが揺らいでおり、従来型の RF 加速器からのビームに未だ及ばない。そのような LWFA ビームのエネルギー広がりへの影響を抑制する方法として横方向傾斜磁場アンジュレータ(Transverse Gradient Undulator:TGU)を用いた手法が提案されている[13]。

2. Transverse Gradient Undulator (TGU)

アンジュレータの発振波長 λ_r は

$$\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (1)$$

で表される。ここで λ_u はアンジュレータの周期長、 γ は電子のローレンツ因子、 K はアンジュレータの偏向定数である。電子ビームがエネルギー広がり $\Delta\gamma/\gamma$ を持つ場合、その発振波長の広がり $\Delta\lambda_r/\lambda_r$ は

$$\frac{\Delta\lambda_r}{\lambda_r} = 2 \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \quad (2)$$

となる。

TGU はアンジュレータの蛇行運動面の横(x)方向に傾

斜する磁場強度分布を持たせたアンジュレータのことで、

$$\frac{\Delta K}{K} = \alpha x \quad (3)$$

の磁場強度分布を持つ。ここで α は磁場勾配の大きさを表す。

このアンジュレータをエネルギー分散関数 η があるビームライン上に配置することで電子ビームのエネルギー広がり $\Delta\gamma/\gamma$ に応じたアンジュレータ磁場を通過させることが出来、すべての電子を同一波長に共鳴させることが可能になる。

TGU の位置における横方向の位置偏差 x は

$$x = \eta \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \quad (4)$$

で書けるので Eq. (1), (3), (4)からエネルギー分散関数 η を

$$\eta = \frac{2 + K^2}{\alpha K^2} \quad (5)$$

に合わせることで TGU はすべての電子のエネルギーにおいて同一波長で発振することが出来る。このことはエネルギー分散の抑制だけではなく、電子ビームの中心エネルギーのジッター等にも有効で安定した波長でのアンジュレータ発振を促す。

最も単純に TGU が要求するような磁場勾配を持たせる方法としては Figure 1 に示すようにアンジュレータの上下の磁極に広がり角 2ϕ を持たせることである。その時、磁場勾配 α は

$$\alpha = 2\phi \left(\frac{5.47}{\lambda_u} - 3.6 \frac{g}{\lambda_u^2} \right) \quad (6)$$

と表すことが出来る。ここで g は磁極の平均ギャップである。

[#] muto@lns.tohoku.ac.jp

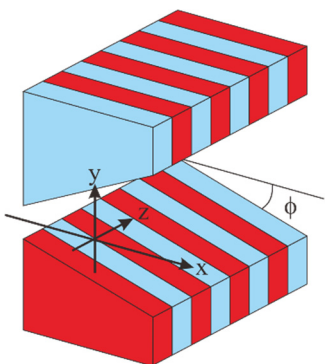


Figure 1: Transverse Gradient Undulator.

3. t-ACTS での実証実験

我々は東北大学電子光物理学研究センターにある試験加速器 t-ACTS(test Accelerator as Coherent THz Source)の電子ビームを用いて TGU の実証実験を計画している。t-ACTS の電子ビームは velocity bunching 法[14]を用いることで電子エネルギー $E_0=23$ MeV で 80 フェムト秒程度のバンチ長を実現している[15]。そのエネルギー広がり は 1%程度であるが velocity bunching の性質上さらに 数%程度まで広げることができるので LWFA に類似した エネルギー広がりを持つ電子ビーム生成が可能であり、 TGU の実証には適していると考えられる。また、t-ACTS では交叉型アンジュレータを用いた偏光可変光源の研究が進められており[16]、2 台のアンジュレータの間にある移相器は TGU におけるエネルギー分散関数を調整す

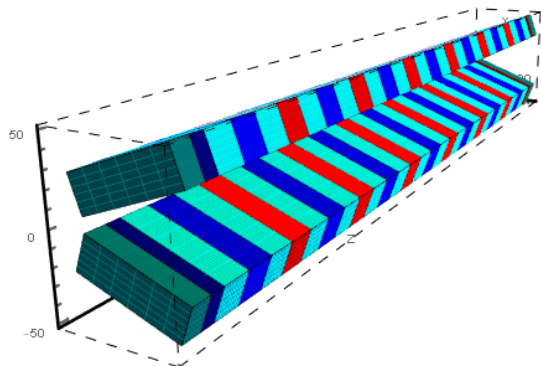


Figure 3: Geometry of TGU at $2\phi=40\text{deg}$.

