

DLA テストスタンドの開発 DEVELOPMENT OF DLA TEST STAND

丸征那^{#, A)}, 佐藤大輔^{B)}, 澁谷達則^{B)}, 坂上和之^{A)}

Sena Maru^{#, A)}, Daisuke Satoh^{B)}, Tatsunori Shibuya^{B)}, Kazuyuki Sakaue^{A)}

^{A)} The University of Tokyo

^{B)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract

Dielectric laser acceleration is one of the acceleration methods with smaller scale and higher acceleration gradient than the radio frequency method. Although DLA is being researched and developed, limiting its purpose to high acceleration gradients and short electronic bunches. We are developing a test stand for a DLA-based electron accelerator that has both high throughput and high acceleration gradients. The gap size and structural period condition of the accelerating structure that can be accelerated by the laser near field is shown by the electric field calculation.

1. はじめに

レーザー誘電体加速は誘電体構造によって変調されたレーザー電場を用いて電子源から放出される電子を加速するというものであり、従来の高周波加速に比べ高い加速勾配かつ小さい空間スケールを持った次世代加速技術として期待される。これは誘電体が光周波数に対しても低い電力損失を持つためである。例えば中心波長 $2\ \mu\text{m}$ のレーザーを用いたレーザー誘電体加速は、高周波を用いる加速器の加速勾配を比較すると、レーザーによる材料破壊の閾値における制限を受けるものの、 $1\ \text{GV/m}$ と 2 桁近く高い加速勾配を得ることができる [1]。また加速構造の空間スケールについても 4 桁のスケールダウンを実現可能である。

前述のように多くの優れた特徴を持つレーザー誘電体加速であるが、実証試験例が少なく、そのいくつかの事例においても高い加速勾配の実現を目的として研究開発が行われている [2-4]。現在のレーザー誘電体加速が直面している課題として、アクセプタンスマッチングの困難さに起因して入射電子のほとんどが加速されずに損失することや帯電効果によって電子加速が著しく不安定であることなどが挙げられる。この課題を解決するものとして、加速に用いるレーザーと加速を行う電子に合わせた加速構造の最適化などが考えられる。そこで我々はレーザー誘電体加速においてもビームロス最小化し、繰り返し安定性の向上などを旨とし、DLA テストスタンドの構築を進めている。

本稿では、テストスタンドの構想と構築状況、誘電体加速構造設計及び今後の計画について報告する。

2. DLA の加速原理と設計指針

レーザー誘電体加速では、加速される電子は電子の進行方向に平行かつ位相速度の同期した光電場によってエネルギー利得を得る。加速電場は誘電体に施した微細な周期構造にレーザーを照射し変調することで、構造内部に加速電界を形成する。誘電体加速構造の1つ

として 2 列の円筒 (ピラー) をレーザーが透過することで電場を位相調整可能にするデュアルピラー構造が提案されており [3,4]、本研究においても基本構造としてデュアルピラー構造を採用する。デュアルピラー構造は設計の自由度が高く、広く採用されている構造である。デュアルピラー構造を用いたレーザー誘電体加速の構成を Fig. 1 に示す。

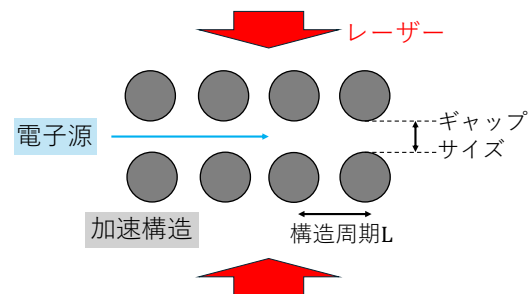


Figure 1: Schematic drawing of dual-pillar DLA system.

ピラー構造は、加速に用いるレーザーの波長 λ と構造体の近傍を通過する電子の速度 βc に合わせて誘電体が周期的に配置される。ギャップサイズが十分に小さく、周期 L が次の関係式(1)を満たす時、電子はレーザー光からエネルギーを得る [5]。

$$L = n\beta\lambda \quad (1)$$

テストスタンド構想のダイアグラムを Fig. 2 にまとめる。電子源として FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) を使用し、フィラメントで加熱されたフィールドエミッターから生成された電界放出電子を用いる。加速用のレーザーは電子軌道に対し垂直に入射される。ピラーを通過することによって位相整合され、電子軌道上に加速電界を生成する。

加速構造にはフォトリソグラフィー等を用いた精密加工が可能な Si を使用し、加速用レーザーには Si に対し透明でコヒーレントな光源である中心波長 $2\ \mu\text{m}$ のツリウムファイバーレーザーを使用する予定である。

[#] senamaru@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

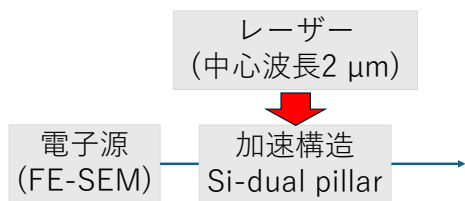


Figure 2: Schematic drawing of DLA test stand.

