

非相対論的エネルギー領域でのレーザー駆動誘電体加速 LASER-DRIVEN DIALECTIC ACCELERATOR FOR NON-RELATIVISTIC ELECTRONS

小山 和義 ^{*A,B)}、陳昭福 ^{B)}、上坂 充 ^{B)}、吉田 光宏 ^{A)}
Kazuyoshi Koyama ^{*A,B)}, Chen Zhaofu ^{B)}, Mitsuru Uesaka ^{B)}, Mitsuhiro Yoshida ^{A)}
^{A)}KEK
^{B)}University of Tokyo

Abstract

Since a laser-driven dielectric accelerator (LDA) is capable of delivering a submicron-size ultra-short electron beam, LDA would be a useful tool for a radiationbiology research. The oblique incidence configuration of LDA relaxes the synchronization condition as $d/\lambda = v/c(1 - (v/c)n \sin \theta)^{-1}$ and decrease the required energy by a factor of $\cos \theta$, where θ , λ , d , v and c are an incidence angle and a wavelength of the laser beam, a grating constant, an electron speed and the light speed, respectively. Two gratings with sub-micron grating constant ($d = 560\text{nm}$) were fabricated by the electron beam lithography. Two different material structure of silica (SiO_2), crystal silica and glass silica, were tested. The grating on the glass silica seems to be favorable for the acceleration experiment because a surface roughness of a groove of the grating is a tolerable level. On the other hand, intolerably big humps were distributed in grooves of the grating made of crystal silica.

1. はじめに

レーザー駆動誘電体加速はサブミクロンサイズのビームを狙った位置に照射できる能力を持つ。我々は、このような特性を持つレーザー駆動誘電体加速器を放射線生物学研究に応用するために開発を進めている。目標は、ち光学顕微鏡下で細胞の狙った位置に1ミクロン以下のビームを照射してその後の生物学的・化学的変化を観察し測定できるような装置の開発である。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。この目的に必要なビームのエネルギーは約1MeVで電荷量は約0.01fC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 (binary grating) 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求めた [1, 2, 3]。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。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 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 [4]。それらの結果に基づき、加速実験の実施に向けて石英製透過型回折格子を試作し材料による加工制度の差に関して評価した。

2. 透過型回折格子形状

レーザーパルスの回折格子への入射は垂直入射だけでなく斜め入射でも電子加速が可能である。入射角 θ で斜め入射して連続的な加速を行うためには、 λ をレーザー波長、 c を光速、 n を屈折率として、回折格子の格子定数 d と電子の速度 v の間の整合条件 $d/\lambda = v/c(1 - (v/c)n \sin \theta)^{-1}$ を満たす必要がある。Fig. 1(a) に示すように、斜め入射の場合は垂直入射の場合に比べて格子定数をやや大きく選ぶことができる [5]。回折

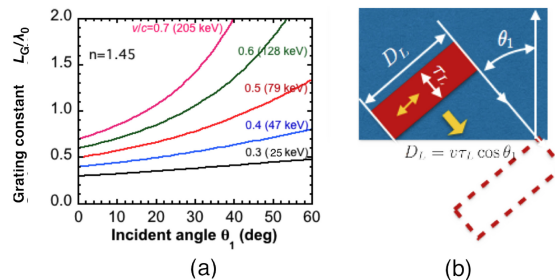


Figure 1: (a) synchronization condition for the oblique incidence configuration. (b) oblique incidence configuration.

格子の深さは $H_p/\lambda = 1/2(n - 1)$ であり赤外光で石英の場合は $H_p/\lambda \approx 1$ である。アスペクト比が2の深い溝の加工が要求されるが、溝の深さが半分でも連続的な加速は可能である。ただし、平均加速勾配は半分になる。なお、屈折率が大きいと浅い溝でも良いが材料はその波長に対して透明であることが必要であり、かつその波長で高強度の光源が必要である。

斜め入射の照射配位は Fig. 1(b) に示すようになり、レーザーパルスは電子よりも速く進むので常に加速するためにはレーザービームの幅 D_L とパルス幅 τ_L に注意を払う必要がある。簡単な考察から斜め入射加速に要求されるレーザーのエネルギーに対して、

$$W_L = \frac{1}{2}\epsilon_0 w_L \frac{\Delta W_{ac}^2}{e^2} \cos \theta \left(\frac{\lambda}{d} + n \sin \theta \right) \propto \cos \theta \left(\frac{c}{v} \right)$$

