

放射線生物応用のためのレーザ誘電体加速による オンチップ MeV 電子加速器開発

PREPERATION OF PAPERS FOR ACCELERATORS CONFERENCES DEVELOPMENT ON LASER-DRIVEN DIELECTRIC ON-CHIP ACCELERATOR DESIGNED FOR RADIATION BIOLOGY RESEARCHES

大槻祥平^{*A)}, 吉田光宏^{B)}, 小山和義^{A,B)}, 美馬覚^{C)}, 上坂充^{A)}

Shohei Otsuki^{*A)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Ryushi Kasoku^{A,B)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Satoru Mima^{C)}, Mitsuru Uesaka^{A)}

^{A)}Department of Engineering, Univ. of Tokyo

^{B)}KEK

^{C)}RIKEN

Abstract

The goal of the research is to build an on-chip micro-beam accelerator using DLA (Dielectric Laser acceleration) designed for radiation biology researches. We are now preparing for the demonstration of DLA with our idea of configuration, where a prism and oblique incidence of laser are newly installed. First we summarize the basic idea and principle of oblique incidence DLA, followed by typical simulation results on the accelerating field based on first demonstrational experiment setup. The designed experiment setups such as the fabrication of accelerating structure of SiO₂ grating, the Pierce type electron gun are also reported.

1. 卓上マイクロビーム源の放射線応用

1.1 追跡調査による低線量被曝の評価

低線量被ばくのリスク評価は近年その解決が急がれる課題の一つである。この問題は今日の原子力発電への議論にとどまらず、X線CT、航空機への搭乗、宇宙飛行による被ばく等、多岐にわたる。図1は特定の被ばく量(横軸)に対してそのがんのリスクを統計的に評価する際に必要なサンプル数(縦軸)を表したものであり、数mGy以下の低線量被ばくの領域ではその値が極めて大きくなることが確認できる。より具体的には、低線量被ばくに対して線形に発がん率が変化するモデルについて1000人に5人が発がんするリスクを統計的に95%の確かさで評価するには80億人の追跡調査が必要であることが示されている。このような調査は現実的であるといえない。

1.2 加速器の放射線生物応用と卓上マイクロビーム源開発

追跡調査に変わり、より基礎的なアプローチとして、細胞にイオンビームを照射し細胞レベルでの放射線への応答を観測する研究が成果を上げている。ただしこの実験では種々の目的のために利用されているイオン加速器施設を借用しているために、次の問題点・弱点がある。

- イオンビームの減速・コリメーションが必要であり、またイオンが細胞にあたる位置がランダムである
- 放射線管理区域内での実験となり制約が大きい
- 共同利用のためマシンタイムが限られる

本研究の将来目標は上記問題を解決し、被ばくのリスク評価に貢献する、次の仕様を満たす卓上マイクロ電子ビーム源の開発である。

- 細胞の特定の組織へのビーム照射

* otsuki.shohei@nuclear.jp

- 研究室単位で導入可能な卓上マイクロ電子ビーム源
- 放射線管理区域外の設置
- 細胞の放射線に対する時間応答の観測

表1はビーム源への要求をまとめたものであり、卓上で十分なエネルギーに加速できる電子ビーム加速を採用し、バンチ(電子の集団)ごとの電荷とバンチ長はイオン照射と同等の効果が期待される量、最大のエネルギー1MeVは加速器が放射線管理区域外に設置出来るエネルギー境界値で決定している。また顕微鏡やマイクロメータの位置合わせシステムと組み合わせ、細胞の組織レベルでの選択的照射や、細胞の時間応答の観測が可能なシステムの構築を目指す。

Table 1: The Specifications for the Development of On-chip Micro-beam Source

beam size	~ 1	μm
beam energy	< 1	MeV
charge/bunch	~ 0.01 to 0.1	fC/bunch
bunch length	< 1	fC

DLAによる小型加速器開発は上記の仕様をよく満たすことが試算され、また次世代加速器開発にも貢献するものである。このためのDLAの基礎研究および電子加速の実証実験の準備状況について報告する。

2. 斜め入射 DLA とその原理

2.1 DLA の特徴と近年の進展

DLAは昨年度の9月その初となる原理実証が発表された新奇加速器の中でも最も若い技術の一つであり、金属の~GHz帯での放電限界より10から100倍高い光電場に対する絶縁破壊をもつ誘電体回折格子に超短パルスレーザを入射して成形し、回折された光電場で

