講演番号:
16pE522-9

随伴変数法を用いたトップイルミネーション用DLA加速構造の設計

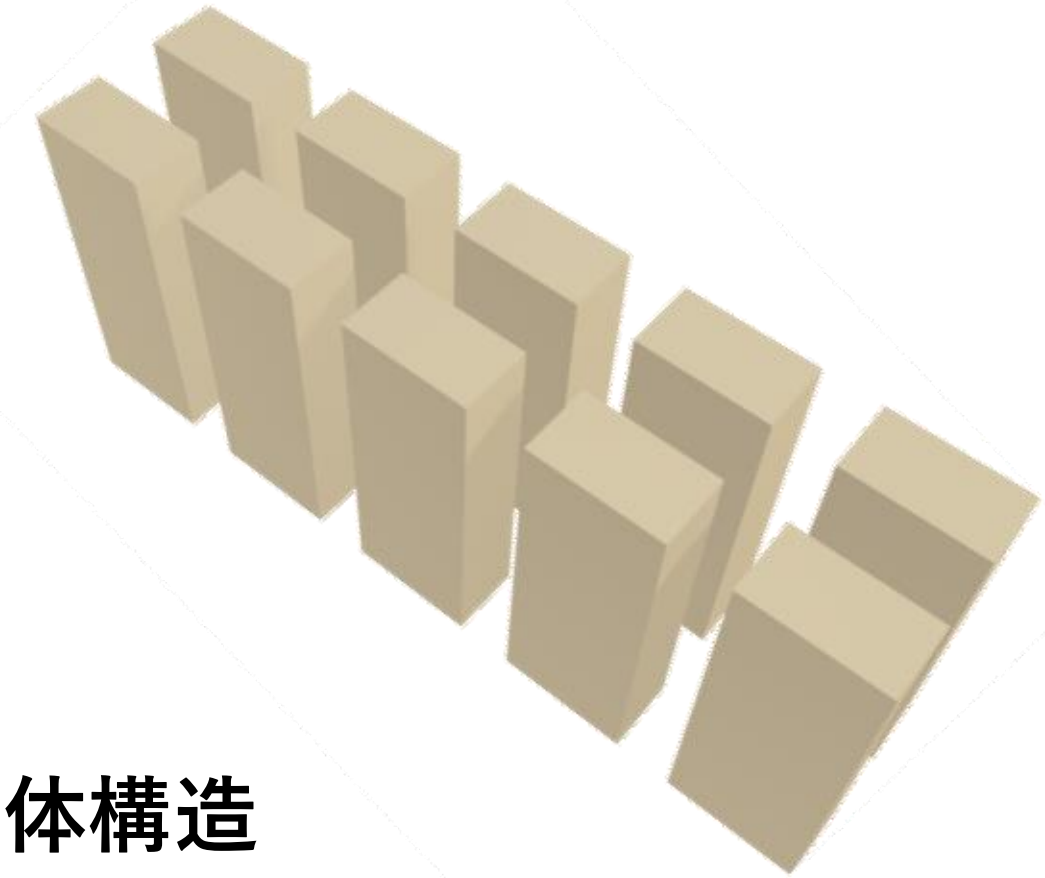
堀田 陽生

岩橋 快斗, 奥村 恭幸[A], 坂上 和之[B], 丸 征那[B]

東大理, 東大素セ[A], 東大工[B]

背景: DLA とは

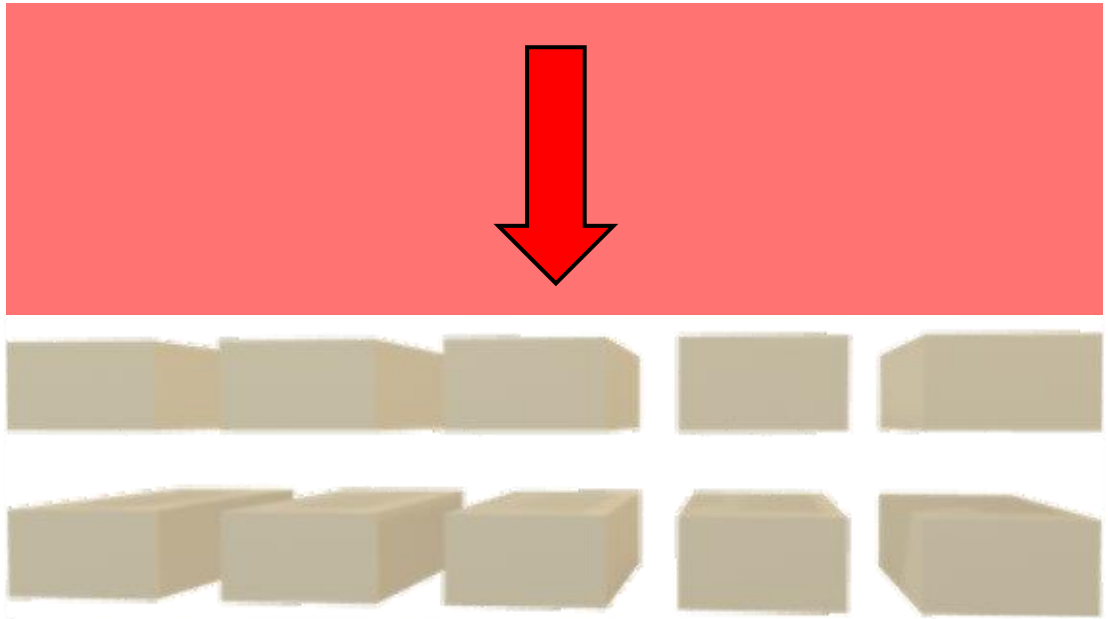
DLA = 誘電体レーザー加速器(Dielectric Laser Accelerator)の略



誘電体構造

背景: DLA とは

DLA = 誘電体レーザー加速器(Dielectric Laser Accelerator)の略



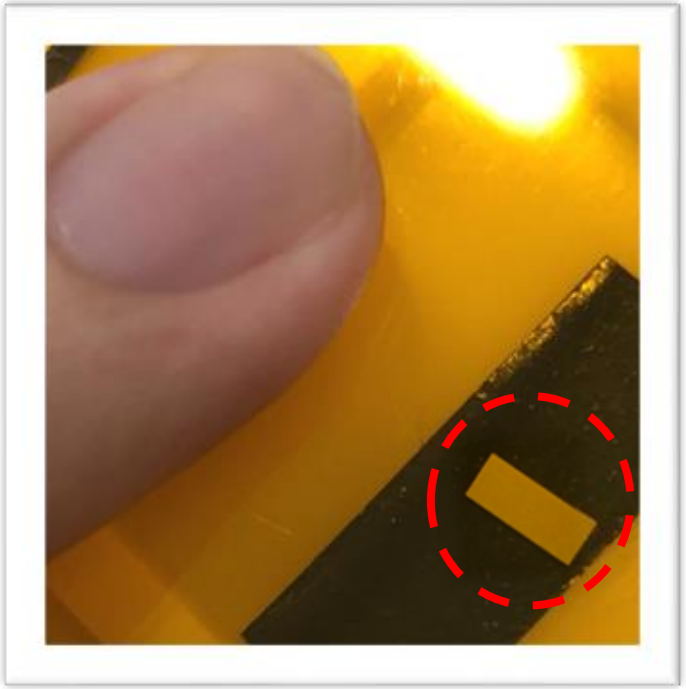
レーザー

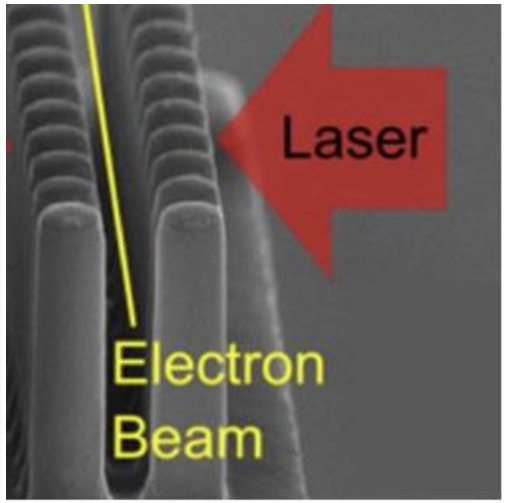
電子

誘電体構造

背景: DLA とは

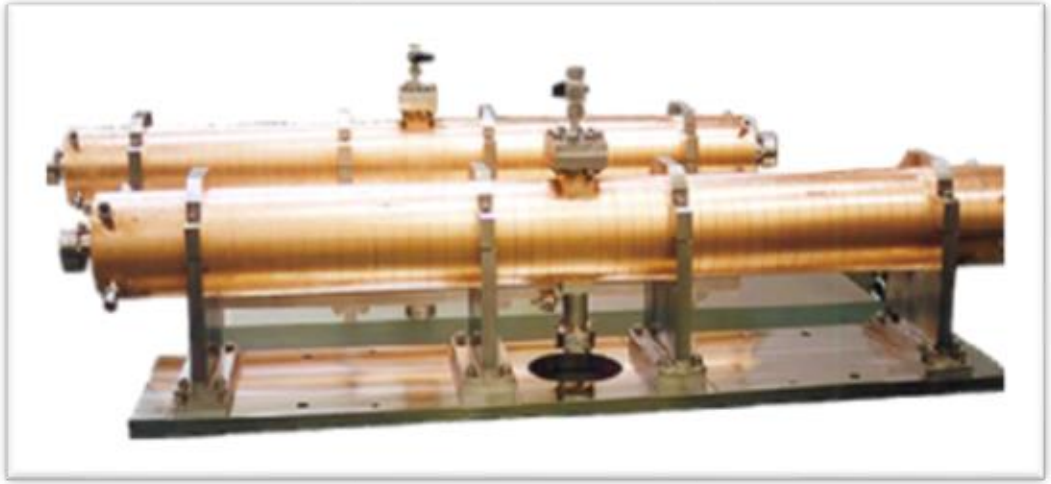
DLA





（拡大イメージ）
[2] Leedle (2018)

