

誘電体レーザー加速に向けたデュアルピラー構造の加速シミュレーション

SIMULATING ACCELERATION OF DUAL PILLAR STRUCTURE FOR DIELECTRIC LASER ACCELERATION

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

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

^{A)} The University of Tokyo

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

Abstract

Dielectric Laser Acceleration (DLA) is a novel acceleration scheme that enables more compact devices and higher acceleration gradients compared to conventional methods. However, when the initial electron energy is low, the required microstructure geometry becomes difficult to fabricate, resulting in a lower limit for the applicable energy range. We demonstrate through simulations that adopting a $3\beta\lambda$ periodicity resolves the fabrication difficulties associated with low- β structures and enables efficient acceleration with more practical pillar designs. It was confirmed through simulations that the extended periodicity enables more practical and fabrication-friendly pillar geometries suitable for effective acceleration.

1. はじめに

誘電体レーザー加速 (DLA : Dielectric Laser Acceleration) は従来よりも小型かつ高加速勾配を実現できる新しい加速手法である。それは加速勾配を決める加速電場の最大周波数が、材料が持つ電磁場周波数の破壊閾値によって制限されることに起因し、高周波加速器に広く用いられる金属よりも DLA の加速構造に採用される誘電体の方が 2 桁程度高い破壊閾値を持つため、高加速勾配を実現できる。

誘電体レーザー加速での一般的な加速用マイクロ構造は、構造周期が加速する粒子の光速比 β とレーザー波長 λ の積でスケールされるためマイクロスケールの非常に小さな加速器としての応用が期待されている。近年加速構造として多く採用されているデュアルピラー構造は 1 枚の基板上にピラー対を周期的に配置するもので、初期に提案されたグレーティング構造と比較して製作・配置が容易である。しかしながら、初期エネルギーが低い電子での加速では周期方向の加速構造の形状が小さく構造の製作が困難である。実証試験の報告例での電子の初期エネルギーは低いものでも 30 keV 近傍 [1- 3] からの加速が主流であった。誘電体レーザー加速のみで加速器として成立するには、低エネルギーをはじめとしたすべてのエネルギー領域での加速が必要である。

そこで、本研究では、超低エネルギーからの電子加速を可能とする $3\beta\lambda$ 構造からの電子加速の実現するために、加速用マイクロ構造の設計を行うことを目的とした。電子の初期エネルギーは従来よりも 1/4 程度となる 5 keV の超低エネルギーからの加速を対象として、そのシミュレーション結果および今後の展望について報告する。

2. DLA の加速原理と設計方針

誘電体レーザー加速では加速用マイクロ構造にレー

ザーを集光し、構造によって位相調整された電場を用いて加速を行う。加速用マイクロ構造の 1 であるデュアルピラー構造は、基盤上に周期的に配列された 2 列の誘電体ピラーで構成されている。加速する粒子とレーザーの位相を同期させる必要がある。この同期条件は構造周期 L に対し光速比 β とレーザー波長 λ によって次の式(1)で与えられる。

$$L = (2N - 1)\beta\lambda \quad (1)$$

本研究では、設計の自由度の高さからデュアルピラー構造を採用する。また一般的に誘電体を用いた加速では 2 方向からレーザーを照射し、重ね合わせによって形成される加速電場を利用する。しかしながら、レーザーの位相と入射角度について厳密な調整が必要となる。この問題を解決するために、Distributed Bragg Reflector (DBR) と呼ばれる反射壁を用いた構造が提案されている [4]。デュアルピラー構造および DBR を用いた誘電体レーザー加速器の概念図を Fig. 1 に示す。

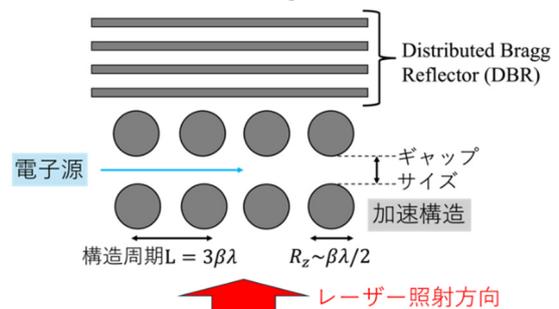


Figure 1: Schematic drawing of dual-pillar DLA.