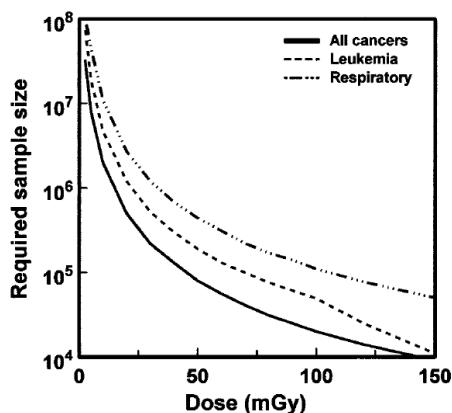


Figure 1: Required sample size against the doses of radiation (in mGy).

直接電子を加速するものである。特徴として、将来的に \sim GV/m に迫る加速電場が期待される他、光の波長オーダの微細な加速構造に起因して μ m オーダのビーム径の電子加速が期待される点が挙げられる。(THz 帯の DLA の研究も進められており、 $E \simeq 60$ keV の電子ビームに対してエネルギーゲイン 7 keV の成果も報告されている??。)

他方で、基礎物理実験のような高エネルギー加速に必要な多段加速の実現は現在のところ目処が立っていない。近い将来にその有用性を示し、さらに応用を目指すには比較的低エネルギー (\sim MeV) において、その微細な加速構造とマイクロビームの特性を活かすことが有効であり、これは先に示す放射線生物応用によく合うものである。本研究では放射線生物応用に仕様を定め、いち早く DLA の有用性を示したい考えである。

2.2 斜め入射の DLA の特徴

昨年度夏に SLAC および MPI でそれぞれ光速および非相対論的速度の電子ビームに対して世界初となる DLA 実証実験が報告された。これらの DLA では、ビームの進行方向に偏極したレーザーパルスを回折格子に対して垂直に入射し、回折格子でその位相を整形して、図の左から入射される電子を連続的に加速しようとするものである。ここに両者とも電子ビームのエネルギーゲインは入射ビームの 0.1% 未満であった。今後の高エネルギーゲイン化にむけてこの手法には下記の 2 点の問題が指摘される。

- 電子の加速距離と加速電場の強さがレーザーのパルス幅でトレードオフになり、電子のエネルギーゲインが確保できない
- 低速の電子の加速では高次の回折場を利用するため、加速できる粒子の速度が離散的になり、また技術的要求が高くなる

図 2 a) は本研究で実証実験にむけ準備を進めている DLA の模式図であり、セットアップにおける従来手法との違いは、プリズムの導入とレーザーの斜め入射である。この配置は次の利点に着目したものである。

- レーザパルス幅は可能な限り圧縮して入射しても、

電子の加速距離は主にレーザーのパルス径で決定されるために高エネルギーゲイン化に有利である。

- レーザの視射角 θ を変えることにより、広く任意の速度の電子を加速することができる。

2.3 斜め入射 DLA の原理

定性的には、プリズムはレーザーパルスの群速度、位相速度の減速、およびレーザーパルスを圧縮してより高電場で電子を加速する役割をもつ。また回折格子の電磁波の透過と加速電場の速度を粒子と一致させると同時に、そのピッチとレーザーの波長、入射角の関係によって加速する粒子の速度を決定する。以下にこの関係をまとめる。

2.3.1 回折格子の深さ レーザを斜めに入射する際には、電子の進行方向に射影したレーザーパルスの位相速度は、プリズムによって減速されても (非常に誘電率が大きい場合や視射角が浅い場合を除き) 光速より早くなる。このため、電子が加速位相からずれ減速位相にのるタイミングで、レーザーパルスに

$$\frac{\lambda}{2} = L_{\text{die}}^{(\text{opt})} - L_{\text{grv}}^{(\text{opt})} \quad (1)$$

だけの光路差を与えるような深さの誘電体の溝、あるいはブロックを交互に用意することで、電子の連続的な加速が可能となる (ここで、 $L_{\text{opt}}^{(\text{opt})}$ および $L_{\text{grv}}^{(\text{opt})}$ は、光がそれぞれ回折格子の層の誘電体および溝の部分を通り電子到達するまでに経験する光路差とする)。したがって、誘電率 n とレーザー波長 λ に対して、回折格子の深さ H がおよそ次式で決定される。

$$(n-1)\frac{H}{\lambda} \simeq \frac{1}{2} \quad (2)$$

2.3.2 回折格子のピッチ 回折格子のピッチの幅は l_g 、加速したい粒子の速度 $c\beta$ とプリズム内を進む波面の位相速度のビーム進行方向への射影成分 $v_p = c/n \cos \theta$ との速度差が、レーザーの半波長をビーム進行方向に射影した長さをとる時間差 $l_g/2c\beta$ で回折格子の山、谷が入れ替わるように決定する:

$$(v_p - c\beta) \frac{l_g}{2c\beta} = \frac{\lambda}{2n \cos \theta}, \quad (3)$$