RF加速器



[1] England (2014)

構成要素	**誘電体・レーザー**	金属・マイクロ波
構造周期	**1 μm**	数 cm
加速勾配	**0.1～1 GV/m（10～100 倍）**	10～100 MV/m

背景: 応用先

[3] Emma (2022)

DLA



小型・高勾配

超高速電子源

fs 電子パルスで
分子の動きを撮る

内視鏡型がん治療

患部まで運んで
直接電子線を照射

小型コライダー

数十 kmの巨大施設を
劇的に小型化

原理: 位相整合と近接場

[1] England (2014)

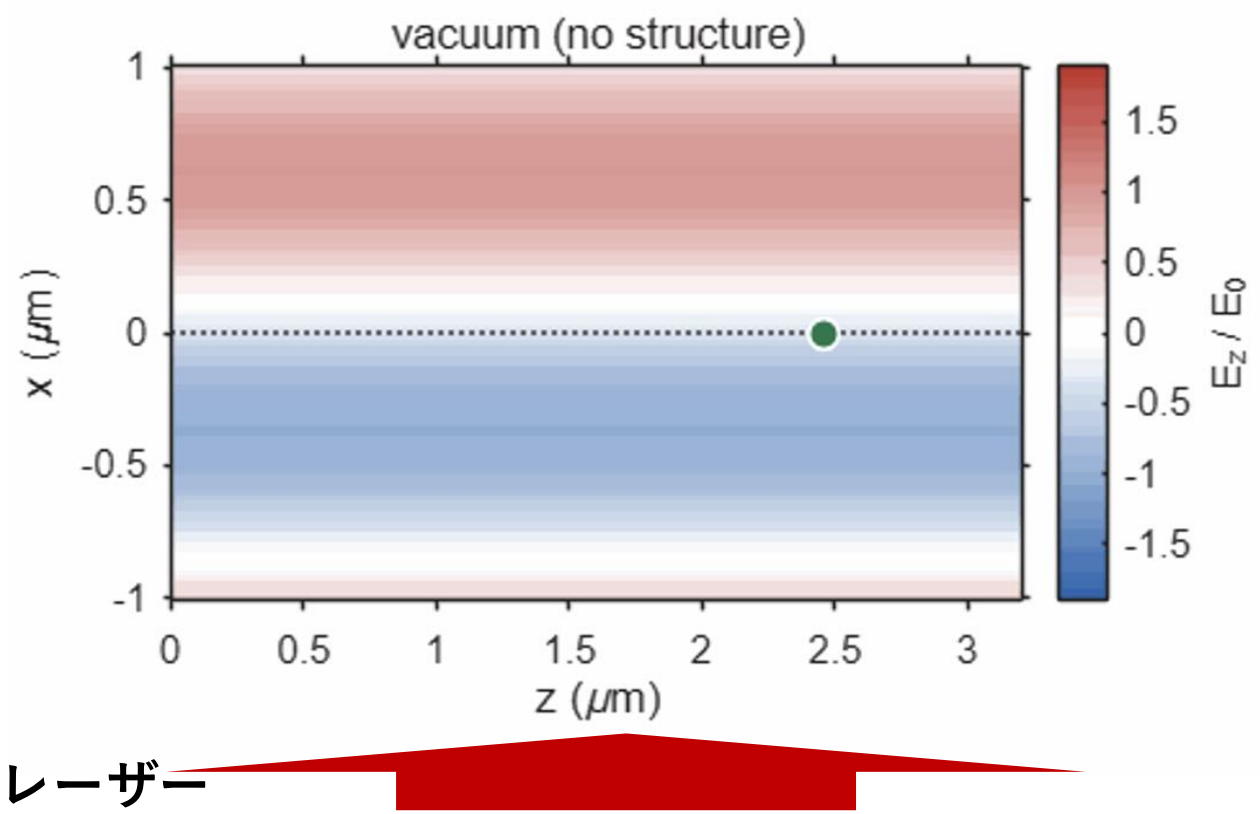
1. 位相整合

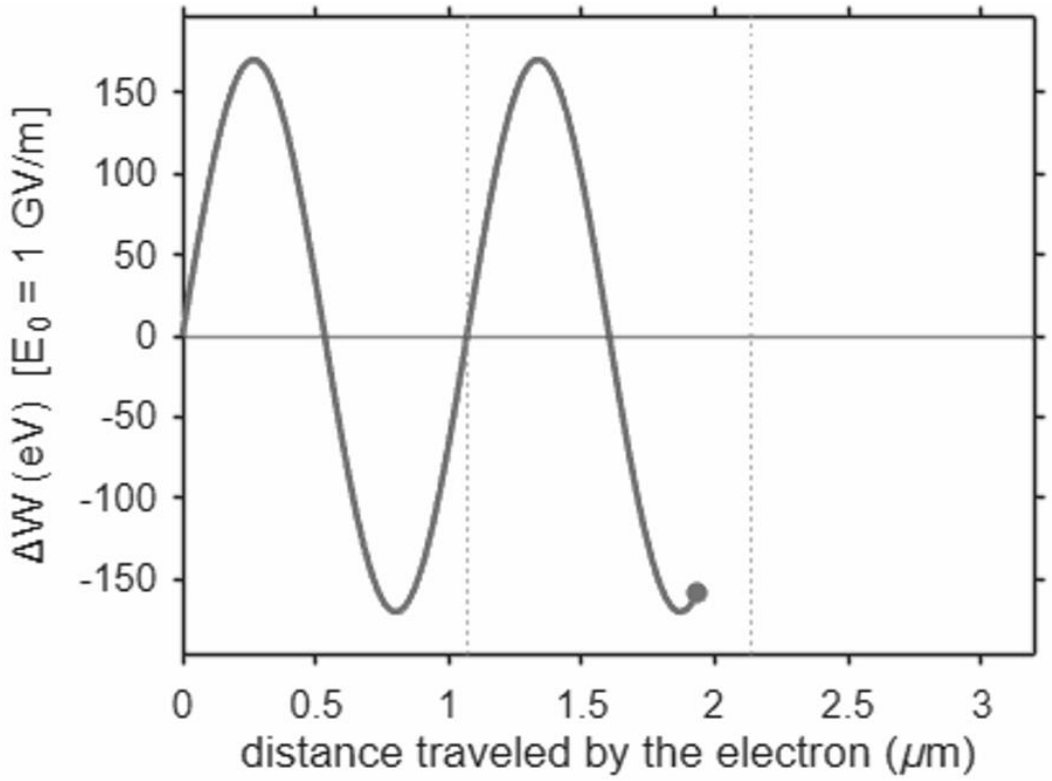
何もない真空中で、レーザーだけで電子を加速し続けられるだろうか？

原理: 位相整合と近接場

[1] England (2014)

