

レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生の研究

STUDY ON GENERATION OF ULTRASHORT ELECTRON BUNCHES USING LASER MODULATOR

菅晃一^{#, A)}, 楊金峰^{A)}, 神戸正雄^{A), B)}, 吉田陽一^{A)}

Koichi Kan^{#, A)}, Jinfeng Yang^{A)}, Masao Gohdo^{A), B)}, Yoichi Yoshida^{A)}

^{A)} ISIR, Osaka University

^{B)} Graduate School of Engineering, Osaka City University

Abstract

Laser modulator which increase energy spread of electron bunches are 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, designs and test results of the undulator for short bunch generation via laser modulation are reported. The undulator had a magnetic period of 6.6 mm and field of ~0.2 T at 1.5 mm away from the magnet top which correspond to fundamental oscillation wavelength of 800 nm for electron bunch with 32.5 MeV.

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[1-4]、パルスラジオリシス[5-7]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)[5]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入射し、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[8]。

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入射することにより、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[9]。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ー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[10]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[11]、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[12,13]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研究の進捗について述べる。将来的な目標として、フォトカソードRF電子銃加速器からのフェムト秒電子ビーム(エネルギー35MeV、電荷量<10 pC、パルス幅<10 fs)に対して、レーザー変調を適用し、アト秒電子ビームパルス列もしくは単パルスを得ることを目指している。また、使用アンジュレータは、発振波長をレーザーの波長と同一にする必要があり、基本波の発振波長が800 nmとなるような磁場を想定している。レーザーについては、発振波長800 nm、パルスエネルギー数100 uJ/pulseオーダーのTi:Sapphireレーザーを使用する。そのため、要素技術の一部である、アンジュレータ試作の進捗について、報告する。

2. レーザー変調における電子ビーム等のパラメータ

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を変化させるために、電子ビームエネルギーもしくはアンジュレータ

[#]koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

パラメータを変化させる等の方法がある。しかし、変化可能なパラメータには限界があるために、エネルギー 32.5 MeV の電子ビームに対する、アンジュレータの基本波の発振波長が 800 nm となるようなアンジュレータの条件を算出する。

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、 λ_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 λ_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。

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

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

ここで、 γ 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。

まず、レーザー変調におけるアンジュレータは、発振波長をレーザーの波長と同一にする必要がある。加えて、可能な限り、高い K 値で低次の発振波長における相互作用、高ピークパワーのレーザーを用いる事が、レーザー変調の効率を高めるための必須項目である。一般的に磁石を用いたアンジュレータ製作では、短い周期長では高い磁場を発生することが困難であるため、達成できそうな周期長と磁場強度の両方を考慮しながら、レーザー変調に適した条件を探す必要がある。

Figure 1 に、磁場周期長 λ_U を 6.6 mm に固定し、電子ビームエネルギーを 32.5 MeV ($\gamma \sim 64.6$) もしくは 35 MeV ($\gamma \sim 69.5$) とした場合、発振波長 λ_L および磁場振幅 B_0 の K 値依存性を示す。2 種類のビームエネルギーを検討するのは、電子ビームエネルギーで波長を最適化する可能性を考慮したためである。32.5 MeV の条件において、 λ_L を 800 nm とするためには、 K 値/磁場振幅は、0.15/0.25 T の条件が必要である。一方、想定している加速器の最大電子ビームエネルギーについて、35 MeV の条件において、 λ_L を 800 nm とするためには、 K 値/磁場振幅は、0.58/0.94 T の条件が必要であるが、磁場強度の高さから困難であることが予想される。

3. 片側のアンジュレータの計算

前章で示したようなアンジュレータの製作可能性を見積もるために、Poisson Superfish[14]を用いて、数値計算を行った。磁場の周期長が 6.6 mm であるため、その半分の長さである 3.3 mm の磁石の配列について計算を行った。計算では、進行 z 方向に 3.3 mm、垂直 y 方向に 10 mm の大きさの磁石列を用いた。Figure 2(a)に、40 個の磁石の計算の一部である 10 個の電磁石の配置と座