すなわち、

$$\beta = \frac{\cos^2 \theta}{n \cos \theta + \lambda/l_g} \quad (4)$$

の関係式によって、速度 $c\beta$ の粒子が連続的に加速電場 (あるいは原則電場) を受けると期待される。図??は横軸をレーザー波長で規格化した回折格子のピッチ l_g/λ にとり、縦軸にその時に期待される加速電場の速度 (すなわち連続的に加速できる電子の速度) をプロットしたものである。ここで回折格子の溝あるいは山の幅が進行方向に射影した光の波長より大きくなる場合には、式 (4) が表すべき加速位相の範囲に減速位相が含まれ始めるため、 $l_g/\lambda < 2$ がその適用範囲の目安となる。また $l_g/\lambda 2$ が小さいほど遅い粒子を加速できることが分かるが、その境界は精密加工の限界とレーザー波長の組み合わせで決定される。加えて、視射角 θ が小さいほど (入射角 $\theta - \theta$ が大きいほど) 遅い粒子を加速することができ

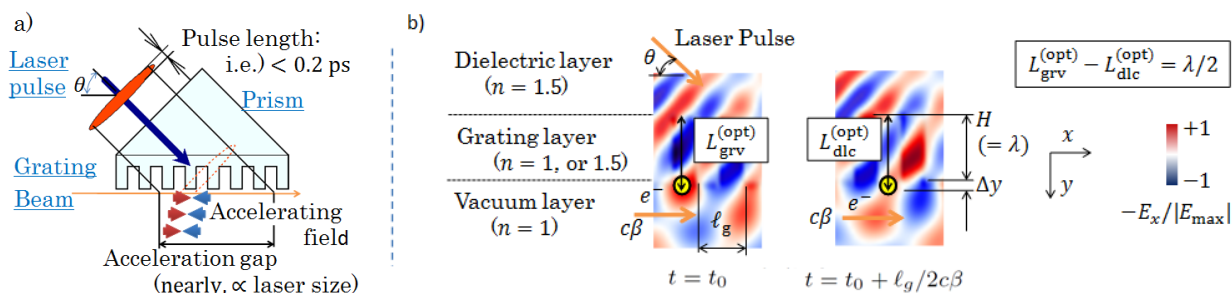


Figure 2: a) Configuration of oblique incident DLA. b) One of the typical simulation results of propagating E_x field along beam (x) direction.

るが、視射角があまりに大きいと横方向の電場が支配的になる。逆に視射角が 90° に近づくと斜め入射の利点なくなる。ここではおよそ式 (4) の適用の目安として $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ のみ選択的にプロットしている。

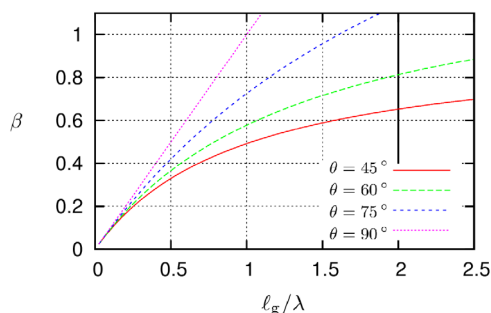


Figure 3: The speed of accelerating (or decelerating) field β against normalized grating pitch ℓ_g/λ expected by Eq.(4). The vertical line ($\ell_g/\lambda=2$) is the (rough) indication of maximum value where eq.(1) can be applied.