1. 位相整合

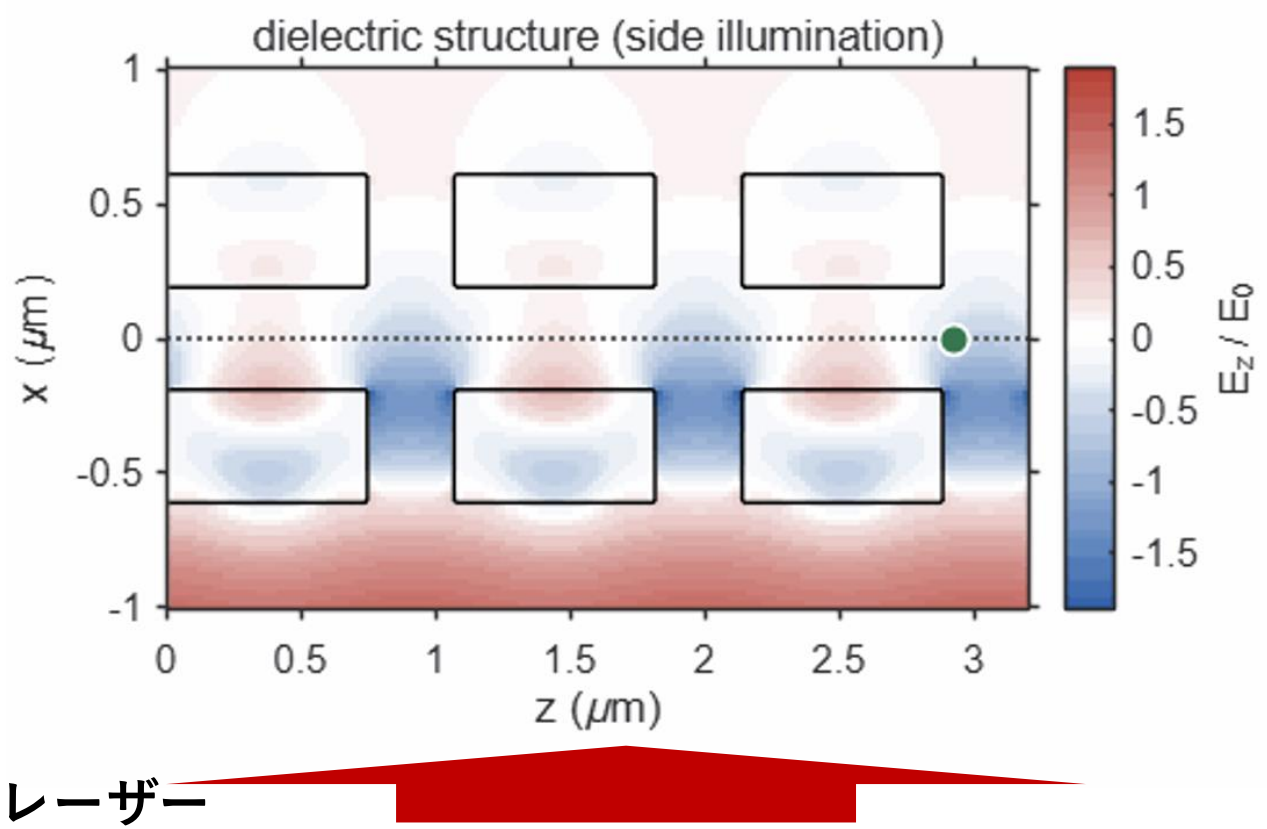


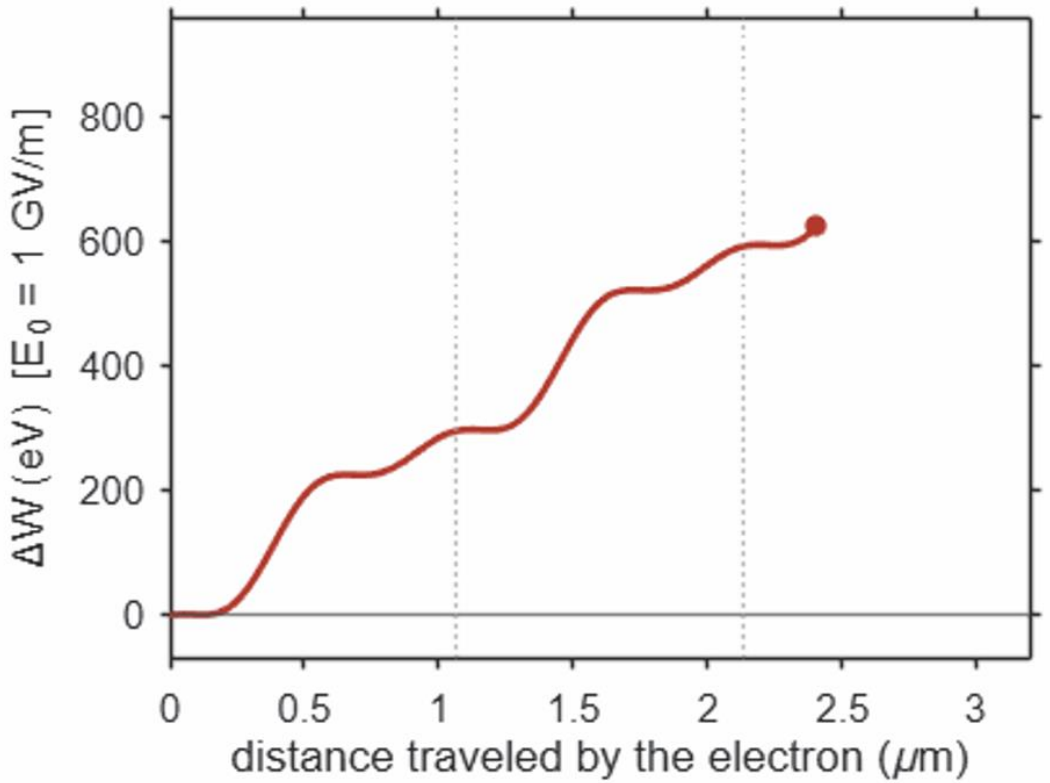


原理: 位相整合と近接場

[1] England (2014)

1. 位相整合

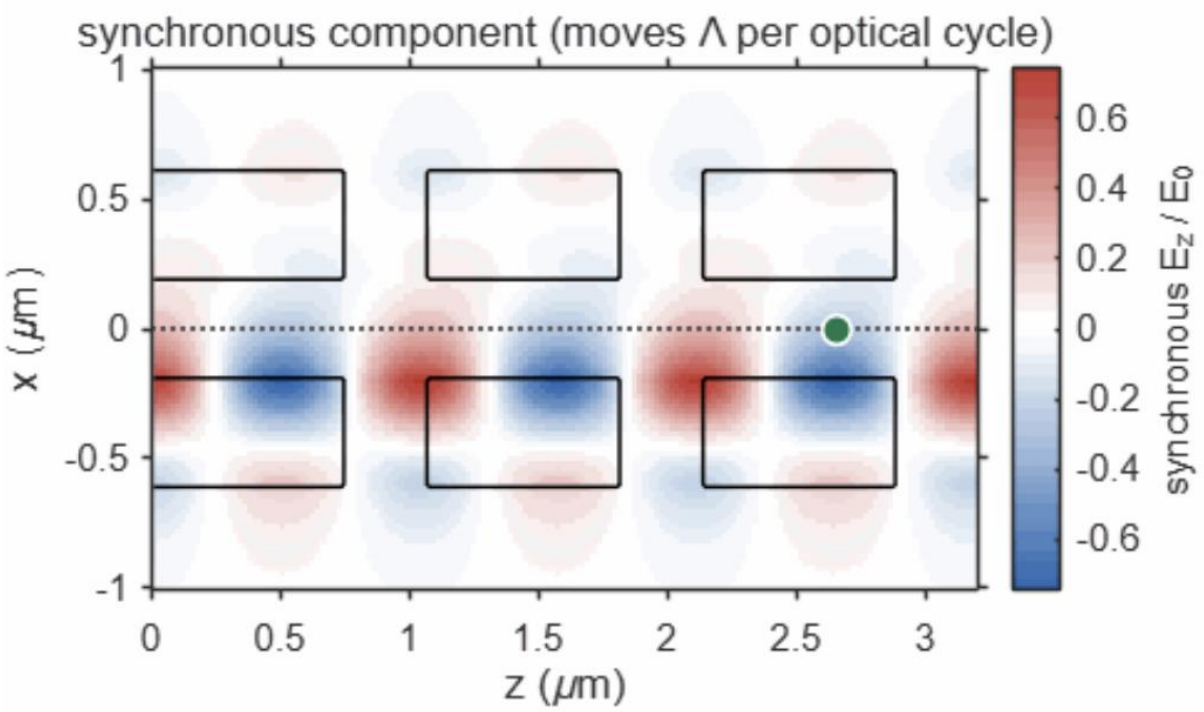


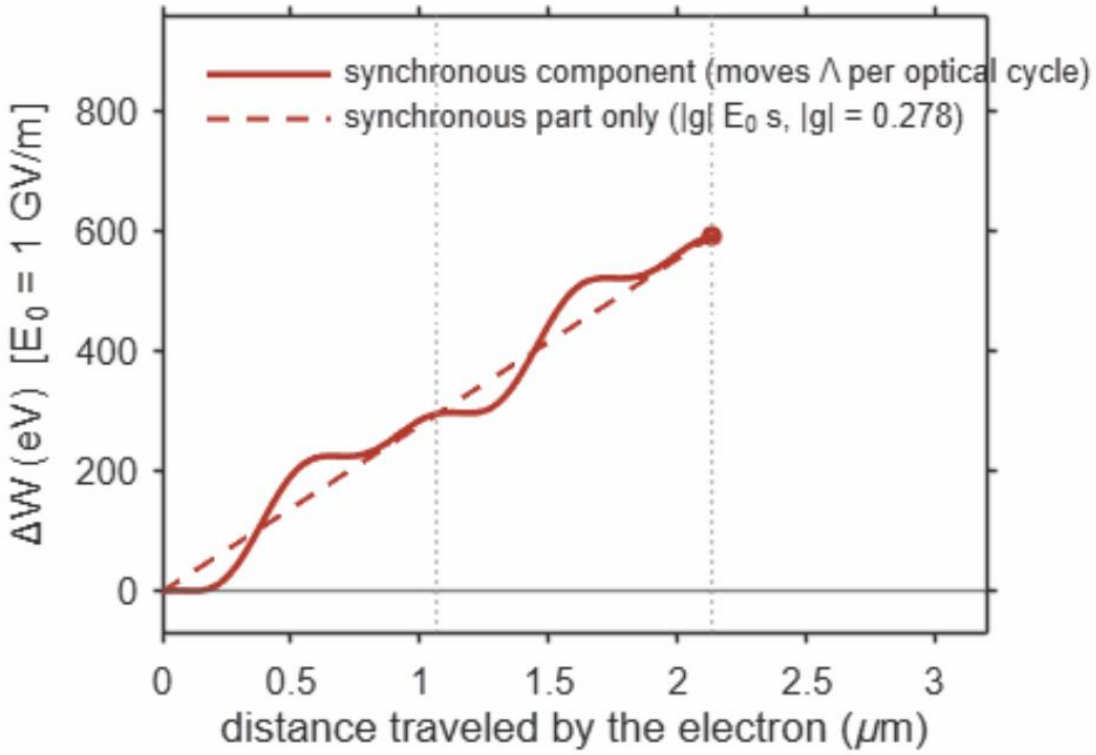


原理: 位相整合と近接場

[1] England (2014)

