

# 超短パルス電子ビーム発生のためのレーザー変調におけるアンジュレータ UNDULATOR IN LASER MODULATION FOR ULTRASHORT ELECTRON BUNCHES

菅晃一<sup>#</sup>, 神戸正雄, 楊金峰, 吉田陽一

Koichi Kan<sup>#</sup>, Masao Gohdo, Jinfeng Yang, Yoichi Yoshida

SANKEN (The Institute of Scientific and Industrial Research), Osaka University

## Abstract

Laser modulator which increases energy spread of electron bunches is composed of a laser and undulator. A laser modulator is expected to modulate electron bunch energy resulting in density modulation of electron bunch with a period of the wavelength of the laser. In this paper, measurement results of undulators for the laser modulation are presented.

## 1. はじめに

フェムト秒・ピコ秒パルス幅を有する電子ビームは、自由電子レーザー、パルスラジオリシス等の加速器物理、物理化学の研究に応用されている。そのため、短パルス電子ビーム発生は、高品質な光源開発や時間分解計測における時間分解能向上のために不可欠となっている。これまでに阪大産研では、フェムト秒電子ビームとフェムト秒レーザーを用いて、フェムト秒時間分解能を有するパルスラジオリシス(過渡吸収分光法)を開発・利用してきた。今後、パルスラジオリシスの時間分解能を向上するためには、さらに短い電子ビームが必要となる。これまでに電子ビーム発生では、フォトカソード高周波(RF, radio frequency)電子銃にピコ秒またはフェムト秒紫外光を照射し、光電子を電子ビームとして利用してきた。さらに、発生した電子ビームを加速管によりエネルギー変調し、アクロマティックアークの磁気パルス圧縮器により約 30 MeV のフェムト秒電子ビームを発生してきた。光電子発生にフェムト秒レーザーを用いて、さらに空間電荷効果を低減した場合は、フェムト秒電子銃と磁気パルス圧縮の最適化により、マイケルソン干渉計を用いて 20 フェムト秒の電子ビーム計測を行うことが可能になっている[1]。

新たな電子ビーム圧縮技術の開発において、さらに短パルスの電子ビームパルス列もしくは単パルスを得るためのレーザー変調は有用な手段であることが期待される。レーザー変調とは、アンジュレータ周期磁場中にレーザーと電子ビームを照射することにより、電子ビームの(パルス中のスライス)エネルギー分散を増大させる手法である。一般的には、単一パルスのレーザー光がレーザー変調に用いられ、X線自由電子レーザーの施設では自由電子レーザーのX線強度の増強および安定化のために用いられている[2]。また、レーザー光が存在しない時刻はレーザー変調が行われなため、時間的に強度変調したレーザー光を用いた場合は変調によるエネルギー分散の増大が進行方向のスライスごとに異なる電子ビーム発生も可能となる。そのため、レーザー変調に使用するレーザーの時間プロファイルの操作も、レーザー変調に関連した研究の種類を広げてきた。例えば、マイケルソン干渉計等により、2つに分岐されたレーザー光を合流させてレーザーの持つチャープを利用してレ

ザーの時間的な強度変調、つまり、チャープドパルスビーティング[3]等を利用する報告がある。サブピコ〜ピコ秒オーダーのうなりによる光の強度変調を用いて、円形加速器におけるテラヘルツ放射[4]、フォトカソードベースの加速器による高出力テラヘルツ光源の提案[5,6]が行われている。いずれにしても、効率的なレーザー変調を行うためには、入射電子ビームエネルギー・エネルギー分散、使用レーザーの波長・ピークパワー、アンジュレータの発振波長・磁場強度(K値)、下流のビーム光学系(主に $R_{56}$ )の設計が不可欠である。そのような設計や最適化により、例えば、電子ビームの変調波長におけるバンチング因子を高める等の、効率的なレーザー変調が可能となる。

そこで、本報告では、レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生のためのアンジュレータの測定について述べる。レーザー変調に使用を検討している2台のアンジュレータの磁場測定を行った。

## 2. レーザー変調のためのアンジュレータ

レーザー変調の効果の最適化を行う場合は、光源として使用した場合のアンジュレータの発振波長と使用するレーザーの波長を一致させる必要がある。

直線偏光アンジュレータの場合、水平方向と電子ビームの蛇行方向に $x$ 軸、垂直方向と磁場の方向に $y$ 軸、ビーム進行方向に $z$ 軸を定義し、アンジュレータの磁場の垂直成分 $B_U$ を、

$$B_U = B_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda_U} z \quad (1)$$

とする。ここで、 $B_0$ は磁場の振幅、 $\lambda_U$ は磁場の周期長である。同時に、電子ビームが磁場を通過した際に増幅される電磁波の基本波の発振波長 $\lambda_L$ は、磁場の強度を表すK値を用いて、共鳴条件下で、下記のように表される。