3. DLA の設計シミュレーション

3.1 Distributed Bragg reflector

2章にて述べたデュアルピラー構造を用いたレーザー誘電体加速において、単一方向からのレーザー照射を行うと電子軌道に垂直な偏向成分の加速電場が生じることが報告されている [6]。そこで、逆方向からの対称なプロファイルのレーザーを照射させ、ビーム進行方向以外の電場成分を打ち消し、加速に必要な電場成分のみを形成する手法を選択する。しかしながら、双方向からレーザーを入射する場合においては、レーザーの光の位相や入射角度等についての厳密な調整が必要であり、実験実施上の課題となる。これらを解決する構造として、Distributed Bragg reflector (DBR)による反射を用いた加速構造が提案されている [7]。

屈折率 n の誘電体で構成された DBR を用いて波長 λ のレーザーを加速ギャップ中心での位相整合を満たすように反射にする条件は、DBR の厚さ t および間隔 D について次の式(2),(3)で表される。

$$t = \lambda/4n \quad (2)$$

$$D = \lambda/4 \quad (3)$$

上記の関係式を満たすような加速構造の設計例を Fig. 3 に示す。DBR を用いることでレーザーの照射方向を1方向のみに限定することが可能となった。本研究ではこの DBR を用いたデュアルピラー構造を基本構造とし、ギャップサイズ等の設計を行う。

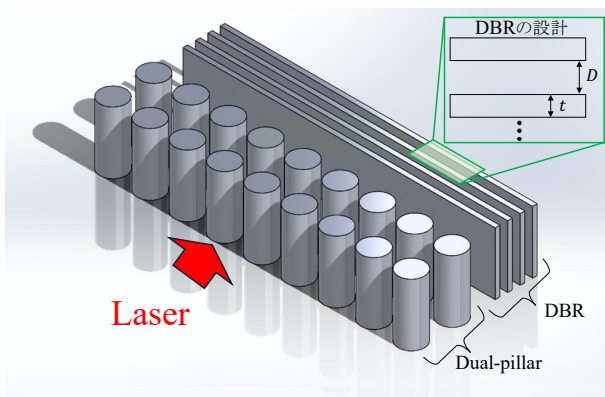


Figure 3: A Dual pillars DLA structure with DBR.

3.2 加速電場の計算

加速構造の構造周期は、式(1)の周期長であれば電子加速が可能である。構造周期 $L = \beta\lambda$ とした時の加速構造のモデルを作成し、レーザー電場の計算を行った。

計算には電磁界解析ソフトである CST studio を使用した。中心波長 $\lambda = 2 \mu\text{m}$ 、 $\beta = 0.3$ 、ギャップサイズ 200 nm とし、構造周期 $2L$ の周期境界内におけるレーザー電場の計算結果を Fig. 4 に示す。図にはビーム進行方向電場 E_z の分布を示しており、これにより、ビーム軌道上に加速電場が生成されていることが分かる。また電子は光速比 β であるため位相 $\phi = 0^\circ$ から 360° にかけて距離 L を進む。Fig. 4 の $\phi = 0^\circ, 90^\circ$ における加速電場が共に周期 L の規則性を持つことから、電子と加速電場の位相速度が一致していることがわかる。

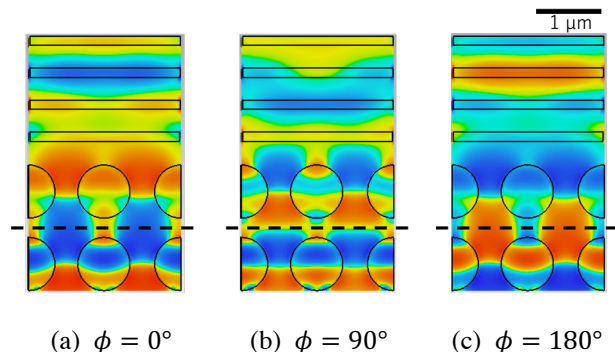


Figure 4: Electric field calculation at $L = \beta\lambda$ (color bar: Electric field along the electron beam direction).