を得る。ここで、レーザービームのサイズは $D_L \times w_L$ で ΔW_{ac} はエネルギー利得である。斜め入射によって必要なレーザーエネルギーを緩和することができる。入射角が極端に大きいと回折格子面に平行な電界成分が小さくなり、加速勾配が低下する。斜め入射配位の詳細な議論は別の機会に行う。

*koyamakz@post.kek.jp

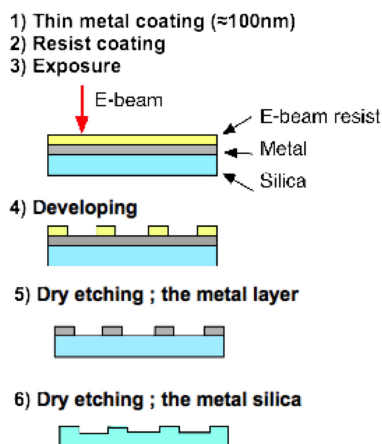


Figure 2: Electron-beam lithographic process.

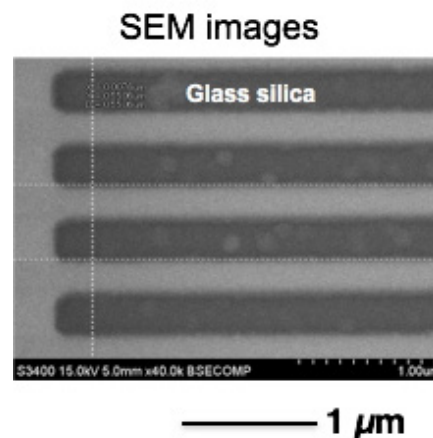


Figure 3: Scanning microscope image of the grating.

3. 透過型回折格子

数十 keV の電子を 1MeV に加速するためには、パルス幅が約 100ps でピーク出力が 60GW 以上のレーザーが必要であり、このようなレーザーパルスはモードロック発振器とレーザー増幅器によって作ることができ、 $0.8\mu\text{m} - 1\mu\text{m}$ の波長帯に多い。チタンサファイアレーザー、ファイバーレーザー、YAG レーザーなどがその代表例である。この波長帯で光学破壊の閾値が高く、透明度が高く安価な材料は石英 (SiO_2) である。石英は構造によってガラス石英と結晶石英およびその中間の構造などがあり、密度が異なり光学破壊閾値も異なるものと予想される。ここでは、ガラス石英と結晶石英を用いて加工した。

初期エネルギーが 50keV (初期速度 $v/c = 0.4$) の電子を、回折格子近傍の電界分布の高調波成分ではなく基本波成分で加速するためには格子定数をレーザー波長の 40% にする必要がある。この場合、格子の溝あるいはバーの幅は約 200nm であり i 線を用いた光リソグラフィーでは加工できないので、回折格子の加工は物質材料研究機構 (物材機構) の協力を得て電子線リソグラフィーで行った。試作した回折格子の設計値は格子定数は $d = 560\text{nm}$ で格子バーの幅が 280nm、溝の深さが 440nm である。電子線リソグラフィーの手順を Fig. 2 に示す。加工条件は結晶石英とガラス石英に対して同一にした。なお、エッチング速度のデータはあらかじめ結晶石英に対して取得し、それに基づいてエッチング時間を決めた。

4. 回折格子の顕微鏡像

ガラス石英上に作成した回折格子を走査型電子顕微鏡 (scanning electron microscope; SEM) で観察した結果を Fig. 3 に示す。SEM 像から読み取った格子定数と格子の幅はそれぞれ 563nm と 238nm であった。SEM 像には回折格子の溝の中に突起が認められる。突起の大きさを SEM で測定することは難しいので、原子間力顕微鏡 (atomic force microscope; AFM) を使用した。AFM 像から読み取った格子定数は 562nm であり SEM から得た値と一致している。Fig. 4 から読み取

AFM images and sectional shapes across pillars

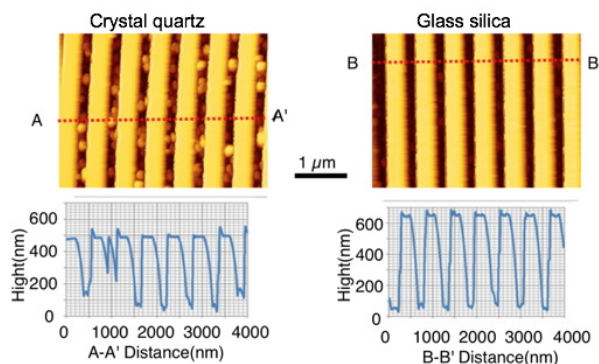


Figure 4: AFM images (upper) and cross-sectional shapes along lines A-A' and B-B' (lower).