標系を示す。Figure 2(b)により、約 5 周期の磁場で、磁石上端から 1.5 mm 離れたビーム進行方向の軸上では、片側のアンジュレータではあるが、約 0.2 T の磁場を発生できることが分かった。今後、上下に配置して、磁石配列の間に電子ビームとレーザーを通過させることにより、レーザー変調用のアンジュレータとしての利用可能性が期待される。

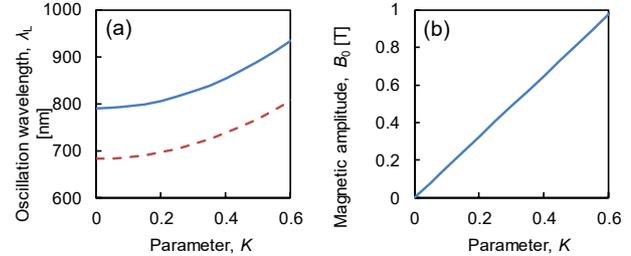


Figure 1: (a) Oscillation wavelength λ_L as a function of undulator parameter K in condition of undulator period λ_U of 6.6 mm. Solid and dashed lines denotes cases for electron beam energies of 32.5 and 35 MeV, respectively. (b) Magnetic amplitude B_0 as a function of undulator parameter K in condition of undulator period λ_U of 6.6 mm.

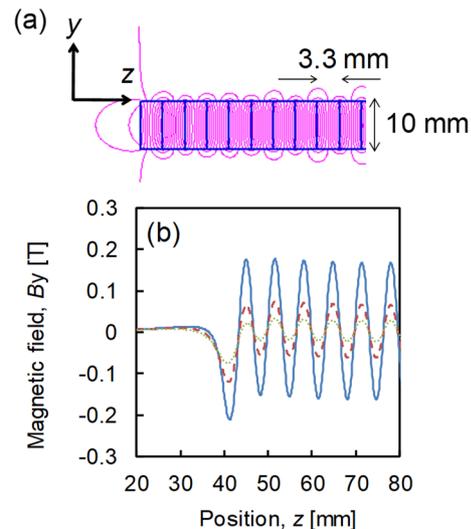


Figure 2: (a) Simulation of magnetic field using Poisson Superfish. Directions of y and z are defined. Top of the magnets corresponds to $y = 0$. (b) Simulation results of magnetic field along longitudinal direction z . Solid, dashed, and dotted lines denotes cases of $y = 1.5, 2.5,$ and 3.5 mm, respectively.

4. 片側のアンジュレータの測定結果

Figure 3 に、片側のアンジュレータの測定結果を示す。Figure 3(a)に模式図に示すような系で磁場測定を行った。磁石は、ネオジウム磁石 (30 × 3.3 × 10 mm, N54, NeoMag) である。ホール素子 (THS106A, TOSHIBA) を光学ス

ステージ(OSMS26-(X), SIGMAKOKI)に設置し、ビーム進行 z 方向に垂直 y 方向磁場の測定を行った。ステージを掃引した際に出力されるホール電圧を、データ収集・制御装置(USB-6216, National Instruments)により記録した。予め、ホール電圧の校正では、本研究のホール素子と校正済みのホール素子(GM-5015, Denshijiki Industry)を偏向電磁石内に設置し、電磁石の励磁電流により誘起される磁場を変化させ、本研究の素子のホール電圧と校正済み素子の示す磁場の関係を測定する事により、校正を行った。ホール素子は、3端子レギュレータ(LM317)を用いた定電流回路(5 mA)による駆動し、本研究のホール素子のホール電圧の係数は、1.1 V/Tと得られた。また、磁場<0.6 Tではホール電圧は磁場に対してほぼ線形であることも校正により分かった。Figure 3(b)の写真に示すように、定盤上に計算の場合と同様である40個のネオジウム磁石を、片側のアンジュレータとして設置し、ホール素子の垂直方向の位置を変化させて、ビーム進行方向に掃引した。磁場の周期数は20であり、磁石列の全長は132 mm(40×3.3 mm)となる。