3.3 ギャップサイズと加速勾配

電子の加速にレーザー電場の近接場を利用するには、加速構造のギャップサイズが十分に小さい必要がある。一方で、電子に対しギャップサイズが十分に大きくない時、加速する電子ビームが加速構造と衝突することによる損失が生じる。そのため、電子ビームと加速勾配に合わせて適切なギャップサイズを設定する必要がある。これまでの研究では、ギャップサイズをできるだけ小さくし、高加速勾配を得ることが目的とした研究が多くみられるが、本研究では加速勾配とスループット両方を追求することを目指す。

まずは電子との衝突を考慮せず、単純なギャップサイズと加速勾配の関係について調査を行なった。3.2 と同様に構造周期 $L = \beta\lambda$ の加速構造に対し CST studio を用いた電場計算を行った。入射するレーザー電場の振幅

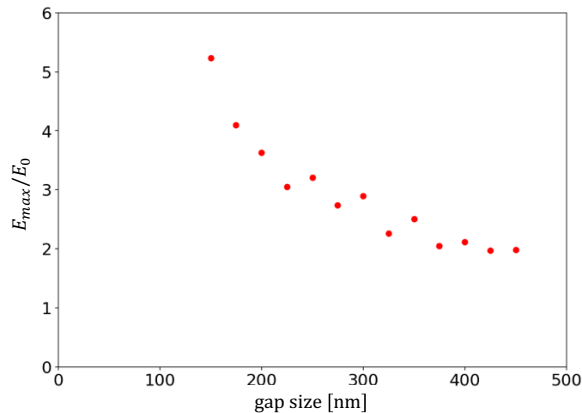


Figure 5: Acceleration gradient for different gap sizes at $L = \beta\lambda$.

E_0 に対するギャップ内におけるビーム方向の最大電場 E_{max} の比を調査し、ギャップサイズごとに比較した結果を Fig. 5 に示す。

ピラー構造を用いない場合には、DBR からの反射波と入射波との重ね合わせにより、ビーム軌道上における最大電場の比は 2 となる。すなわち電場の比が 2 より大きい値のとき、ピラーによって生じた近接場を用いて加速電場を大きくすることがわかった。Figure 5 よりギャップサイズが小さいほど、より強い加速電場が生じることを確認し、ギャップサイズとの関係を明らかにすることができた。

4. まとめと今後の計画

誘電体レーザー加速のレーザー誘電体加速を用いたロスが極力少ない電子加速の実現に向け、テストスタンドの開発を行っている。

誘電体の加速構造について、基本構造として DBR を備えたデュアルピラー構造の設計を行った。構造周期 $L = \beta\lambda$ の時のレーザー電場を CST studio を用いて計算し、速度 βc の電子を加速可能な加速電場の形成を確認した。またギャップサイズごとの加速電場を比較することで、ギャップサイズと加速勾配が負の相関関係を持つことを確認した。

今後、さらに DLA 構造の設計を進め、プロトタイプ of 構造製作、加速試験による評価を行っていく。

謝辞

本研究は、文部科学省「将来加速器の性能向上に向

けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T.Chlouba *et al.*, “Coherent nanophotonic electron accelerator”, *Nature*, 622, pp.476-480(2023).”
- [2] K.P.Wootton *et al.*, “Demonstration of acceleration of relativistic electrons at a dielectric microstructure using femtosecond laser pulses”, *Optics letters*, 41, pp.2696-2699(2016).
- [3] J. Breuer *et al.*, “Subrelativistic Alternating Phase Focusing Dielectric Laser Accelerators”, *Physical Review Letters*, 132, 085001(2024).
- [4] D. Cesar *et al.*, “High-field nonlinear optical response and phase control in a dielectric laser accelerator”, *Communications Physics*, 1, 46 (2018).
- [5] J. Breuer and P.Hommelhoff, “Laser-based acceleration of nonrelativistic electrons at a dielectric structure”, *Physical review letters*, 111.13 (2013).
- [6] J. Breuer *et al.*, “Dielectric laser acceleration of electrons in the vicinity of single and double grating structures—theory and simulations”, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 47,23 (2014).
- [7] P. Yousefi *et al.*, “Silicon dual pillar structure with a distributed Bragg reflector for dielectric laser accelerators: Design and fabrication”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators*, 909, pp. 221-223(2018).