

レーザー駆動誘電体加速器の設計 DESIGNING OF THE LASER DRIVEN DIELECTRIC ACCELERATOR

小山 和義 ^{*A)}、松村 陽介 ^{B)}、上坂 充 ^{B)}、吉田 光宏 ^{A)}、夏井 拓也 ^{A)}、
アイミアディング アイミドラ ^{C)}

Kazuyoshi Koyama ^{*A)}, Yosuke Matsumura ^{B)}, Mituru Uesaka ^{B)}, Mituhiro Yoshida ^{A)}, Takuya Natsui ^{A)}, Aimidula Aimierding ^{C)}
^{A)}KEK, Japan
^{B)}University of Tokyo, Japan
^{C)}Cockcroft Institute, UK

Abstract

A phase-modulation-masked-type laser-driven dielectric accelerator was studied. Although the preliminary analysis made a conclusion that a grating period and an electron speed must satisfy the matching condition of $L_G/\lambda = v/c$, a deformation of a wavefront in a transmission grating relaxed the matching condition and enabled the slow electron to be accelerated. The simulation results by using the FDTD code, Meep, showed that the low energy electron of 20 keV felt the acceleration field strength of 20 MV/m and gradually felt higher field as the speed was increased. The ultra relativistic electron felt the field strength of 600 MV/m. The Meep code also showed that a length of the accelerator to get energy of 1 MeV was 3.8 mm, the required laser power and energy were 11 GW and 350 mJ, respectively. Restrictions on the laser was eased by adopting sequential laser pulses. If the accelerator is illuminated by sequential N pulses, the pulse power, pulse width and the pulse energy are reduced to $1/N$, $1/N$ and $1/N^2$, respectively. The required laser power per pulse is estimated to be 2.2 GW when ten pairs of sequential laser pulse is irradiated.

1. はじめに

高線量放射線は人体に対して重大な影響を与える事は良く知られているが、きわめて低線量の場合の影響はほとんど分かっていない。50mSv以下の低線量の人体に対するリスク評価は、ガン治療、原子力災害、職業被ばく、放射線テロなどの観点から重要な課題である。しかし、疫学的方法是数十万から数百万以上のサンプル数を必要であるためにあまり有効ではないので、基礎過程の解明から進めようという動きがある。放射線による細胞中のDNAの損傷と修復の過程を解明するために、イオン、電子線、X線などのマイクロビームの発生とその照射技術が開発されているが、装置や施設が大型であるために普及が進んでいない。低線量放射線の細胞への影響を解明するためには装置が小型で光学顕微鏡下でビームを操作できることに加えて、細胞内での化学反応過程を解明できるようにピコ秒以下の超短パルスであることが望ましい。必要なマイクロ電子ビームのエネルギーとパルスの電荷量は、それぞれ数十keV~1MeVと0.01fC~0.1fCである。レーザー駆動誘電体加速器は様々な型が提案されているが、透過型回折格子を向かい合わせた構造の (phase-modulation-masked-type laser-driven dielectric accelerator ; PM-LDA) は他の構造の誘電体加速器よりも単純であり製作も容易であると考えられる^[1]。また、加速チャンネルの断面積を大きくすることが可能なので電荷量を増やす事もできるという利点もある。これまでにPM-LDAのパラメータを解析的に求めたが^[2]、今回はシミュレーションによってより詳しい値を求めた。

2. 加速器のパラメータ

2.1 解析的な方法

PM-LDAの形状はFig. 1(a)に示すように、透過型回折格子を向かい合わせた構造を持ち、格子の周期 L_G 、格子の幅 L_p 、格子の段差(高さ) H_p 、加速チャンネルの間隔 D によって表される。簡単のために、加速チャンネルの幅 W は L_G に比べて十分大きい場合について考える。加速電界はFig. 1(b)(c)に表すように誘電体内部と真空とのレーザーの位相速度の違いによって作られるので、格子の段差(高さ) H_p は、誘電体内部と真空を通ったレーザー光波面の格子先端での位相差が π になる条件から求められる。格子の材料の屈折率を n とし、レーザーの波長 λ で規格化した格子の段差の大きさは、