るための光学的な自由度を持っている[17]。したがって交叉型アンジュレータの 2 台目のアンジュレータを TGU に置き換えることで実験が可能となる(Figure 2)。

TGU はすでに製作済みの交叉型アンジュレータのために製作されたアンジュレータの一台を改良することを考えている。既存のアンジュレータのパラメータを Tabel 1 にまとめる。

Table 1: Undulator Parameters

Magnet array	Halbach type
Block dimension	70mm x 23mm x 20mm
Period length λ_u	80mm
Number of periods	7
Total length	587mm
Magnet material	NdFeB
Residual magnetic field	1.22T
Gap	33mm

Table 1 の磁石列を用いて TGU を構成する。磁極の広がり角 $2\phi = 40$ 度とした場合(Figure 3)の磁場分布を磁場計算コード Radia[18]を用いて計算した。横(x)方向

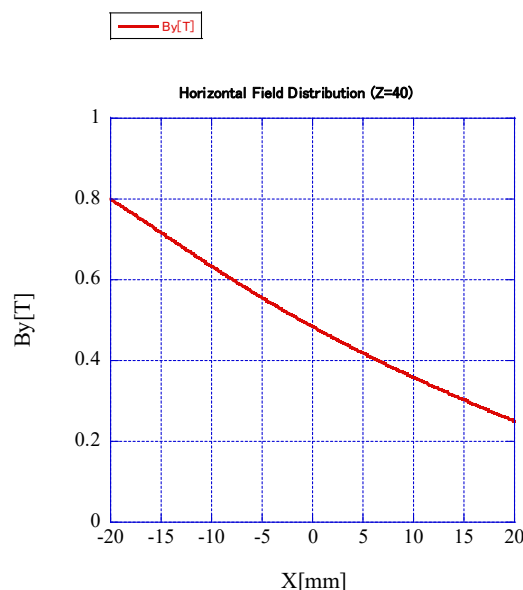


Figure 4: Calculated Horizontal Magnetic Field Distribution of TGU.

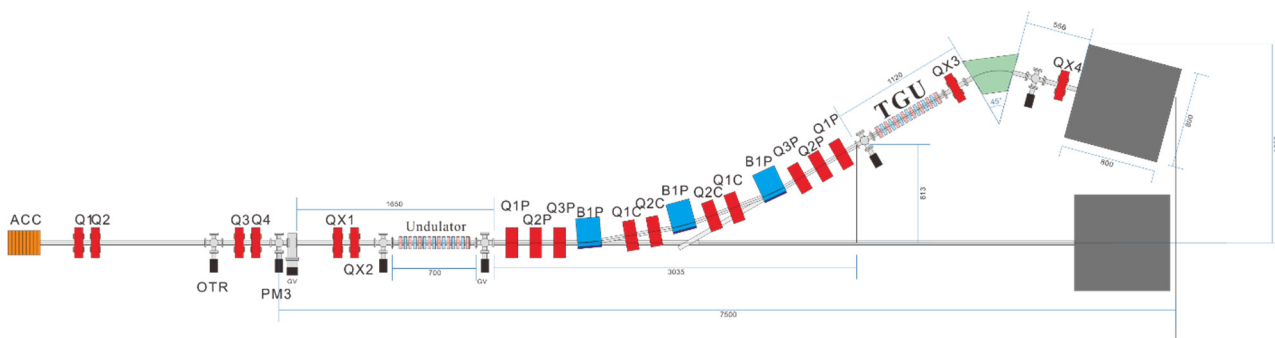


Figure 2: Layout of TGU experiment at t-ACTS. Red squares are quadrupole magnets. Blue squares are Bending magnets. TGU will be installed at the downstream of phase shifter.

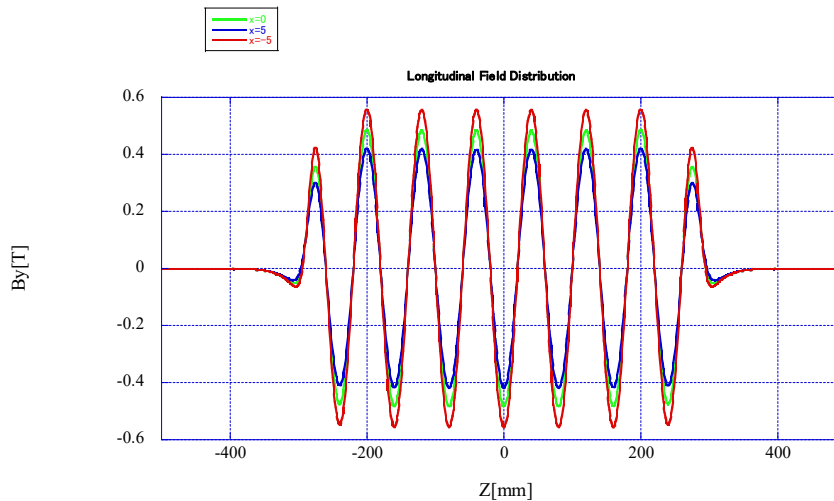


Figure 5: Calculated Longitudinal Magnetic Field Distribution of TGU.

