

# レーザー駆動誘電体加速試験に向けた工作精度評価 EVALUATION OF THE FABRICATION ERROR ON THE ACCELERATION FIELD STRENGTH OF THE LASER-DRIVEN DIALECTIC ACCELERATOR

小山和義<sup>\*A)</sup>、大槻祥平<sup>\*A)</sup>、上坂充<sup>\*A)</sup>、吉田光宏<sup>B)</sup>  
Koyama Kazuyoshi<sup>\*A)</sup>, Otsuki Shohei<sup>A)</sup>, Uesaka Mitsuru<sup>A)</sup>, Yoshida Mitsuhiro<sup>B)</sup>,  
<sup>A)</sup>University of Tokyo  
<sup>B)</sup>KEK

## Abstract

Table top accelerators for delivering micro bunches of 1-MeV and 0.01 fC are desired to study fundamental processes of ionization radiation effects on biological cells. Laser-driven dielectric accelerators are suitable for this purpose. We numerically estimated tolerance errors of parameters of a transmission grating type dielectric accelerator such as a grating constant, pillar width, gap distance between counter gratings, longitudinal position shift of grating pair, optical path difference between two pulses, and surface roughness of a grating bottom. All these parameters must be smaller than 1/10 to 1/20 of a laser wavelength. An angle deviation from a vertical side wall of a grating pillar should be smaller than 3 degrees.

## 1. はじめに

レーザー駆動誘電体加速はサブミクロンのビームを狙った位置に照射できる能力を持つ。このような加速器の応用の一つに、細胞の狙った位置にサブミクロンのビームを照射してその後の生物学的・化学的变化を光学顕微鏡下で観察し測定する等の、放射線生物学研究を挙げることができる。放射線生物学研究を多くの場所で可能にするためには、装置はテーブルトップサイズ以下であることが望ましい。この目的に必要な出力エネルギーは約 1MeV で電荷量は 0.01fC 程度である。これまでに我々は、誘電体加速器の主要構成要素である矩形断面の格子を持った透過型回折格子対から成る構造 (Figure 1) に対して、解析的および数値計算によって加速のための最適パラメータを明らかにしてきた。<sup>[1, 2, 3]</sup> 回折格子は対称性の点からは二枚を対向させることが望ましいが、片側だけでも電子の加速は可能である。なお、回折格子を対向させるにあたって、Figure 1 の配置の内外を逆にして回折格子を背中合わせに配置することも可能であるが<sup>[4]</sup>、ここでは Figure 1 の配置について解析する。

透過型回折格子を対向配置する場合には、(1) 対向する面間隔のズレ  $\Delta D$  あるいは軸方向平行からのズレ (ピッチング)  $\Delta\alpha$ 、(2) 対向する格子の加速軸方向位置ズレ  $\Delta x$ 、(3) 対向する格子の加速軸方向からのズレ (ヨーイング)  $\Delta\phi$ 、(4) 対向するレーザーのタイミングのズレ (光路差)  $\Delta L_{opt}$  が加速勾配と電子の軌道に与える影響が問題になる。また、対向配置だけでなく片側だけを使う場合と共通する問題として、(5) 回折格子側面の斜度  $\theta$  と (6) 格子の底部の粗さ  $R_a$  の加速勾配への影響、(7) 電子ビームの方向と回折格子の方向のズレが加速勾配と電子の軌道に与える影響が挙げられる。

我々は、電子軌道の計算に先立って、2次元モデルで可能な範囲で FDTD 法シミュレーションコード meep<sup>[5]</sup> を使ってレーザー電界分布を計算し、回折格子の諸パラメータ、組み立て等の精度、加工の精度等が加速勾配に与える影響を評価した。

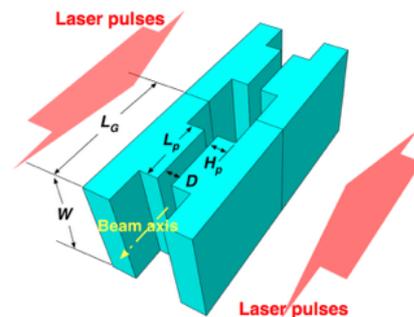


Figure 1: A schematic drawing of two periods of the transmission grating type dielectric laser accelerator.