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

$$K = \frac{eB_0\lambda_U}{2\pi mc} \quad (3)$$

<sup>#</sup> koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

ここで、 $\gamma$ は電子のローレンツ因子、 $m$ は電子の静止質量、 $c$ は真空中の光速である。

電子ビームエネルギー32.5 MeV ( $\gamma \sim 64.6$ )において、既存のレーザー波長800 nmを考慮し、アンジュレータの基本波の共鳴波長で800 nmを満たすような周期長を検討した。その結果、磁場周期長 $\lambda_U$ を6.6 mmとし、K値/磁場振幅が、0.15/0.25 TであればEq. (2)を満たすことができる。

### 3. アンジュレータの測定と結果

前節の計算結果を基に、2つのアンジュレータを準備し、磁場 $B_y$ の測定を行った。Figure 1は測定系とアンジュレータの写真を示す。ホール素子(THS106A)をアンジュレータ中で掃引し、ステージのパルス移動完了トリガでホール素子の出力電圧をDAQ(Data Acquisition)により測定した。Table 1に測定したアンジュレータの特性を示す。

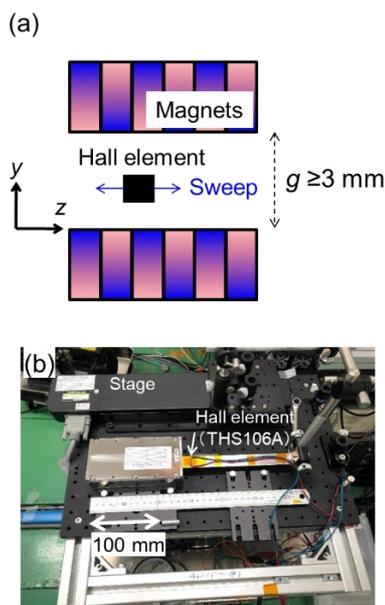


Figure 1: (a) Measurement of magnetic field in undulator. (b) Picture of measurement.

Table 1: Characteristics of Undulators

Undulator	Product of NEOMAX ENGINEERING	Homemade prototype
Period length (mm)	6.6	
Magnetic field (T)	0.25 at fixed $g = 3.5$ mm	0.2-0.4 (adjustable with $g > 3$ mm)
Period number	20	

Figure 2にアンジュレータの端の数周期の磁場分布測定結果を示す。Figure 2(a)は製品(product)の測定結果であり設計通り0.25 Tの磁場を達成していることが分かつ

た。Figure 2(b)は試作品(prototype)の測定結果であり、ギャップ長 $g$ を調整して変化する磁場分布を示し、0.2 ~ 0.4 Tまで調整可能であることが分かった。今後、磁場分布の解析を行い、アンジュレータの改良の検討を行う。一方、Elegant計算コードを用いて、レーザー変調の程度(バンチング因子等)の電子ビームエネルギー(中心値、幅)依存性の調査も行う。最終的にレーザー変調実験へ展開する。

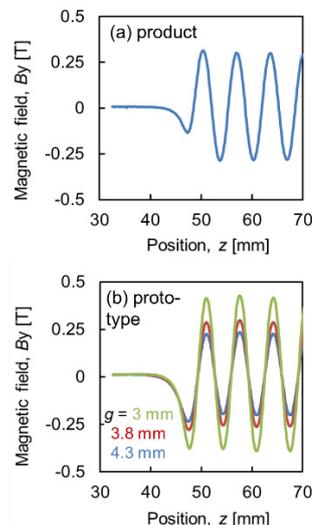


Figure 2: Magnetic fields of (a) the product and (b) prototype with three different gap lengths.

### 4. まとめ

レーザー変調のためのアンジュレータの磁場測定を行った。2つのアンジュレータで、磁場周期長6.6 mm、磁場振幅0.25 Tを達成できた。今後、エネルギー30 MeV台の電子ビームに対して、波長800 nmのレーザーを用いた、レーザー変調実験へ展開する。

### 謝辞

本研究は、科研費(15H05565, 17H01374, 19K05331, 20H00364)による支援を受けました。

### 参考文献

- [1] I. Nozawa *et al.*, “Measurement of <20 fs bunch length using coherent transition radiation”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 072803 (2014).
- [2] Z. Huang *et al.*, “Measurements of the linac coherent light source laser heater and its impact on the x-ray free-electron laser performance”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 020703 (2010).
- [3] A. S. Weling *et al.*, “Generation of tunable narrow-band THz radiation from large aperture photoconducting antennas”, Appl. Phys. Lett. 64, 137 (1994).
- [4] S. Bielawski *et al.*, “Tunable narrowband terahertz emission from mastered laser–electron beam interaction”, Nat. Phys. 4, 390 (2008).
- [5] Z. Zhang *et al.*, “Generation of high-power, tunable terahertz radiation from laser interaction with a relativistic electron beam”, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 050701 (2017).
- [6] K. Kan *et al.*, “Intense THz source based on laser modulator

**PASJ2021 WEP011**

and bunch compressor with electron beam ranging from 35 to 50 MeV”, Proc. of Nonlinear Dynamics and Collective Effects in Particle Beam Physics, 2019, pp.285;  
[https://doi.org/10.1142/9789813279612\\_0024](https://doi.org/10.1142/9789813279612_0024)