1. 位相整合





原理: 位相整合と近接場

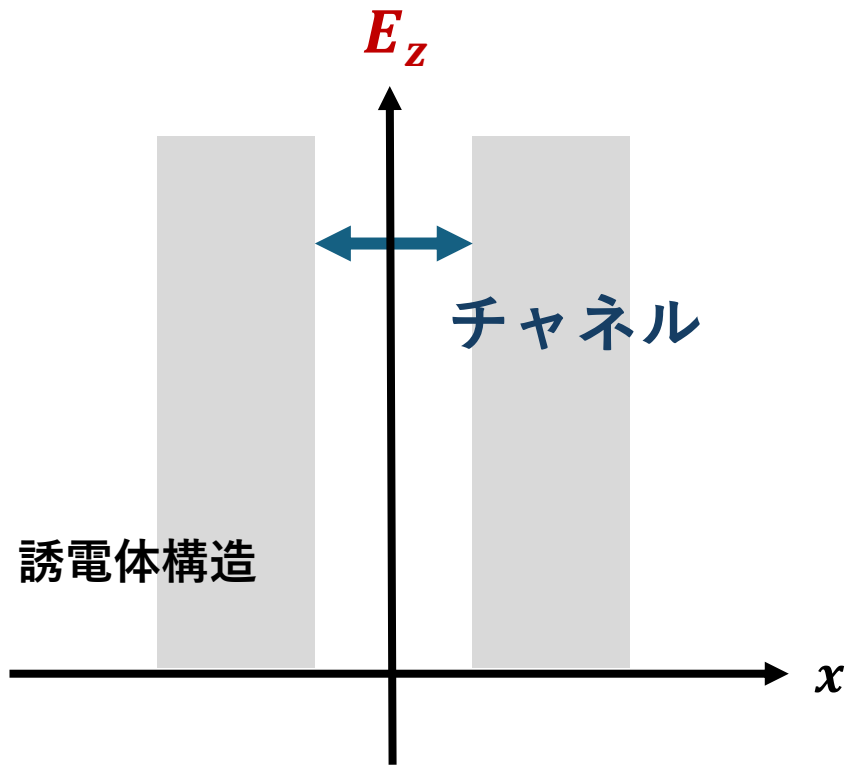
[1] England (2014)

1. 位相整合

$$\Lambda = \beta\lambda$$

構造周期 Λ で、場を空間高調波に分け、その一つを電子速度 βc と同期させる条件。
λは、レーザー波長。

2. 近接場



原理: 位相整合と近接場

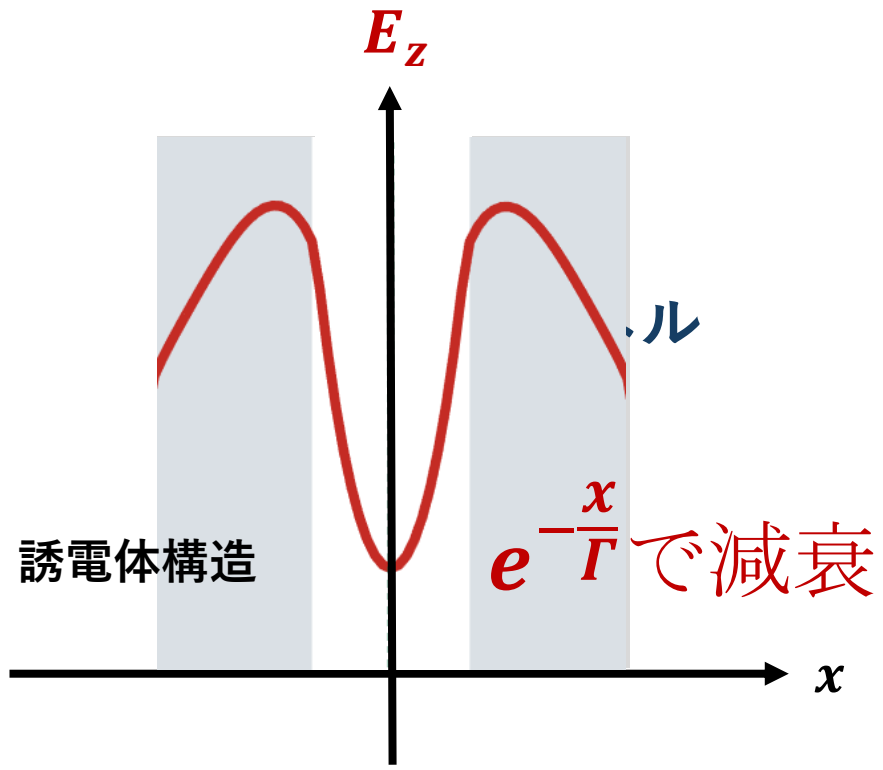
[1] England (2014)

1. 位相整合

$$\Lambda = \beta\lambda$$

構造周期 Λ で、場を空間高調波に分け、その一つを電子速度 βc と同期させる条件。
λは、レーザー波長。

2. 近接場



原理: 位相整合と近接場

[1] England (2014)

1. 位相整合

$$\Lambda = \beta\lambda$$

構造周期 Λ で、場を空間高調波に分け、その一つを電子速度 βc と同期させる条件。
λは、レーザー波長。

2. 近接場

$$e^{-\frac{x}{\Gamma}}$$

同期成分は、チャネル中心へ急速に減衰する。

→ チャネル幅は狭い必要がある

先行研究

一般的な設計: 人が形を決める → 寸法を変えて計算 → 性能

その形が本当に良いのかは、分からない…

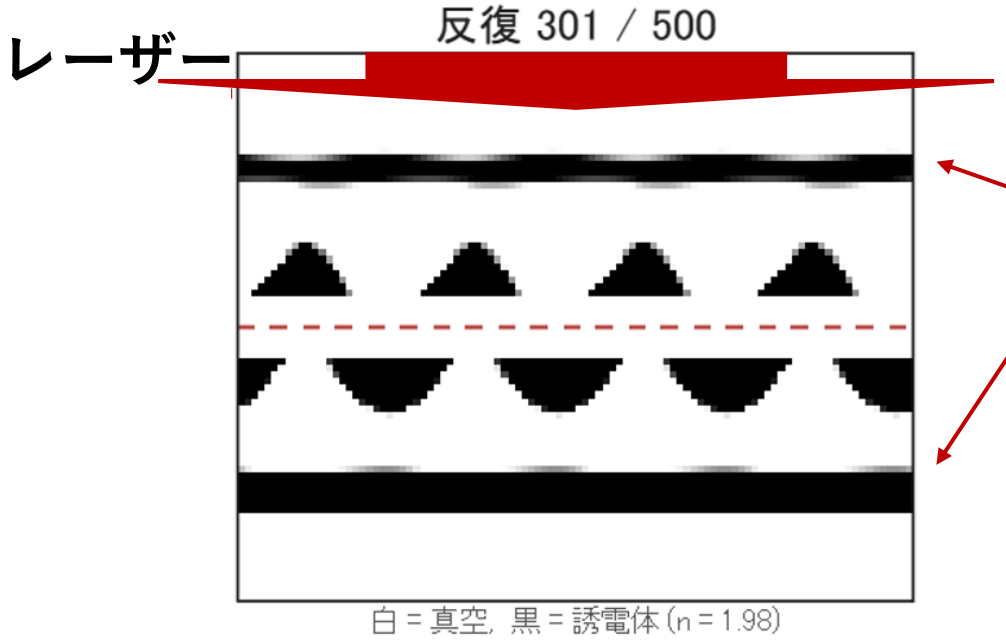
逆設計: 構造を得る ← 計算機が形そのものを探す ← 欲しい性能を決める

[4] Hughes (2017)

先行研究

一般的な設計: 人が形を決める → 寸法を変えて計算 → 性能

逆設計: 構造を得る ← 計算機が形そのものを探す ← 欲しい性能を決める

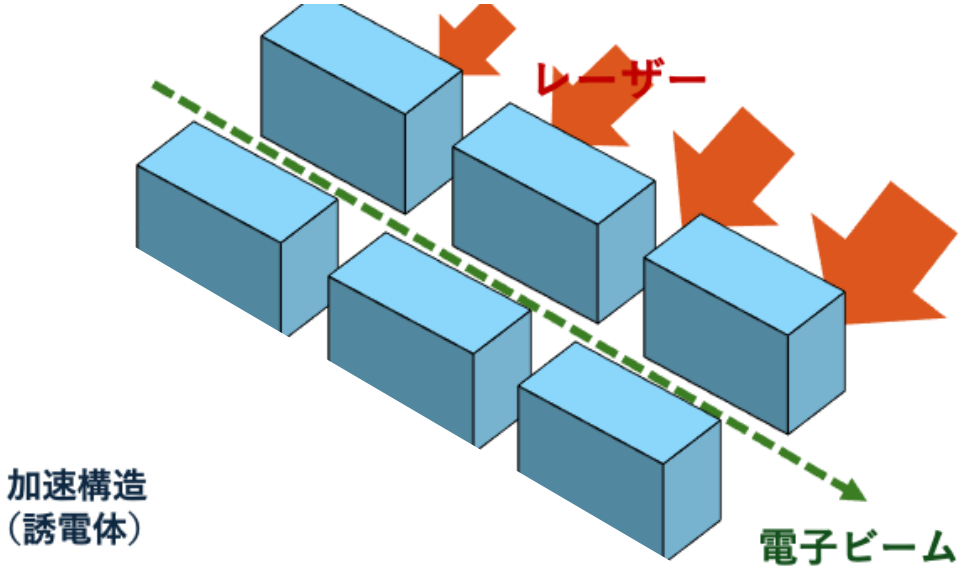


反射鏡を含む、非自明な構造を導き出すことに成功した！ [4]