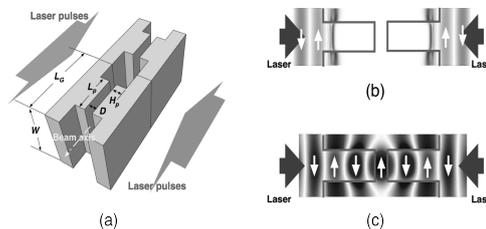


Figure 1: (a) Schematic drawing of two periods of an accelerator unit. (b) The wave front of the laser at the initial stage. (c) The wavefront of the laser at the steady state. White arrows in (b) and (c) express polarization vectors of laser fields.

$$\frac{H_p}{\lambda} \approx \frac{1}{2(n-1)} \tag{1}$$

となる。波長が $1.55\mu\text{m}$ に対する石英の屈折率 $n_{1.55} = 1.523$ を使うと $H_p/\lambda \approx 0.95$ が最適となる。

*koyamakz@post.kek.jp

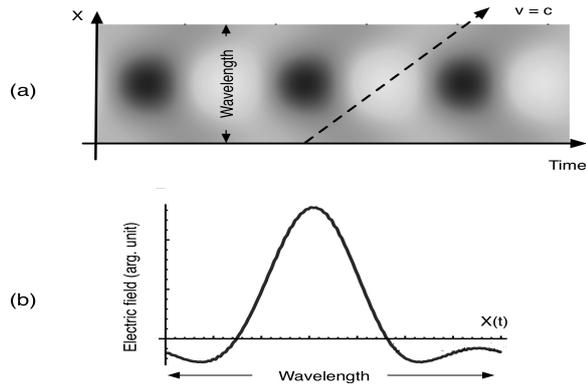


Figure 2: (a) The map of the electric field strength of the laser in x - t space. The black and white correspond to the polarization direction of the alternate field. (b) The electric field along the world line of $v = c$, expressed by the broken line in (a).

加速チャンネルの間隔 D は、加速器の軸上でのレーザー電界の位相の分布に対する回折によるボケの影響が大きいという条件から、

$$\frac{D}{\lambda} \leq \left(\frac{L_p}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{L_G}{2\lambda}\right)^2 \approx \frac{1}{4}. \quad (2)$$

となる。

格子の周期 L_G は、レーザー電界の時間振動と空間分布を正弦波で近似して、電子の速度が非相対論的な場合について入射電子の速度 v_0 と L_G の関係を求めると、

$$L_G/\lambda = v_0/c. \quad (3)$$

となる。

2.2 シミュレーションによる解析

誘電体と真空の境界面での反射や回折などの影響によって、加速電界は解析的に求めた結果からずれるので、FDTDシミュレーションコード；Meepを用いてより詳しい解析を行った^[3]。Meepによって計算した加速器の軸上におけるレーザーの電界分布を $x-t$ 空間での電子の軌道（世界線）に沿って式(4)を用いて積分することによって、加速電界 E_{acc} を求めた。

$$E_{acc} = \frac{1}{L_G} \int_0^{L_G} E(x, t(x)) dx. \quad (4)$$

計算に当たっては、レーザー強度を石英の光学破壊の閾値である $I_L = 10^{13} \text{W/cm}^2$ (8.7GV/m) として^[4]、 $L_G = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $H_p = 0.9\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 、 $D = \lambda/4 = 0.39 \mu\text{m}$ and $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ とした。

反射や回折などの影響で生じた電界の変形の結果、式(3)の速度整合条件が緩和され、Fig. 3(a)に示すように、加速場は小さいものの低エネルギー電子でも加速することができることがわかった。例えば20keVの電子が感じる加速電界は20MV/mであるが、十分高いエネルギーの場合には600MV/mに漸近する。Fig. 3(b)は回折

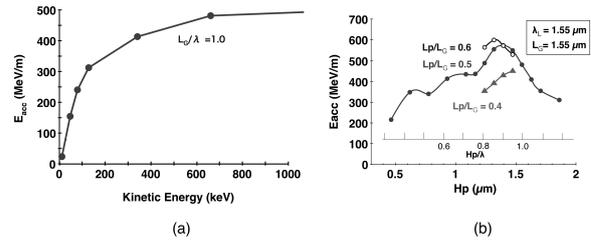


Figure 3: (a) The acceleration field strength as a function of the electron energy. (b) The pillar height dependence of the acceleration field strength.

