



Title	配向ナノワイヤアレイと高強度レーザーの相互作用による高輝度ガンマ線生成
Author(s)	立木, 健嗣; 山中, 敬太
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2026, 16, p. 84-87
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/106242
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

配向ナノワイヤアレイと高強度レーザーの相互作用による 高輝度ガンマ線生成

立木 健嗣、山中 敬太

大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻

1. はじめに

チャープパルス増幅 (CPA) 法によるペタワット級レーザーの実現に伴い、超高強度レーザーと物質の相互作用による高輝度ガンマ線発生が注目されており、核変換技術[1]や非破壊検査等への応用が期待されている。レーザー駆動ガンマ線源では、レーザーを物質に照射した際に電離して生じた電子が、レーザー電場と相互作用して加速され、シンクロトロン放射や制動放射などの物理現象によって X 線・ガンマ線を発生させる。しかし、通常の平坦な固体ターゲットを用いると、表面での高密度プラズマの発生によってレーザーの大部分が反射してしまい、ガンマ線へのエネルギー変換効率が低いという課題があった。

そこで我々は、その構造的特性により物質内部へのレーザー伝搬が可能となることで効率的な効率的にガンマ線を発生できると考えられるナノワイヤアレイ構造に着目し、その有効性をシミュレーションや実験を通して示してきた[2-4]。ナノワイヤアレイとは、ナノスケールの円柱状構造が規則的に配列したものであり、ワイヤ間をレーザーが伝搬して深部まで到達することにより、ガンマ線の生成効率が向上することが確認されている。この手法では、ワイヤの間隔、長さ、直径などの構造パラメータによってガンマ線変換効率が大きく変化することが知られている。そのため、実験やレーザー駆動ガンマ線源の実用化においてこれらのパラメータ最適化は必要不可欠

であり、我々はこれまで Particle-in-Cell (PIC) 法と呼ばれるプラズマシミュレーションを用いてこれを行ってきた。

一方で、この手法は非常に多くのマクロ粒子を取り扱うことから計算負荷が高く、多数のパラメータスキャンを要する際には2次元シミュレーションによる最適化が主であった。しかし、図1の様に2次元計算ではナノワイヤアレイ構造を回折格子のような周期構造としてしか扱うことができず、実際の3次元構造における最適化には限界があった。

そこで本研究では、3次元 PIC シミュレーションを用いて各構造パラメータとガンマ線発生効率との関係を検証し、厳密なワイヤ構造における構造パラメータの最適化を行った。本稿では、その結果について報告する。

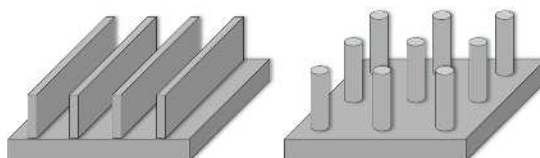


図1：ナノワイヤ模式図。(a)二次元シミュレーションで再現されるナノワイヤアレイ構造。(b)実際のナノワイヤアレイ構造。

2. 計算手法

レーザープラズマ相互作用の解析手法として幅広く使用されている Particle-in-Cell (PIC) 法を用いて計算を行った。PIC 法では、相対論的運動方程式による多数の荷電粒子を代表するマクロ粒子の運動計算と、マクスウェル方

程式によるメッシュ状に離散化された空間の電磁場の計算を交互に行うことで、複雑なプラズマ相互作用を第一原理的に計算することができる。

3次元計算を行うと計算量が著しく増大するため、本研究ではGPUを活用したPICコードである「PIConGPU」を採用した。計算機には大阪大学D3センターのスーパーコンピュータSQUIDを利用し、GPUノード群でシミュレーションを実行した。GPUの多数のスレッドと広帯域メモリによる処理速度の向上により、3次元計算においても多数のパラメータ解析を行うことが可能となった。

また、PIConGPUには、Gonoskovらによる局所定常場近似に基づく量子電気力学(QED)的な光子放出モデル[5]が実装されており、規格化ベクトルポテンシャル a_0 が $a_0 \gg 1$ となるような超高強度領域における光子発生が計算可能である。本研究では、これらの計算環境とコードを活用してシミュレーションを実行した。

3. 計算条件

本研究におけるシミュレーションのセットアップを図2に示す。計算領域には基盤及び長さ $5\mu\text{m}$ のケイ素ナノワイヤを配置した。ナノワイヤの直径は 150 nm , 300 nm , 600 nm で変化させた。また、 x および z 軸方向に周期境界条件を適用することで無限に広がるナノワイヤアレイを模擬しており、シミュレーション空間のサイズを変更することで、ワイヤ間の間隔が $0.25\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$, $2.0\mu\text{m}$ となるように各体系の調整を行った。