照射方式: サイド vs トップ

[5] Shiloh (2021)

サイド

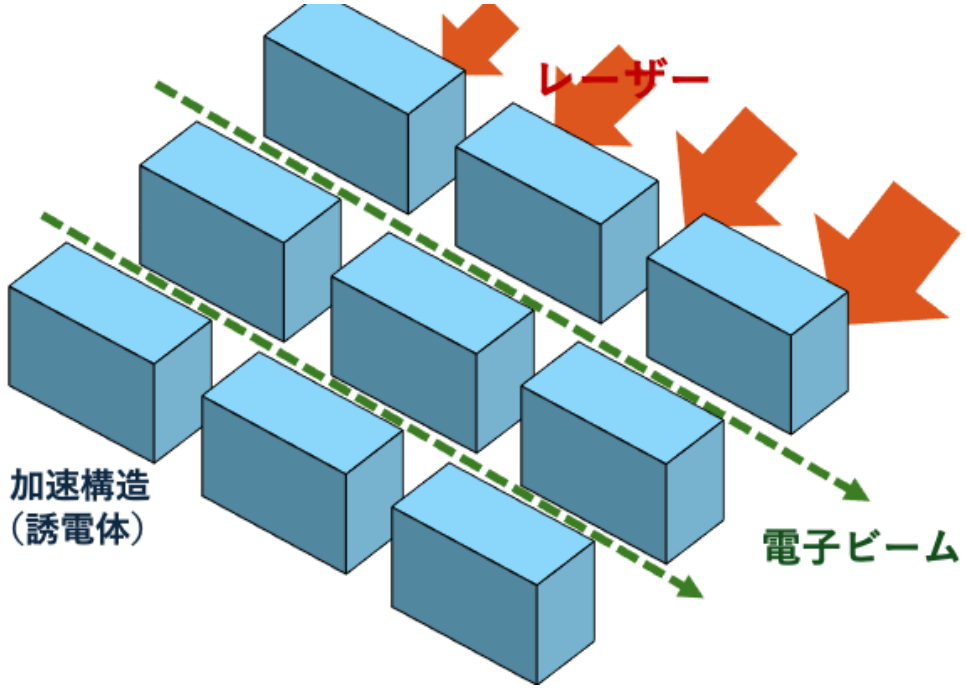


電流を増やしたい

照射方式: サイド vs トップ

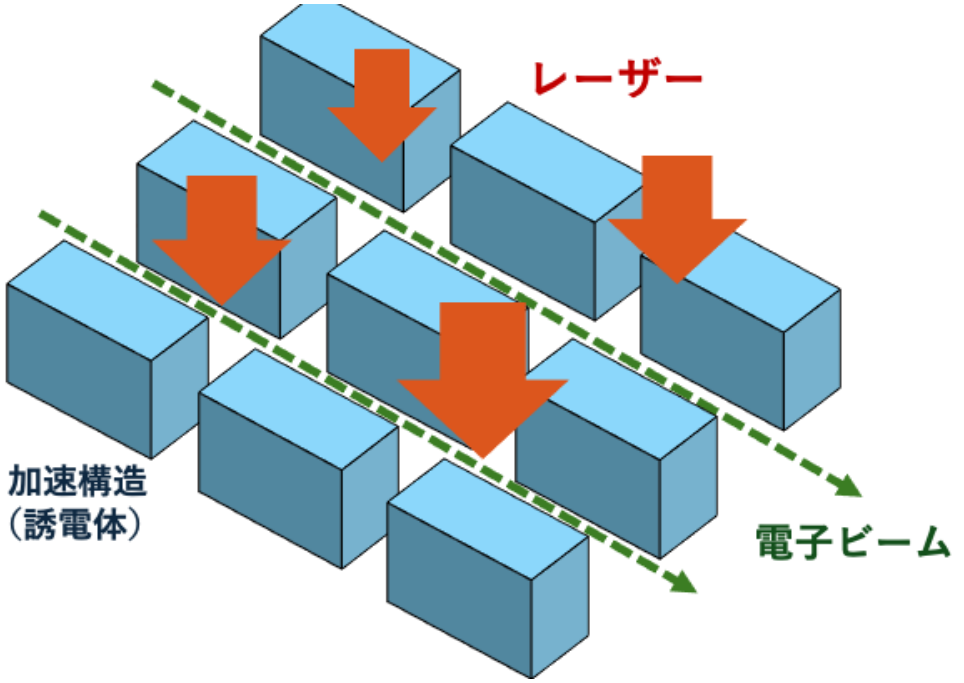
[5] Shiloh (2021)

サイド



レーザーが奥へ届かない。
→加速勾配が小さくなる

トップ



近年の主流

トップイルミネーションの逆設計は未開拓！

目的

- トップイルミネーション用 DLA構造を、逆設計できるようにする

  ・最適な構造を得る

  ・電磁界解析ソフト CSTで、独立に検証する

課題と解決

課題:

トップイルミネーションでは、

$$k_y \neq 0$$

→サイドの2次元とは異なり、
3次元での計算が求められる。

→しかし、フル3Dでは計算
コストが増大してしまう。

解決:

2.5D FDFDの実装

$$E(x, y, z) = E(z, x)e^{ik_y y}$$

・構造のy方向一様性を利用

→位相項を解析的に分離し、
3次元問題を2次元格子上の
3成分ベクトル問題へ圧縮した

方法: MATLAB による逆設計

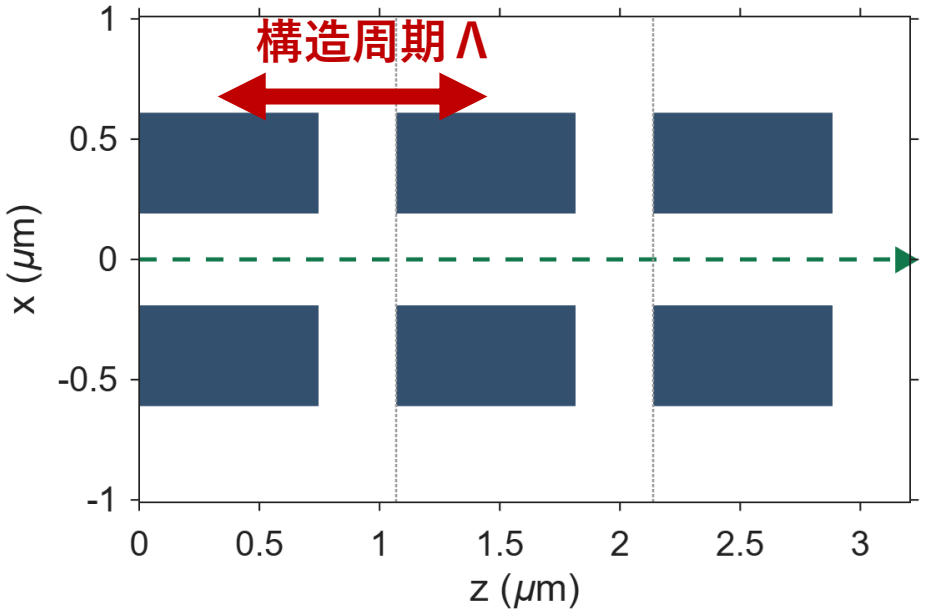
初期構造 $\varepsilon(z,x) \in [1, 11.90$

前進解 2.5D FDFD で電磁場

目的関数 $J = \dfrac{|G|}{E_{\max}}$

随伴解

勾配



加速勾配 G:

$$G = \frac{1}{\Lambda}\int_0^{\Lambda} E_z\, e^{i\frac{2\pi}{\Lambda}z}\ \mathrm{dz} \,/\, \underline{E_0}$$

入射振幅

方法: MATLAB による逆設計

初期構造 $\varepsilon(z,x) \in [1, 11.90]$ (Si)

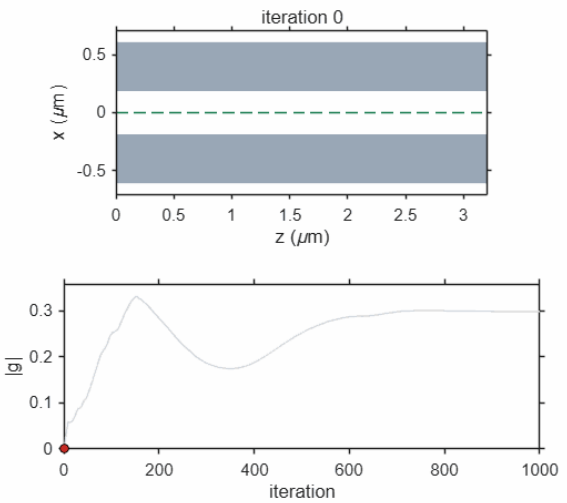
前進解 2.5D FDFD で電磁場を計算

目的関数 $J = \dfrac{|G|}{E_{\max}}$ [4]