加速用マイクロ構造は、式(1)の通り粒子の光速比 β とレーザー波長 λ の積でスケールされる。マイクロスケールの非常に微細な構造のため、フォトリソグラフィによる製作が一般的である。そのためエネルギーが十分小さい、すなわち $\beta \ll 1$ のとき構造幅が波長に対し小さくなる。

ksakaue@n.t.u-tokyo.ac.jp

波長 $2\ \mu\text{m}$ の DLA でのスケールの例に考える。構造高さ $3\ \mu\text{m}$ に対し $5\ \text{keV}$ ($\beta = 0.14$) の時 $R_z \sim \beta\lambda/2 = 140\ \text{nm}$ となり、 $\beta = 1$ の時と比較してアスペクト比が非常に大きく製作が困難な構造となることがわかる。

この課題の解決に向け、構造周期 $L = 3\beta\lambda$ ($N=3$) として構造の設計を行った。周期方向のジオメトリが改善し、より低エネルギー用の加速構造の製作が可能となる。

3. 加速シミュレーションによる構造設計

加速用マイクロ構造にはフォトリソグラフィによる加工が容易な Si を用いる。レーザーは、Si の透過波長である中心波長 $1950\ \text{nm}$ の Tm ファイバーレーザーを採用し、初期の運動エネルギー $5\ \text{keV}$ の電子を加速する誘電体レーザー加速器におけるマイクロ構造の設計を行った。ギャップサイズは $200\ \text{nm}$ 、レーザー方向の長さ R_x はピラーの箇所と真空箇所の位相差が π となるように、またビーム方向の長さ R_z は真空部に対するピラー (Si) の比率が 55% となるように設計を行った。

3.1 加速シミュレーションの妥当性検証

シミュレーションには電磁場解析ソフトである CST Studio Suite を使用した。まず先行研究における $\beta\lambda$ 構造による加速試験の結果 [5] を用いて、加速シミュレーションの検証を行う。マイクロ構造の材質は同じく Si であり、レーザーは中心波長 $1930\ \text{nm}$ を使用している。初期エネルギー $28.4\ \text{keV}$ の加速を粒子トラッキングによりエネルギーを算出した。

シミュレーション内で再現したマイクロ構造と加速位相の電子に対する粒子トラッキングの結果を Fig. 2 に示す。

粒子は構造周期ごとにゲインを得ており、 $\beta\lambda$ 構造での加速試験の再現に成功した。これにより加速シミュレーションの妥当性が確認された。

3.2 $3\beta\lambda$ 構造の設計

加速位相の電子が常に加速される $\beta\lambda$ 構造に対し、 $3\beta\lambda$ 構造における電子は 1 構造周期ごとに 6 回の加減速を受ける。そのため位相だけでなく、電場分布に着目し

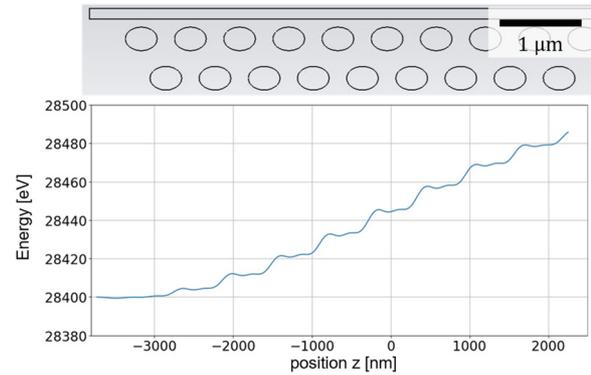


Figure 2: Simulation validation of energy gain in $\beta\lambda$ period.[4]