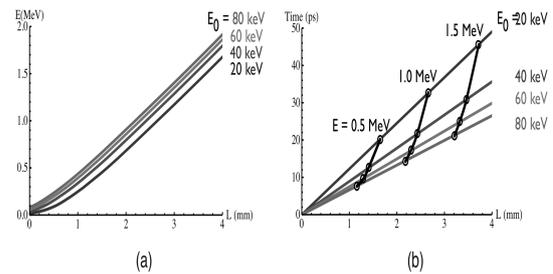


Figure 4: (a) The output energy of electron along the beam axis at various initial electron energies, E_0 . (b) The transit time across the accelerator length.

格子の段差 H_p/λ を変えたときの加速電界 E_{acc} の変化を表した図である。この図から、加速電界が最高になるのは回折格子の L_p/L_G が約0.5の時であり、 H_p/λ は解析解に近い $H_p/\lambda \approx 0.9$ の時である。Fig. 4(a)は入射電子のエネルギー E_0 を変えたときの加速距離とエネルギー利得の関係を、図4(b)は加速に要する時間を示したものである。例えば、入射エネルギーが20keVの電子と80keVの電子がエネルギー利得1MeVを得るために必要な長さは、それぞれ2.8mmと2.55mmであり、それに要する時間はそれぞれ32psと14psであることが分かる。

3. レーザーのパラメータ

加速に必要なレーザーのエネルギー E_L は、 L_A を加速距離として、照射強度 I_{th} と照射面積 $A = L_A W$ とパルス幅 τ_L の積で与えられて、 $E_L = I_{th} A \tau_L$ となる。このままでは必要なパルス幅は10ps以上であるが、電子バンチの近傍だけの照射にとどめれば必要なパルス幅を短くすることができる。従って、必要なレーザーのエネルギーを小さくできて、レーザーに対する要請は軽減される。照射領域を N 対に分割すると、必要なレーザーパワー（パルス当たり）パルス幅、パルス当たりのエネルギーはそれぞれ $1/N$ 、 $1/N$ and $1/N^2$ となる^[5]。

分割照射は多数の反射鏡を用いる方法が提案されているが、効率よい加速のためには粒子と加速電界の位相を整合させる必要があり簡単ではない。我々は、レーザーの小型化が容易で位相制御技術も確立しているファイバーレーザーの採用を検討している。加速チャンネルの幅を $W = 20D$ とした場合のレーザーのパラメータを表1に示す。10対に分割してレーザーと誘電体との結合効率を50%とする場合、パルス当たりのレーザー

Table 1: Laser parameter values required for obtaining 1 MeV electrons.

| | | | |
|---|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Grating period | L_G | 1.527 | |
| Electron injection energy | E_0 | 20 keV | 80 keV |
| Width | W | 30 μm | |
| Length | L_A | 3.8 mm | 2.25 mm |
| Area | A | $1.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ | $6.8 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ |
| Acceleration time | τ_A | 32 ps | 14 ps |
| Optical damage threshold intensity ^[4] | I_{th} | $1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ | |
| Laser wavelength | λ | 1.55 μm | |
| Laser intensity (50 % coupling loss is assumed) | I_L | $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ | |
| Peak power of the laser | P_L | 22 GW | 17.6 GW |
| Total pulse energy of one side | E_T | 700 mJ | 190 mJ |
| Number of pulses pairs | N | 10 | |
| Energy of each pulse | E_{pulse} | 7 mJ/pulse | 2 mJ/pulse |
| Pulse width | τ_{multi} | 3.2 ps | 1.4 ps |
| Peak power | P_{multi} | 2.2 GW | 1.4 GW |