た溝の深さは、結晶石英で 421nm でありガラス石英の場合は 583nm であった。単純に読み取った格子バー側面の傾斜角度は 82° であったが、実際にはこの値よりも急である。カンチレバーの有限な太さによる”にじみ”の影響を考慮すると傾斜は 89° と推定できる。ただし正確には SEM を使って実際にカットした断面形状を計

AFM images and sectional shape of humps along grooves

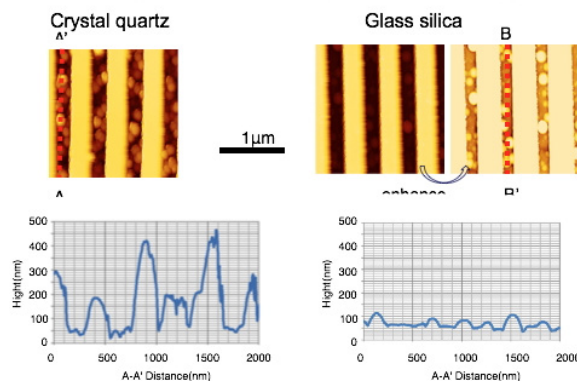


Figure 5: AFM images (upper) and shape of humps in grooves (lower).

測する必要がある。

結晶石英とガラス石英基盤上に加工した格子の溝の深さは、それぞれ421nmと583nmであり、ガラス石英のエッチング速度は結晶石英に対するエッチング速度の1.4倍であった。SEM像(Fig. 3)で観測された溝の底にある突起はFig. 4, Fig. 5のAFM像で明瞭に観測された。特に結晶石英を加工した場合に顕著であり、溝の深さと同程度の高さのものも観測された。突起の大きさ(直径と高さ)を知るためにFig. 5のように溝に沿った断面形状を測定した。結晶石英の場合の突起は直径が100nm-300nmで高さが140nm-400nmのものが最も多く、大きな突起は平均間隔500nmで分布しその間を低い突起が埋めていた。一方、ガラス石英の場合には、突起の直径は100nm-150nmで高さは20nm-50nmであり、間隔200nm-300nmでほぼ一様に分布していた。これらの突起はレーザーの波長の数分の一以下であり、波長程度離れば凹凸の影響は平均化される。すなわちガラス石英の場合には溝が5nm-20nmの高さだけ底上げされたとみなすことができるが、結晶石英の場合の突起は溝の深さと同程度のものがあり、局所的な加速電界の乱れは無視できない程度である。

5. まとめ

、光学顕微鏡下で細胞の狙った位置に1ミクロン以下のビームを照射してその後の生物学的・化学的変化を観察し測定できるような装置を開発するために、レーザー駆動誘電体加速の研究を進めている。目標の出力エネルギーは約1MeVで電荷量は0.01fC程度である。斜め照射の採用によって必要なレーザーエネルギーを $\sin\theta$ 倍に軽減できることを示した。

加速実験に備えて、結晶石英とガラス石英基の2種類の盤上に回折格子を作成しSEMとAFMで回折格子の測定を行った。結晶石英とガラス石英基盤上に加工した格子の溝の深さは、それぞれ421nmと583nmであった。結晶石英の場合の溝の中の突起は直径が100nm-300nmで高さが140nm-400nmのものが最も多く、ガラス石英の場合には、突起の直径は100nm-150nmで高さは20nm-50nmであった。これらの突起の加速に対する

影響は、ガラス石英の場合には溝が5nm-20nmの高さだけ底上げされたとみなすことができるので無視できるが、結晶石英の場合の突起は溝の深さと同程度のものがあり、局所的な加速電界の乱れは無視できない。

今後は、加速実験に使用可能なレーザーと真空容器、電子銃、計測装置など実験の配置に合わせた回折格子を作成し、光学破壊閾値の計測と電子加速実証実験を進める。

謝辞

本研究はJSPS科研費15H03595の助成を受けたものです。また、回折格子の制作にご助言下さった物材機構の栗村直博士と回折格子の検査にご協力いただいた(株)日立ハイテク・研究開発本部主管技師 小瀬洋一様に感謝いたします。

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
- [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] K. Koyama *et al.*, “第12回加速器学会年会プロシーディングス”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 5-7, 2015. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/index.html
- [5] S. Otsuki *et al.*, “DEVELOPMENT ON ON-CHIP RADIATION SOURCE USING DIELECTRIC LASER ACCELERATOR”, Proceedings of IPAC14, 1434-1436. (2014). <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/tupme037.pdf>