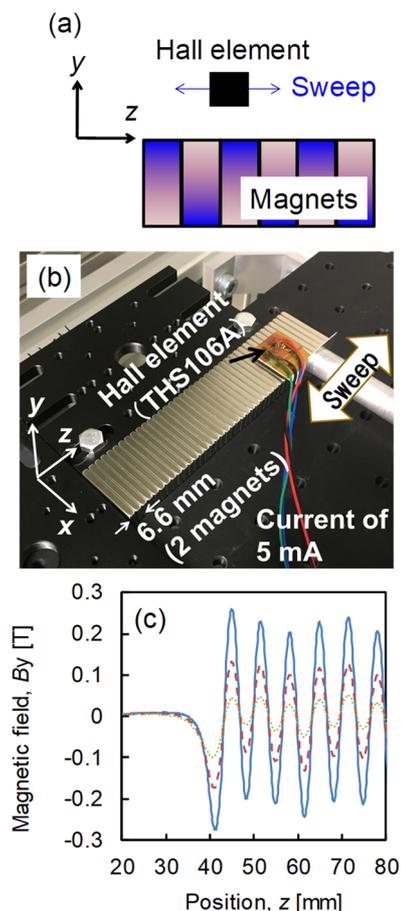


Figure 3: (a) Schematic diagram of measurement of magnetic field. Top of the magnets corresponds to $y = 0$. (b) Picture of measurement. (c) Experimental results of magnetic field along longitudinal direction z . Solid, dashed, and dotted lines denotes cases of $y = 1.5, 2.5,$ and 3.5 mm, respectively.

Figure 3(c)の、約5周期の磁場を示すように、ビーム進行方向で周期的に振動する垂直方向の磁場が得られた。計算からも予想されるように、磁石に近い方が磁場の振幅は大きく、垂直方向の位置 $y = 1.5$ mm において、約0.2 Tの磁場が確認された。しかし、計算とは異なり、Fig. 2(b)と比較すると、磁石の個体差と考えられる最大もしくは最小値の平坦性が損なわれていることが分かる。今後は、磁石の並び替えの検討、両側の磁石列の設置と評価後に、自発放射の確認等を行い、最終的に、レーザー変調実験へ展開する。

5. まとめ

レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生の研究の進捗について、片側のアンジュレータの設計・試作および磁場測定について報告した。レーザー変調のためのアンジュレータとして、磁場の周期長が6.6 mmで、K値/磁場振幅を0.15/0.25 Tとすることにより、光源として使用した場合のアンジュレータの基本波の発振波長は800 nmとなる。片側のアンジュレータの磁場計算を行った。また、試作した片側のアンジュレータの測定では垂直方向の位置1.5 mmにおいて、約0.2 Tの磁場の振幅が確認された。今後は、磁石の並び替えの検討、両側の磁石列の設置と評価後に、自発放射の確認等を行い、最終的に、レーザー変調実験へ展開する。

謝辞

本研究は、科研費(26249146, 15H05565, 17H01374, 19K05331)による支援を受けました。

参考文献

- [1] W. Ackermann *et al.*, Nat. Photonics 1, 336 (2007).
- [2] P. Emma *et al.*, Nat. Photonics 4, 641 (2010).
- [3] T. Ishikawa *et al.*, Nat. Photonics 6, 540 (2012).
- [4] E. Allaria *et al.*, Nat. Photonics 6, 699 (2012).
- [5] J. Yang *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 629, 6 (2011).
- [6] K. Kan *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 83, 073302 (2012).
- [7] T. Kondoh *et al.*, Radiat. Phys. Chem. 84, 30 (2013).
- [8] I. Nozawa *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 072803 (2014).
- [9] Z. Huang *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 020703 (2010).
- [10] A. S. Weling *et al.*, Appl. Phys. Lett. 64, 137 (1994).
- [11] S. Bielawski *et al.*, Nat. Phys. 4, 390 (2008).
- [12] Z. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 050701 (2017).
- [13] K. Kan *et al.*, Nonlinear Dynamics and Collective Effects in Particle Beam Physics, 285 (2019).
- [14] K. Halbach and R. F. Holsinger, Particle Accelerators 7 213-222 (1976).