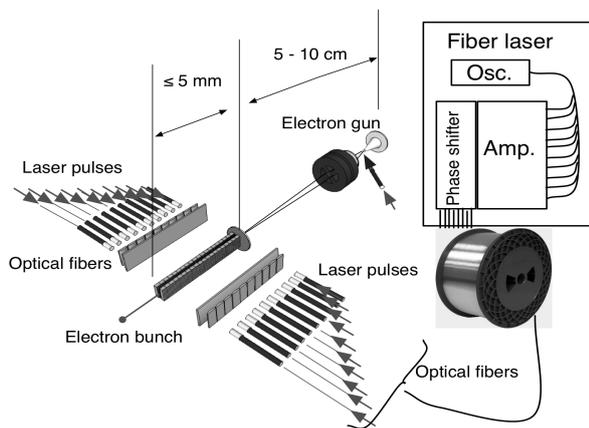


Figure 5: The conceptual drawing of the PM-LDA. Accelerator is coupled with fiber arrays by the imaging optics.

エネルギーは 2-7mJ、全体でも 2J 以下のレーザーエネルギーで済むことが分かる。このレーザー出力は最先端のファイバーレーザーで得られる値に近い^[6]。

4. まとめ

放射線による細胞中の DNA の損傷と修復の過程を解明するために、レーザー励起による誘電体電子加速器をベースにした測定システムの開発を行っている。概念図を Fig. 5 に示す。

装置は小型で光学顕微鏡下でビームを操作できることに加えて、細胞内での化学反応過程を解明できるようにピコ秒以下の超短パルスであることが望ましい。必要なマイクロ電子ビームのエネルギーとパルスの電荷量は、それぞれ数十 keV ~ 1MeV と 0.01fC ~ 0.1fC である。反射や回折等の影響で生じた電界分布の変形によって加速のための速度整合条件が緩和されるために、加速場は小さいものの低エネルギー電子でも加速することができる。このことは、電子銃も含めて加速器のオンチップ化が可能であることを意味する。

照射領域を分割して電子パルスとの同期を保つこと

によって、レーザーへの負担を軽減できる。照射領域を N 対に分割すると、必要なレーザーパワー（パルス当たり）パルス幅、パルス当たりのエネルギーはそれぞれ $1/N$, $1/N$ and $1/N^2$ となる。

例えば、10 対に分割してレーザーと誘電体との結合効率を 50% とする場合、パルス当たりのレーザーエネルギーは 2-7mJ、全体でも 2J 以下のレーザーエネルギーで済む。

今後は、試験片をレーザー照射して、格子構造があるときの光学破壊閾値を測定すると共に格子表面での電界分布測定を試みて、具体化のための設計を行う。

この研究は、科研費基盤研究 (C)24510120 によって行われた。

参考文献

- [1] Plettner, T. P., Lu, P., and Byer, R. L. "Proposed few-optical cycle laser-driven particle accelerator structure", Phys. Rev. ST Accel. Beams **9**,111301 (2006).
- [2] K. Koyama, *et al.* "DESIGNING OF PHOTONIC CRYSTAL ACCELERATOR FOR RADIATION BIOLOGY", IPAC12, New Orleans, May 2012, THPB095, 2763 (2012); <http://www.JACoW.org>
- [3] <http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/Meep>
- [4] Tien, A. -C., *et al.* "Short-Pulse Laser Damage in Transparent Materials as a Function of Pulse Duration", Phys. Rev. Lett. **82**, 3883 (1999).
- [5] K. Koyama, *et al.* "Laser-driven dielectric electron accelerator for radiobiology researches", Proc. SPIE 8779, Laser Acceleration of Electrons, Protons, and Ions II; and Medical Applications of Laser-Generated Beams of Particles II; and Harnessing Relativistic Plasma Waves III, 877910 (May 7, 2013).
- [6] Limpert, J. *et al.*, "High Repetition Rate Gigawatt Peak Power Fiber Laser Systems: Challenges, Design, and Experiment" IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **15**, 159 (2009).