随伴解 もう一度FDFD (転置系)

勾配 $\dfrac{\partial J}{\partial \varepsilon}$ を全セルで一括取得

更新 Adam ＋ フィルタ・射影で 2 値化



最適化の途中経過

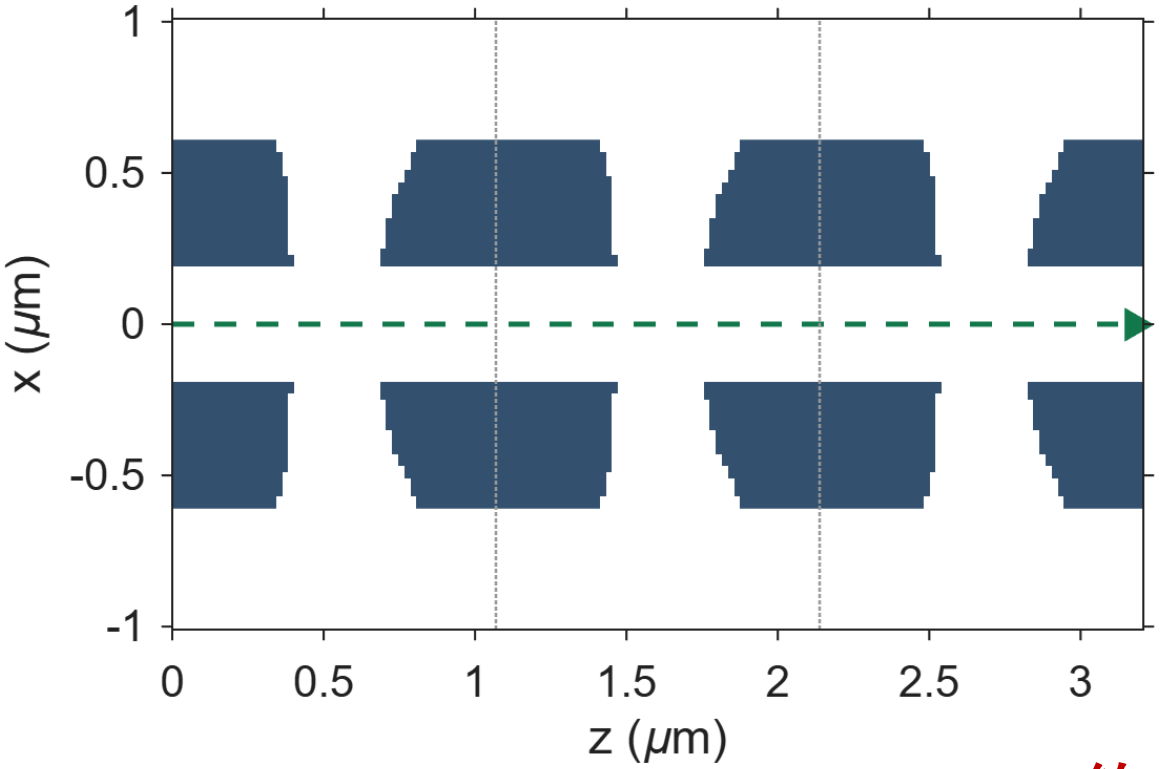
灰色（Si と真空の中間）の設計領域から始め、1000 回で Si か真空かの形になる

計算時間 約 1 時間

条件	値
レーザー波長 λ ／ 電子	1.95 μm ／ 100 keV（β = 0.548）
周期 $\Lambda = \beta\lambda$	**1.069 μm**
チャネル ／ 設計領域	**0.38 μm** ／ 片側 0.42 μm
柱の高さ H	2 μm
材料 ／ 格子	Si（ε = 11.90）／ 20 nm
目的関数の E_max	Si の中の |E| の最大
製造への配慮	最小線幅フィルタ 140 nm・縁 ±20 nm に頑健化