## 2. 誘電体加速器のパラメータ

### 2.1 構造

透過型回折格子のユニットは Figure 1 に示すように、格子定数  $L_G$ 、格子の幅  $L_P$ 、格子の高さ  $H_P$ 、格子対の間隔  $D$  と格子に沿う長さ  $W$  で表される。 $L_G$ 、 $L_P$ 、 $H_P$ 、 $D$  の最適値を与える解析解は、レーザーの波長を  $\lambda$ 、誘電体の屈折率を  $n$ 、電子の速度を  $v$ 、真空中での光速を  $c$  とおいて、それぞれ  $L_G/\lambda = v/c$ 、 $L_P/L_G \approx 0.5$ 、 $H_P/\lambda = 1/2(n-1)$ 、 $D/\lambda \leq (L_P/\lambda)^2 = L_G/(2\lambda)^2 \approx 1/4$  で与えられる。我々は、回折格子のパラメータに関する上記の式に基づき、格子対の間隔が  $D/\lambda = 1/4$  の場合の電界分布と加速勾配をもとに、レーザーエネルギー、加速器の長さなどの議論を行ってきた。ここでは、電荷量あるいはレーザーエネルギーの評価に当たってはレーザーの照射光学系を仮定された決定された  $W$  を用いた。<sup>[1, 2, 3]</sup>

格子対の間隔が  $D/\lambda = 1/4$  では製作と実験に困難が予想される。誘電体加速の実験を行うために大きな間隔 ( $D/\lambda \approx 1$ ) での加速勾配と諸パラメータの許容誤差を求めた。加速勾配の格子の高さ ( $H_P$ ) 依存性は Figure 2 に示すように、 $D/\lambda = 1/4$  の場合と似ており  $H_P/\lambda = 0.95$ 、 $L_P/L_G = 0.5$  で最大になる。加速勾配

\*koyama@nuclear.jp

PASJ2015 FROM14

$E_x/E_0$  の最大値は、Figure 3 に示すように  $D/\lambda = 1/4$  の時に 0.3 であったが、 $D/\lambda = 1$  では 0.14 とほぼ半分になり、 $D$  の増加とともに急激に減少する。

Figure 3 から、 $D/\lambda = 1$  の場合に加速勾配の低下を 5% 以下に収めるためには対向する格子対間隔の誤差を  $\Delta D \leq \pm\lambda/20$  にする必要があることが分かる。一方、 $D/\lambda = 1/4$  の場合は  $\Delta D \leq \pm\lambda/80$  と、非常に厳しい精度が要求される。

なお、格子の加工に当たって低アスペクト比が望ましい場合には、 $H_P/\lambda = 0.6$  とすることもできる。ただし、その場合は加速勾配が 15% 低下する。

これ以降は、 $D/\lambda = 1$  の場合について議論する。Figure 4 は、加速勾配の回折格子幅 (ピラー幅)  $L_P/L_G$  依存性を示した図であり  $L_P/L_G = 0.5$  が最適であると言える。この図から、加速勾配の低下を 5% 以下に収めるため必要な回折格子幅 (ピラーの幅) は  $0.47 \leq L_P/L_G \leq 0.56$  であるといえる。

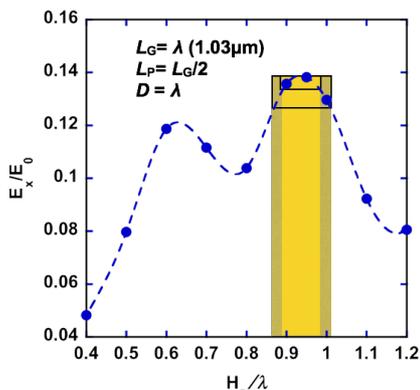


Figure 2: Acceleration field gradient  $E_x/E_0$  vs. the pillar height  $H_P/\lambda$ .

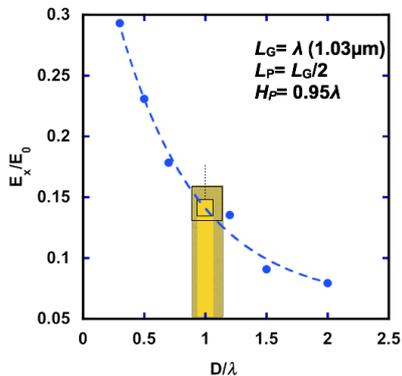


Figure 3: Acceleration field gradient  $E_x/E_0$  vs. the gap between counter transmission gratings  $D/\lambda$ .