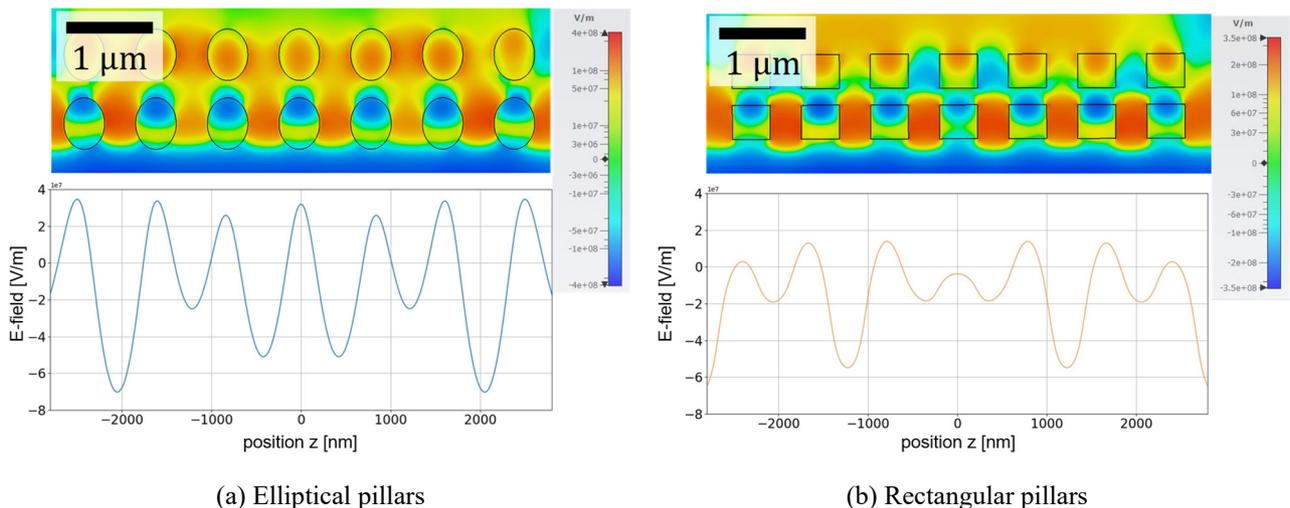
て設計を行う必要がある。

そこで $\beta\lambda$ 構造において一般的に使用される楕円ピラーと、ピラー周辺の電界集中度が低い矩形ピラーの構造を設計した。入力するレーザーは電界強度約 $200\ \text{MV/m}$ の平面波とし、マイクロ構造内で形成される加速電場を計算した。設計した楕円ピラーと矩形ピラーの構造、および形成される電子ビーム軸上電場のラインプロファイルを Fig. 3 に示す。楕円ピラーにおいて、ピラー中央付近における電界強度が集中し正味の加速が 0 となることがわかった。また矩形ピラーは楕円ピラーと比較して軸上の最大電界強度が低くなり、電界の集中度が緩和される様子が確認された。

3.3 加速シミュレーション

設計した構造、加速電場に対し $5\ \text{keV}$ の電子ビームを入射する条件で CST Studio Suite による粒子トラッキングを行った。楕円ピラー、矩形ピラーそれぞれにおいて、最も加速された粒子のエネルギー変化の様子を Fig. 4 に示す。

1 構造周期ごとのエネルギーに注目すると、楕円ピラーでは平均加速勾配が $0.17\ \text{MeV/m}$ となった。一方矩形ピラーでは 1 構造周期ごとに加速が可能となっており、



(a) Elliptical pillars

(b) Rectangular pillars

Figure 3: Schematics of the dual-pillar structure, electric field (E_z) and the line profile of the longitudinal along the beam axis at the center of the gap.