結果1: 得られた構造と加速勾配

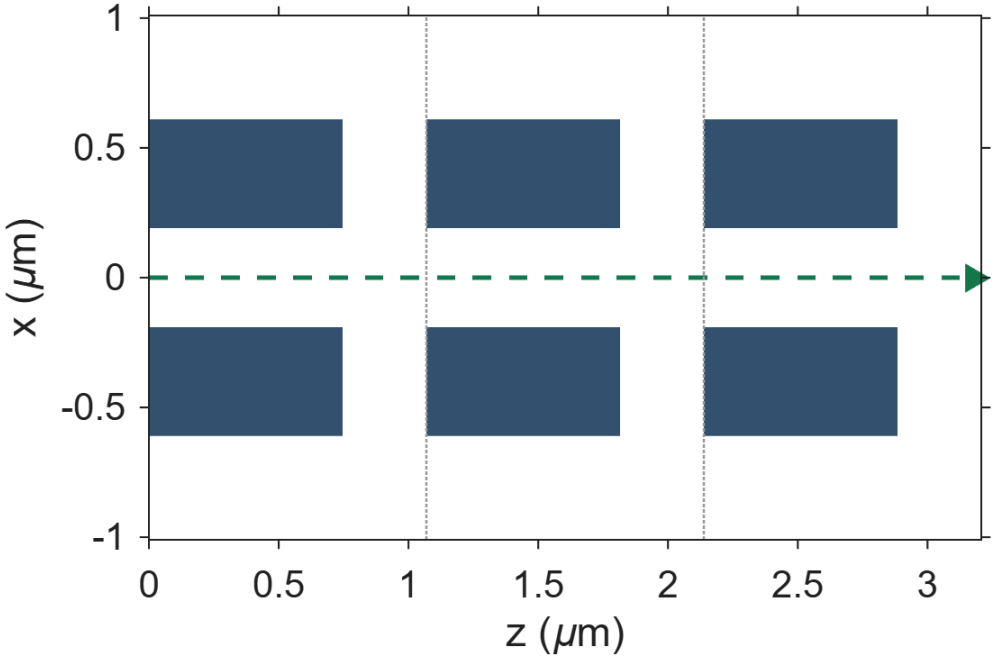
逆設計した構造



|G| = 0.311

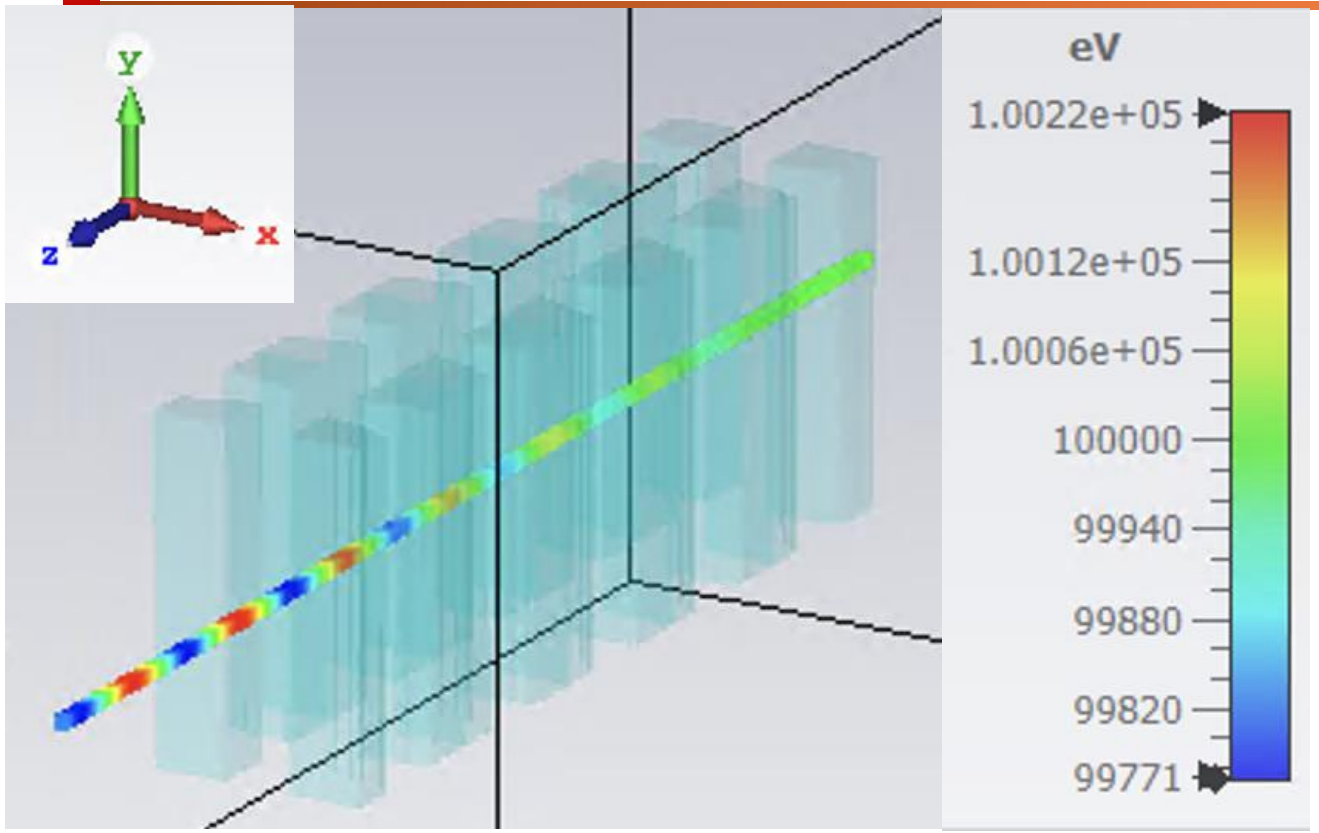
約 1.51 倍

手で作った単純構造



|G| = 0.206

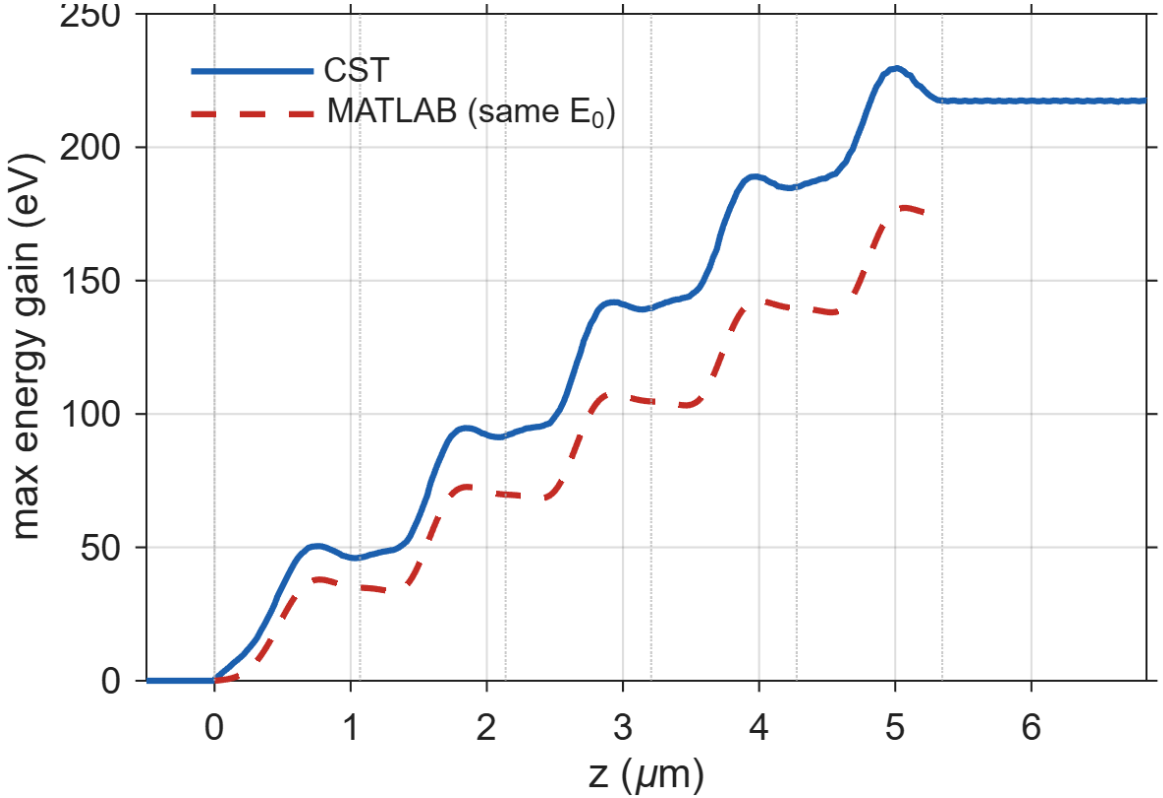
結果2: CST（3D 粒子計算）による検証



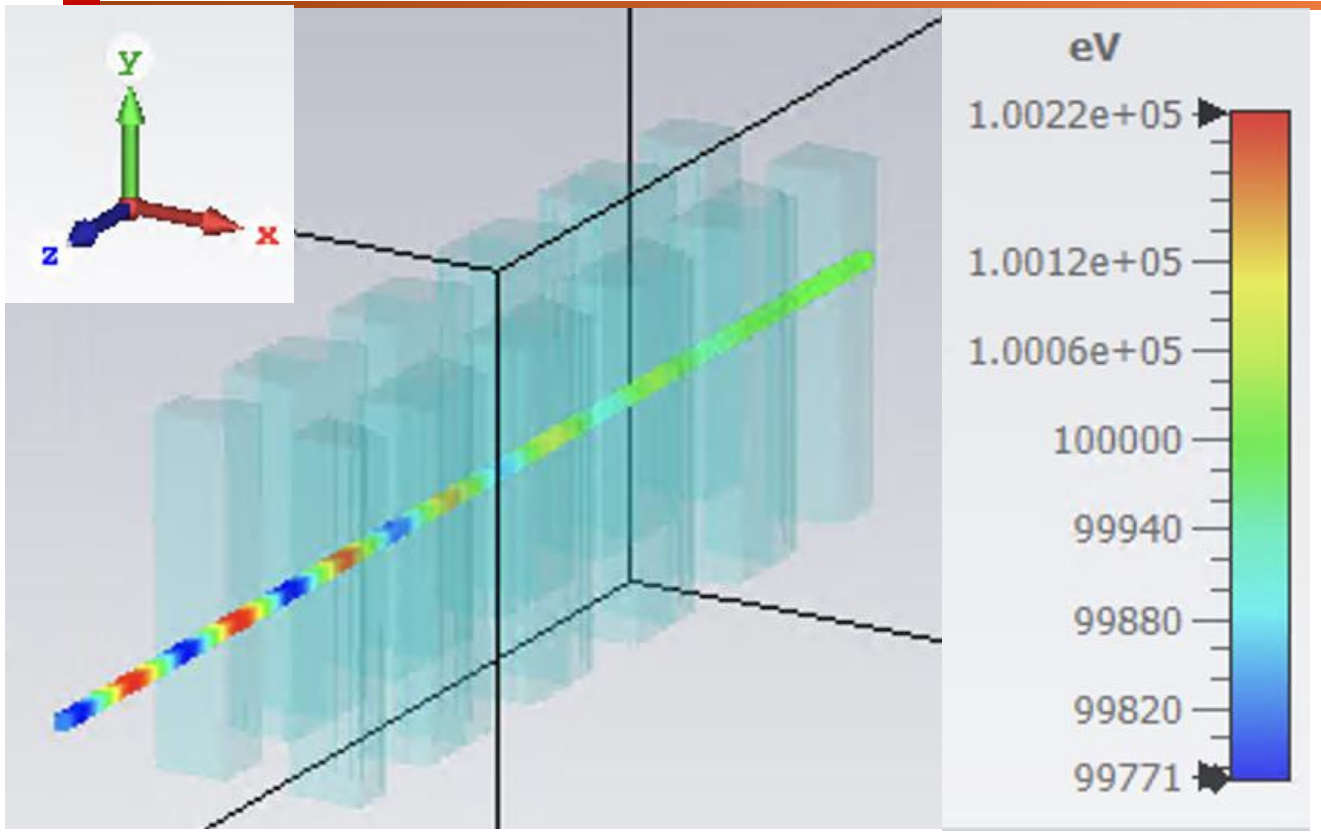
電子が加速(赤)される様子

：有限の体積を反映した3D空間での
パーティクルトラッキングを実行。

最良の位相の
電子のエネルギー利得



結果2: CST（3D 粒子計算）による検証



電子が加速(赤)される様子

：有限の体積を反映した3D空間での
パーティクルトラッキングを実行。

CSTとの比較

|G|	MATLAB	CST
逆設計	0.311	0.388
単純	0.206	0.239
逆設計 ÷ 単純	**1.51**	**1.62**

※ 絶対値は CST が 1.16～1.25 倍

まとめ

- トップイルミネーション用 DLA 構造の逆設計を、2.5D FDFD と随伴変数法で実装
- 逆設計した構造は、同じ入射で単純構造の約 1.5 倍の加速勾配を示した
- CST の 3D 粒子計算で、電子の同期加速を確認した

展望

- マルチチャネル構造で、一様な加速勾配の達成
- 2.5D と 3D の残るずれ（1.16〜1.25 倍）の原因の究明

参考文献

[1] R. J. England et al., “Dielectric laser accelerators,” Rev. Mod. Phys. 86, 1337 (2014).

[2] K. J. Leedle et al., “Phase-dependent laser acceleration of electrons with symmetrically driven silicon dual pillar gratings,” Opt. Lett. 43, 2181 (2018).

[3] C. Emma et al., “Snowmass2021 Accelerator Frontier White Paper: Near Term Applications driven by Advanced Accelerator Concepts,” arXiv:2203.09094 (2022).