3. 実証実験に向けた加速電場のシミュレーション結果

3.1 実証実験のパラメータ

実証実験は卓上マイクロビーム源開発の仕様に合わせて準備を進めている。回折格子およびプリズムの材料には電場に対する十分な破壊強度と経済性、また加工方法が確立されていることから SiO_2 ($n \approx 1.46$) を選定、またレーザは高いエネルギー変換効率とから Yb 超タンパルスレーザ ($\lambda \approx 1.03 \mu\text{m}$) を採用した。加速する電子の速度は $\beta \approx 0.432$ ($E = 50 \text{ keV}$) とし、これは卓上マイクロビーム源において小型熱電子銃でビームを発生し、その後 DLA により加速する計画によるものである。

3.2 加速電場のシミュレーション結果

図 2 b) に加速電場の FDTD シミュレーションの結果を示す。シミュレーションパラメータは前述に対応しており、ただし演算時間と視覚的な理解の容易さから数ピッチ分の領域のみで演算したものである。また図では誘電帯の占める領域を薄く白い影で示しており、電場は水平方向の成分 (E_x) のみを抜き出していることに注意されたい。

図 4 は、図??における回折格子の端面から距離 $\Delta y = \lambda/2, 4\lambda/3$ の位置の E_x を抜き出し、その時間発展をプロットしたものである。図中で示す直線は、式 (4) で導かれた加速電場の速度の設計値 $\beta = 0.432$ で進む仮想的な粒子の軌跡あり、これが連続的に加速電場を受けることが確認できる (ただし速度変化は考えない)。この他の位相速度においても、シミュレーション結果は式 (4) から導かれる結果と非常によく一致した。また、同図 4 の a), b) の比較から加速電場の形状は回折格子の端面から離れるに従いなだらかとなることが確認でき、 Δy の違いにより加速の過程が変化することが予想される。

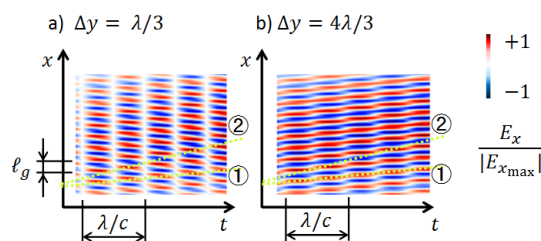


Figure 4: Time propagation of E_x along beam (x) direction from a) $\Delta y = \lambda/2$, and b) $\Delta y = \lambda/2$.

4. 実証実験の準備状況について

4.1 実証実験のセットアップと実験パラメータ

図 5 は実験セットアップの模式図である。50 keV 電子ビーム源には DC の電子銃ピアース型電子銃を採用し、カソードには LaB_6 を採用した。これをソレノイド磁場により収束後、 $\sim 10 \mu\text{m}$ にコリメートし DLA の試験部に入射する。Yb レーザはパルスエネルギー 10 mJ (or 0.10 mJ), パルス幅 0.2 ps, 繰り返し 50 kHz とし、これをおよそ $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ に集光する。繰り返し周波数を比較的高く設定しているのは、線応用に必要な $\sim 0.1 \text{ pA}$ を確保するためである。またレーザパルスのエネルギーは回折格子の破壊限界以内としている (??,??)。またエネルギーの透過率はレーザの波長 λ 、視射角 θ 等に依存して数割程度減少する。概算された加速電場は $\sim 100 \text{ MV/m}$ である。簡易なモデル計算による加速によるエネルギーゲインの概算はともに $\sim 1 \text{ keV}$ 程度であり、これは粒子の速度変化による加速位相からのずれによって制限されることがわかっている。加速後の電子のエネルギー分布は磁気スペクトロメータによって空間分

布に写し取り、MCP で増幅後、蛍光板で検出する。

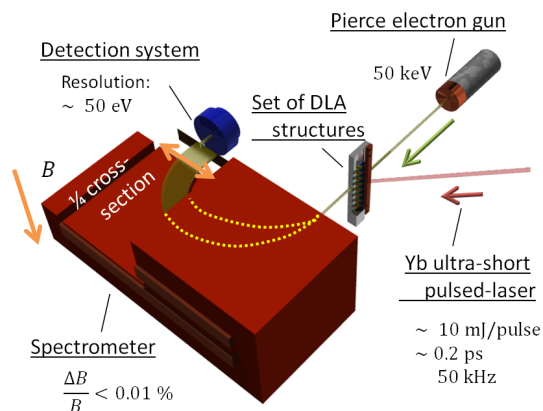


Figure 5: Experimental setup for the first demonstration of oblique incidence DLA.