2.2 対向格子の組み立てズレの影響

対向する回折格子の組み立ての際に現れる誤差の多くは、対向格子対の平行からのズレ (ピッチング)  $\Delta\alpha$ 、対向する格子の加速軸方向への相互の位置ズレ  $\Delta x$ 、対向する格子の加速軸方向からのズレ (ヨーイング)  $\Delta\phi$  である。ここでは、前の二つに関して議論する。

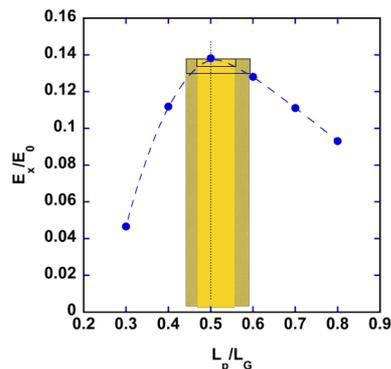


Figure 4: Acceleration field gradient  $E_x/E_0$  vs. the filling factor of the grating pillar  $L_P/L_G$ .

Figure 3 から得た格子対間隔の許容誤差は加速管の全体 (数 mm ~ 1cm) にわたって一定値以下に保たれる必要がある。すなわち、組み立てた時の平行からのズレ  $\Delta\alpha$  は  $5 \mu\text{rad}$  より小さくする必要がある。

対向する格子の加速軸方向への相互の位置ズレ  $\Delta x$  が半波長の場合は、それぞれの格子で生成した加速電界を打ち消してしまうので加速勾配はほぼゼロになる。加速勾配の格子の縦方向位置ズレ依存性を Figure 5 に示す。この結果から、加速勾配の低下を 5% 以下にするためには、縦方向位置ズレを  $\lambda/10$  にする必要があるといえる。

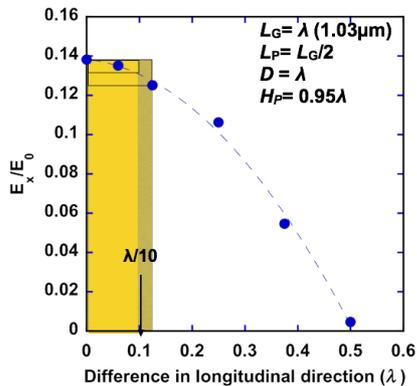


Figure 5: Acceleration field gradient  $E_x/E_0$  vs. the longitudinal position shift of grating pair.

3. 照射タイミングのズレの影響

誘電体加速器へのレーザー導入は、一つの発振器出力を分割・増幅して照射する。従って、分割後のビーム相互に光路差  $\Delta L_{opt}$  があると加速軸上でのレーザー到達時刻に差が生じ、Figure 6 のように加速勾配の低下をもたらす。この効果は基本的には正弦波の重ね合わせなので光路差に対して周期性を持つが、電界分布は格子からの距離に依存するので  $\sin$  関数からは外れる。この効果による加速勾配の低下への影響を 5% 以下にするためには、光路差を  $\lambda/20$  にしなければならない。

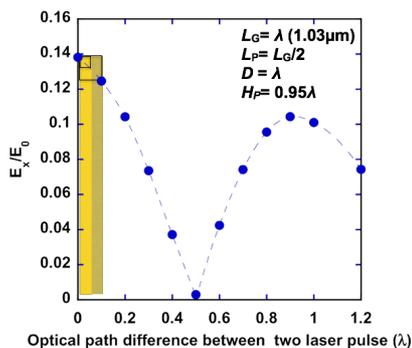


Figure 6: Acceleration field gradient  $E_x/E_0$  vs. the optical path difference between two pulses.