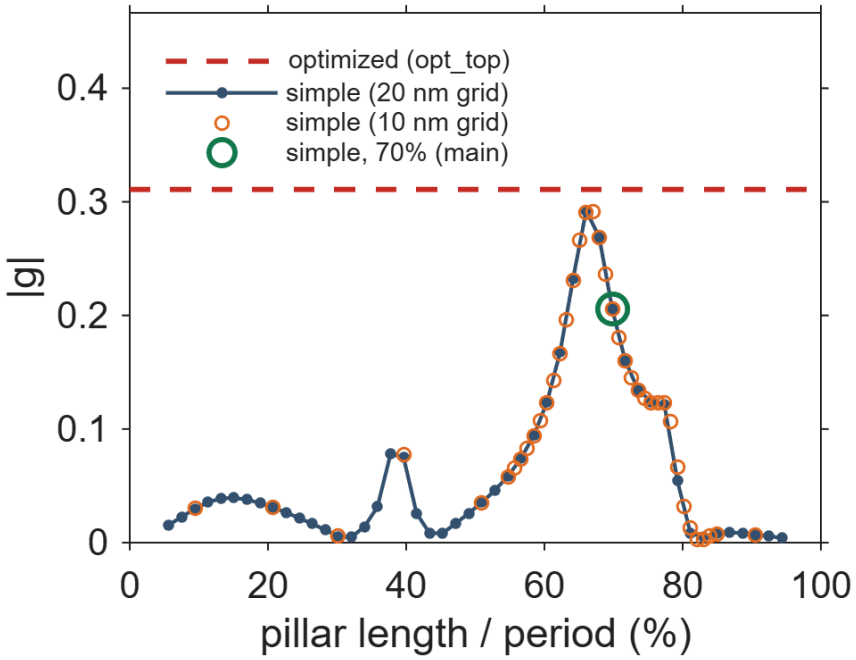
[4] T. Hughes et al., “Method for computationally efficient design of dielectric laser accelerator structures,” Opt. Express 25, 15414 (2017).

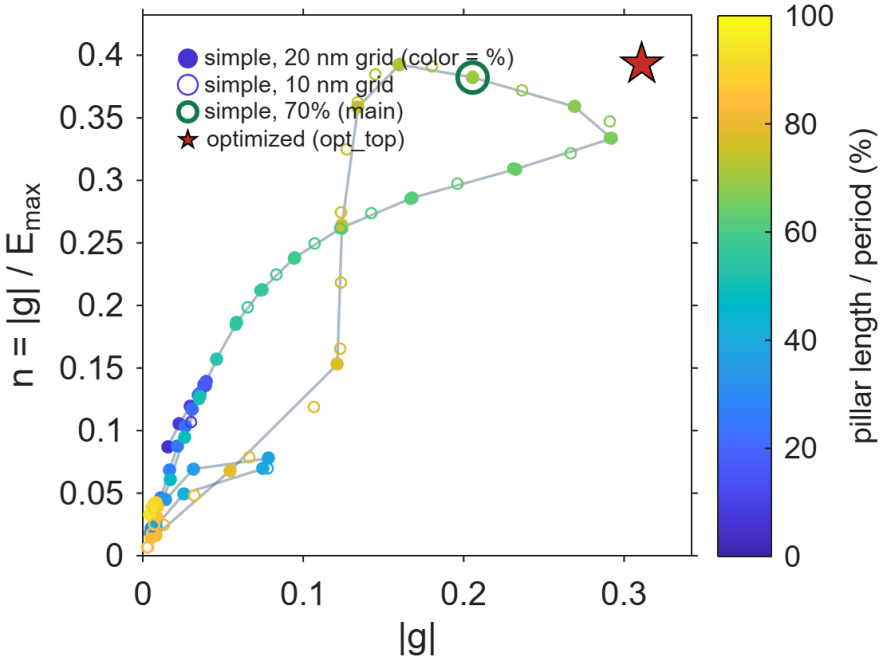
[5] R. Shiloh, T. Chlouba, P. Yousefi, P. Hommelhoff, “Particle acceleration using top-illuminated nanophotonic dielectric structures,” Opt. Express 29, 14403 (2021).

予備

backup

予備: 単純構造の柱の長さを変えると





トップ照射（10 nm 格子）	柱の長さ	|G|	n
単純構造（本論）	70%（746 nm）	0.206	0.383
単純構造で |G| が最大	67%（716 nm）	0.291	0.347
単純構造で n が最大	72%（767 nm）	0.160	0.393
逆設計した構造	—	**0.308**	**0.394**

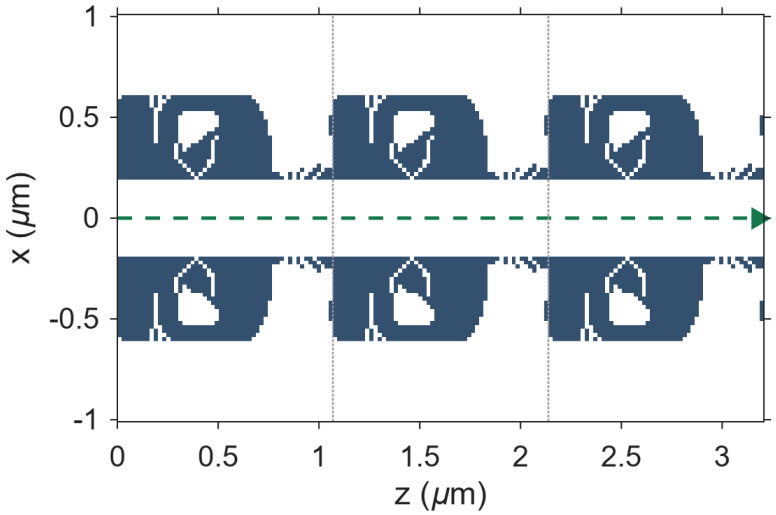
・|G| と n の両方で逆設計構造を上回る長さは無い（20 nm 格子 48 点・10 nm 格子 39 点で 0 点）

・片方だけなら近づける。逆設計構造の強みは両方を同時に持つこと

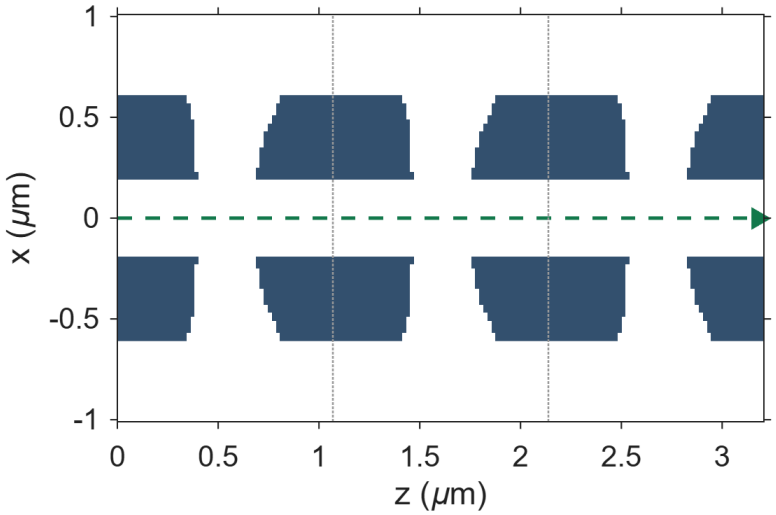
・66〜72% に鋭い共振。本論の 70% は山の肩

予備: フィルタ・頑健化の効き目

フィルタ無しで最適化した構造



本論（フィルタ・頑健化あり）



|G|	フィルタ無し	本論	無し ÷ 本論
MATLAB 20 nm 格子（最適化した格子）	0.353	0.311	1.13
MATLAB 10 nm 格子	0.277	0.307	0.90
CST（3D）	0.324	0.388	**0.84**
全ての縁を 20 nm 外 / 内へ	0.044 / 0.037	0.161 / 0.166	—

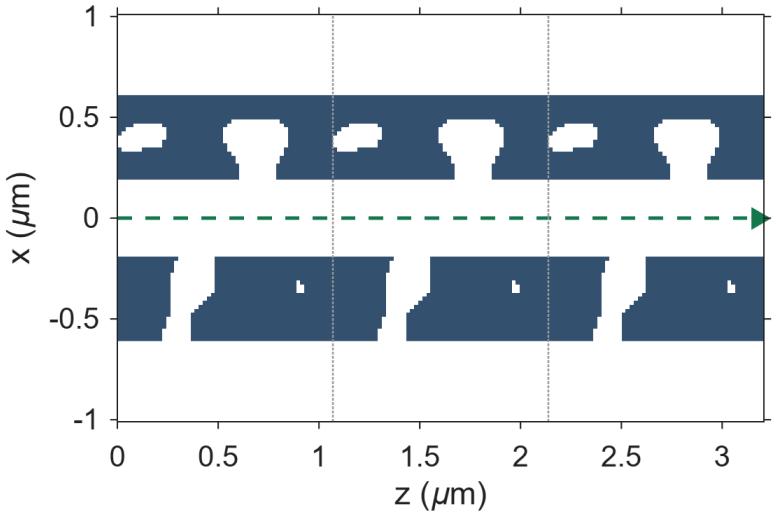
・フィルタ無しは画素 1 個幅の形を使い、20 nm 格子の上でだけ高い

・CST では 16% 負け。CST は MATLAB 10 nm 格子の値と合う

→ フィルタと頑健化は、3D（実際の形）に持ち込んでも性能が残るために必要

予備: サイド照射（MATLAB・CST）

サイドで最適化した構造



サイド照射（$E_0 = 1$ GV/m）	サイド最適	単純
|G|（+z ／ −z の電子）	0.672 ／ 0.187	0.278 ／ 0.278
n = |G| / E_max	0.495	0.283
トップで照らすと |G|	0.037	0.206

単純構造の CST ÷ MATLAB	出口の利得	中央 2 周期
トップ照射	1.16	1.35
サイド照射	**0.67**	**0.74**

・サイドでは逆設計の差がよりはっきり（|G| 2.4 倍・n 1.75 倍）。形が照射の仕方に合わせて決まる
・2.5D/2D と 3D のずれは照射で向きが逆（トップは CST が大きい、サイドは小さい）。
　→ 原因（柱の高さの近似か）は未確認
・サイドの最適構造は CST では確かめていない