4.2 実験セットアップの開発状況

4.2.1 SiO₂ 回折格子の加工 SiO₂ 回折格子は理化学研究所の協力の下、リゾフグフィーと呼ばれる半導体加工に利用される方法を用いて加工を進めている。図 6 a-1) はウエハー上に加工した回折格子の例であり、加工におけるパラメータをウエハー上で変更し、最適な加工条件を調査しているものである。同図 a-2) は加工した回折格子 ($\ell_g = 1.5 \mu\text{m}$) の SEM 画像である。これまでに複数の加速条件に対応する回折格子の加工条件を決定した。

4.2.2 加速試験用の電子銃 加速実験用のビーム発生には高輝度ビーム発生に優れるピアース型電子銃を採用した。カソードには長寿命、かつ高電流化が可能な LaB₆ を採用し、これを DLA 試験部で ~0.1 mm の径に収束させる設計とした。加速電圧 50keV は DC 電源により確保する。またこの電子銃は、将来的な卓上マイクロビーム源システムへの仕様に合うよう設計を行った。

4.2.3 磁気スペクトロメータ 磁場の誤差を 0.01% とし、エネルギー分解能 0.1 keV に耐える電磁石を設計した。最大の計測エネルギーの目安は 500 keV とし、当面の実験に耐える仕様である。

4.2.4 Yb 超短パルスレーザ 昨年度までに、パルスエネルギー ~ 10 μJ、繰り返し周波数 1 MHz、パルス幅 ~ 1 ps の Yb:Yag のレーザシステムが開発された。これを前述の実証実験の仕様にまでアップグレードする予定である。

5. まとめ・今後の計画

放射線生物に仕様を定めた卓上マイクロビーム源の開発にむけ、高エネルギーゲイン化および低速の電子の加速に利点があるレーザの斜め入射を導入した DLA の実証実験の準備を進めている。これまでに加速電場を理論的・数値的に検証し、シミュレーションにおいては、設計値によく一致する加速電場の移動 ($\beta \sim 0.4$) を確認し

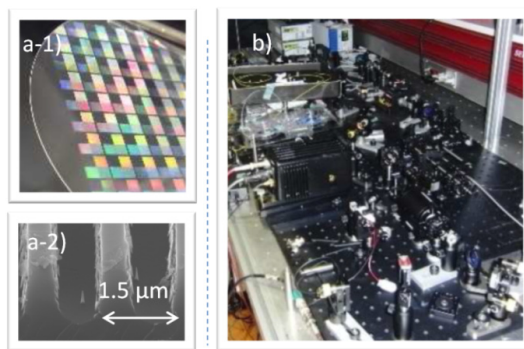


Figure 6: a-1) Fabricated grating on the SiO₂ wafer, and a-2) one of the SEM images of the grating structure. (The both are under optimization of fabricating conditions.) b) Yb ultra-short laser pulse system developed at KEK.

た。またこれまでに実証実験のためのセットアップを設計し、加速構造である石英の回折格子の加工を行った。

今後は今年度中の実証実験を目標に準備を進める他、形成される加速電場・粒子加速のより詳細な調査をシミュレーションを軸に行う。また、実証実験の段階では加速された粒子の速度変化によって粒子が減速位相にのることによってエネルギーゲインが大きく制限されるため、これを解決する加速構造の設計を進める。数 100 keV のエネルギーゲインが達成された時点で、先に上げた放射線応用のためのマイクロビーム源のシステム設計に着手する計画である。

参考文献

- [1] E.A. Peralta, et al., “Demonstration of electric acceleration in a laser-driven dielectric microstructure”, Nov. 2013, p. 91-94.
- [2] J. Breuer, and P. Hommelhoff, “Laser-Based Acceleration of Nonrelativistic Electrons at a Dielectric Structure”, Phys. Rev.Lett. 27 Sep. 2013.
- [3] K. Soong, et al., “Laser damage threshold measurements of optical materials for direct laser accelerators”, AIP Conf. Proc. 1507, 511 (2012).
- [4] E.A. Nanni, W.S. Graves, et al., “Linear Electron Acceleration in THz Waveguides”, IPAC’14 proceedings.
- [5] D.J. Brenner, et al., “Cancer Risks Attributing to Low Dose of Radiation”, PNAS 100 no. 24, p. 12761-13766 (2003).
- [6] K. Koyama, S. Otsuki, et al., “Parameter study of a laser-driven accelerator for radiobiology research”, JPHYSB-100769. Ra.
- [7] S. Otsuki, M. Uesaka, et al., “Development on On-Chip Radiation Source Using Dielectric Laser Accelerator”, IPAC’14 Proceedings.