#### 4. 回折格子の加工エラーの影響

加速器のドライブに波長が  $1 \mu\text{m}$  付近の赤外線レーザーを使う場合、透過型回折格子の製作には石英ガラスを使用する。光リソグラフィー法においては、石英上に塗布したレジストを格子パターンを紫外線を使って縮小投影露光し、露光後に不要部分のレジストを除去し、エッチングによって石英を掘って透過型回折格子を作成する。加工の条件によって格子のバーの断面形状が長方形ではなく側面の傾斜が有限な台形などになることがある。また、底面が平面ではなく細かな突起が残ることがある。

Figure 7 は格子ピラーの側面の垂直からのズレ角  $\theta$  が加速勾配に与える影響を示したものである。この計算においては、ピラー頂上の幅を一定 ( $L_P/L_G = 0.5$ ) とした。加速勾配の低下への影響を 5% 以下にするためには、ピラー側面の垂直からの角度ズレを  $-2^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$  にしなければならない。

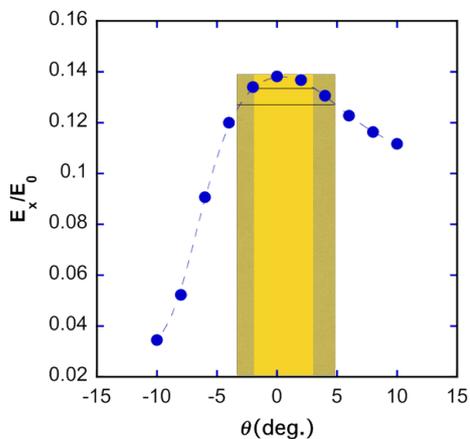


Figure 7: Acceleration field gradient  $E_x/E_0$  vs. the slope angle of the side of the grating pillar  $\theta$ . The positive and negative  $\theta$  indicate trapezoid and dovetail shapes of cross sections, respectively. The width of the mesa is fixed at  $L_P/L_G = 0.5$ .

底面に残る突起の多くは、直径が  $0.2 \mu\text{m}$  以下で高さ

が  $0.3 \mu\text{m}$  以下のことがおおく、ランダムに分布している。規則性がないので光が入射方向から外れた指向性を持つことはない。従って、突起の平均高さを分だけ格子のピラー高  $H_P$  が小さくなったと近似できる。このような近似と Figure 2 を使って、加速勾配の低下への影響を 5% 以下にするための底面の突起の平均高さは  $R_a \leq \lambda/20$  であるといえる。

#### 5. まとめ

レーザー駆動誘電体加速のための回折格子の製作に先立って、想定される誤差が加速勾配に与える影響を FDTD シミュレーションコードを用いて評価した。それぞれの誤差の影響による加速勾配の最高値からの低下を 5% 以内に収めるためには、誤差を以下のようにしなければならない。

1. 対向する格子対間隔の誤差は、 $\Delta D \leq \pm \lambda/20$ 。
2. 回折格子幅 (ピラーの幅) は、 $0.47 \leq L_P/L_G \leq 0.56$ 。
3. 対向する格子の縦方向位置ズレは、 $\Delta x \leq \lambda/10$ 。
4. 組み立てた時の平行度は、 $\Delta \alpha \leq 5 \mu\text{rad}$ 。
5. 対向照射レーザービームの光路差は、 $\Delta L_{opt} \leq \lambda/20$ 。
6. ピラー側面の垂直からの角度ズレは、 $-2^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$ 。
7. 突起の平均高さは、 $R_a \leq \lambda/20$ 。

今後は、回折格子の製作、精密アライメント法、小型電子銃の開発などを行い、透過型回折格子を使う誘電体加速器の加速実証実験を行う予定である。

本研究は JSPS 科研費 (B) 15H03595 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] K. Koyama, et al., "DESIGN STUDY OF THE LASER DRIVEN DIELECTRIC ACCELERATOR", Proceedings of IPAC14, 1428-1430. (2014). <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/tupme035.pdf>
- [2] K. Koyama, et al., "第 11 回加速器学会年会プロシーディングス", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014. [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2014/proceedings/index.html](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/index.html)
- [3] K. Koyama, et al., "Parameter study of a laser-driven dielectric accelerator for radiobiology research", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **47**, 234005 (2014). doi:10.1088/0953-4075/47/23/234005
- [4] A. Aimidula, et al., "Numerical investigations into fiber laser based dielectric reverse dual-grating accelerator", Nucl Instrum Methods Phys Res A, **740**, 108-113 (2013).
- [5] A. F. Oskooi, et al. "MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method", Comp. Phys. Comm. **181** 687 (2010). <http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/Meep>