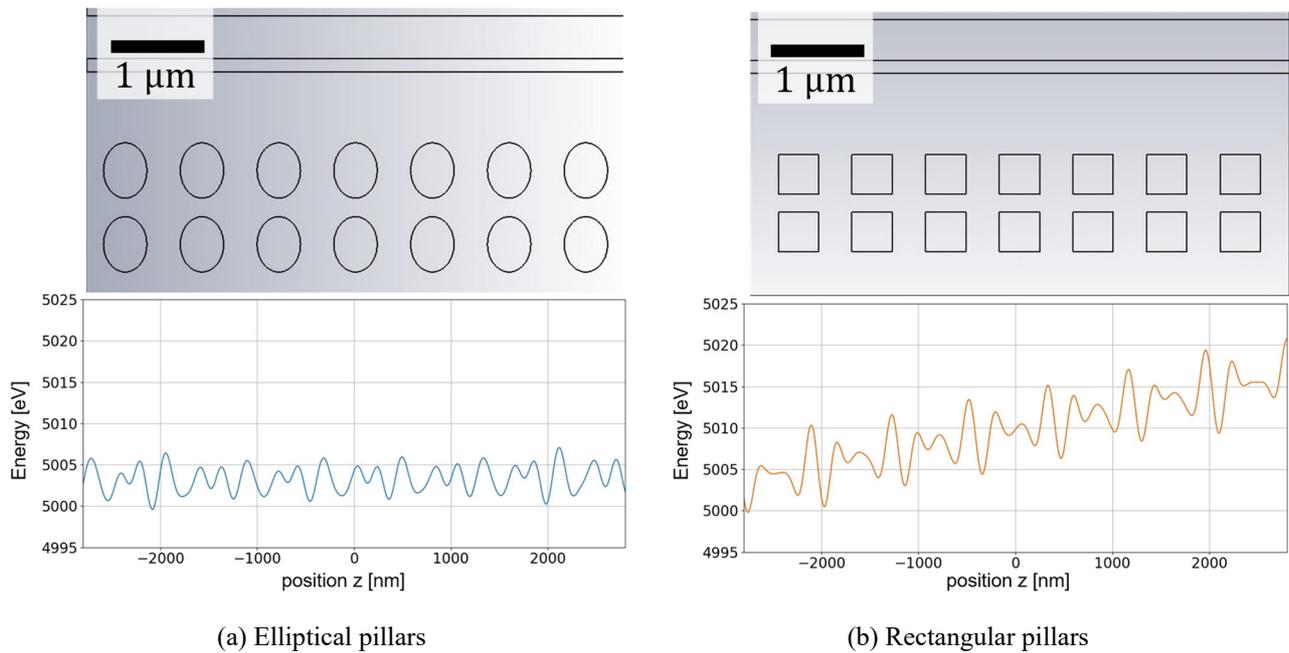


Figure 4: Energy evolution of the most accelerated particle obtained from particle tracking simulations.

平均加速勾配は 2.14 MeV/m となった。以上より $3\beta\lambda$ 構造における矩形ピラーの優位性を示した。

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

4. まとめと今後の計画

誘電体レーザー加速の実証に向けて、加速用マイクロ構造の設計とDLA テストスタンドの開発を進めている。

低エネルギーにおける加速を行うため、構造周期 L を $3\beta\lambda$ とした構造を採用した加速用マイクロ構造の設計を行った。ピラー形状による比較を行うため、CST Studio Suite による電場計算・粒子トラッキングシミュレーションを行った。 $3\beta\lambda$ 構造において楕円ピラーでは加速を行うことができず、一方で矩形ピラーを用いることにより加速が可能となることを確認した。

今後、マイクロ構造の最適化を進め、プロトタイプ of マイクロ構造の作成、および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

参考文献

- [1] D. S. Black *et al.*, “Net Acceleration and Direct Measurement of Attosecond Electron Pulses in a Silicon Dielectric Laser Accelerator”, *Physical review letters*, 123, **26**, 264802 (2019).
- [2] P. Yousefi *et al.*, “Dielectric laser electron acceleration in a dual pillar grating with a distributed Bragg reflector”, *Optics letters*, 4, **6**, pp1520-1523 (2019).
- [3] L. Brückner *et al.*, “Mid-infrared dielectric laser acceleration in a silicon dual pillar structure”, *Opt. Express*, 32, 28348-28355 (2024).
- [4] 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).
- [5] R. Shiloh *et al.*, “Particle acceleration using top-illuminated nanophotonic dielectric structures”, *Optics Express*, 29, **10**, pp. 14403-14411 (2021).