と軸(z)方向の磁場分布を Figure 4, Figure 5 にそれぞれ示す。Figure 4 から $x=0$ において $K=3.62$ 、磁場勾配 $\alpha=-28.3$ と求めた。したがって Eq. (5)より TGU に適合するエネルギー分散関数 $\eta=0.041$ m となる。Figure 5 にある通り、縦(z)方向全体にわたって横(x)方向の位置によって磁場強度が変わっていることがわかる。

また現在は得られた磁場を使ってビームのトラッキングを行いそこから発生するアンジュレータ光の計算を始めている。同様に必要な分散関数を得るための光学系の計算を進めている。

4. まとめと今後の予定

我々のグループでは横方向傾斜磁場アンジュレータ TGU を用いたエネルギー分散抑制の実証実験を東北大 ELPH の試験加速器 t-ACTS の電子ビームを用いて行うことを計画している。t-ACTS の電子ビームを用いることで LWFA ビームのような数%のエネルギー広がりを模擬することができるのと同時に LWFA ビームよりも安定した電子ビームを供給することができるので TGU の有用性を証明するのに有効であると考えている。3 次元の磁場計算により TGU に必要な磁場勾配を得られることが分かり、現在アンジュレータの改良に向けた準備を進めている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 基盤研究(C) 21K12533 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] T. Tajima and J.M Dawson, *Phys. Rev. Lett.* **43** (1979) 267.
 [2] Faure, J. *et al.*, Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefields by colliding laser pulses. *Nature* **444**, 737–739 (2006).
 [3] Corde, S. *et al.*, Observation of longitudinal and transverse self-injections in laser-plasma accelerators. *Nat. Commun.* **4**, 1501 (2013).
 [4] Gonsalves, A. J. *et al.*, Tunable laser plasma accelerator based on longitudinal density tailoring. *Nat. Phys.* **7**, 862–866 (2011).

[5] Buck, A. *et al.*, Shock-front injector for high-quality laser-plasma acceleration. *Phys. Rev. Lett.* **110**, 185006 (2013).
 [6] Liu, J. S. *et al.*, All-optical cascaded laser wakefield accelerator using ionization-induced injection. *Phys. Rev. Lett.* **107**, 035001 (2011).
 [7] Wang, W. T. *et al.*, High-brightness high-energy electron beams from a laser wakefield accelerator via energy chirp control. *Phys. Rev. Lett.* **117**, 124801 (2016).
 [8] Steinke, S. *et al.*, Multistage coupling of independent laser-plasma accelerators. *Nature* **530**, 190–193 (2016).
 [9] Gonsalves, A. J. *et al.*, Petawatt laser guiding and electron beam acceleration to 8 GeV in a laser-heated capillary discharge waveguide. *Phys. Rev. Lett.* **122**, 084801 (2019).
 [10] Ackermann, W. *et al.*, Operation of a free-electron laser from the extreme ultraviolet to the water window. *Nat. Photon.* **1**, 336–342 (2007).
 [11] Emma, P. *et al.*, First lasing and operation of an angstrom-wavelength free-electron laser. *Nat. Photon.* **4**, 641–647 (2010).
 [12] Ishikawa, T. *et al.*, A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region. *Nat. Photon.* **6**, 540–544 (2012).
 [13] Z. Huang, Y. Ding and C. Schroeder, *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 204801.
 [14] L. Serafini, M. Ferrario, Velocity bunching in photo-injectors, AIP Conf. Proc., 581 (2001), pp. 87-106.
 [15] H. Hama *et al.*, Demonstration of Coherent Radiation Generation up to 3 THz from Femtosecond Electron Pulses, *Int J Opt Photon. Eng.* **2** (2017), p. 004.
 [16] H. Saito *et al.*, Characteristics of Polarized Coherent Radiation in THz Region from a Crossed-Undulator (II), Proceeding of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan 445-448 (2019).
 [17] N. Morita *et al.*, Design and Development of Phase Shifters for Crossed Undulator, Proceeding of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan 157-160 (2019).
 [18] O. Chubar *et al.*, A three-dimensional magnetostatics computer code for insertion devices, *J. Synchrotron Rad.* **5**, 481-484 (1998).