ターゲットは中性ケイ素原子として配置し、ADKモデルおよびBSIモデルを用いてイオン化過程を計算している。ケイ素の初期イオン

密度 n_i は $n_i = 5 \times 10^{22}\text{ cm}^{-3}$ とした。1セル当たりのマクロ粒子数は初期状態で4としたが、イオン化に伴い電子が生成されるため、電子の粒子では最大56となる。

空間格子サイズは、固体プラズマの表皮深さを十分に解像するため、 y 方向を 5 nm 、 x および z 方向を 10 nm とした。タイムステップはプラズマ振動の解像に十分な 2 as とした。また、レーザー入射方向である y 軸の境界条件には到達した粒子を削除する解放強化を採用するとともに、解放協会における電磁場の反射を防ぐためにPML吸収層を配置している。

レーザー条件として、波長 810 nm 、パルス幅 20 fs 、ピーク強度は $5 \times 10^{21}\text{ W/cm}^2$ のガウス型時間包絡を持つ平面波を y 軸負方向から入射した。光子生成過程には先述したシンクロトロン放射プラグインを使用した。なお、本シミュレーションの強度領域においては電子・陽電子対生成や発生した光子と電磁場の非線形相互作用は無視できると考えられる。そこで、光子の配置・輸送計算は省略し、発生した光子情報の出力を行うことで計算負荷の低減を図っている。

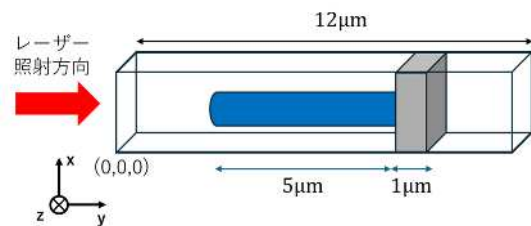


図2：シミュレーション概略図

4. 計算結果

4.1 ナノワイヤアレイの優位性

まず、ナノワイヤアレイ構造の優位性を検証するために、平板ターゲットとの比較検

証を行った。ナノワイヤターゲットの各パラメータは、ワイヤ間隔を $1.0\ \mu\text{m}$ 、直径を $300\ \text{nm}$ 、基板厚を $1.0\ \mu\text{m}$ とした。一方で、平板ターゲットは厚さを $1.0\ \mu\text{m}$ とし、ナノワイヤターゲットと平板ターゲットとで初期に配置される総原子数が同一になるよう設定した。

図 3 に、生成された光子のエネルギースペクトルを示す。ナノワイヤターゲットの場合、 MeV 以上の高エネルギー光子の発生数が全体的に増加しており、 1MeV 以上の光子数に注目すると、平板ターゲット時は 2.51×10^8 個であるのに対し、ナノワイヤターゲット時は 2.10×10^{10} 個となり、約二桁の高指数上昇が確認された。したがって、ナノワイヤ構造の導入によって、発生するガンマ線の高エネルギー光子数の飛躍的な増加が実証された。

図 4 は、光子の発生位置をエネルギー密度分布として示したものである。平板ターゲットでは表面付近でのみ高い光子エネルギー密度が観測されるが、ナノワイヤターゲットの場合は、ワイヤ内部およびその周辺の広域において多数の光子発生が見られる。これは、ナノワイヤ部やワイヤ間に引き出された電子が、通常の固体ターゲットと比較して低密度なプラズマを形成し、それが体積的に加熱されることで、効率的な光子生成が促進されたためと考えられる。

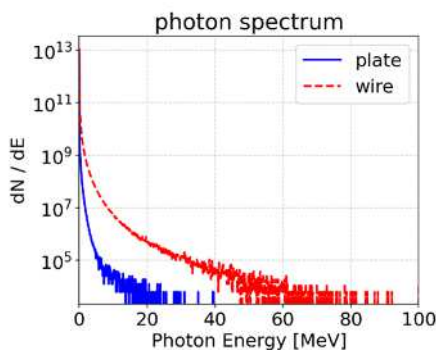


図 3：光子のエネルギースペクトル

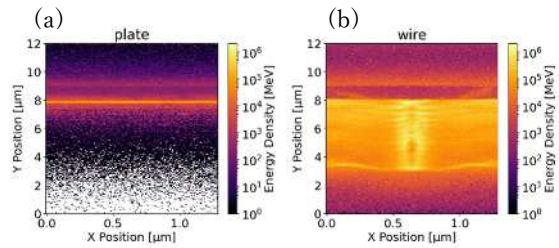


図 4：発生した光子エネルギー密度の空間プロファイル (a) 平板ターゲット。(b)ナノワイヤターゲット。

4.2 最適パラメータ比較

シミュレーションの次元数による最適パラメータの違いを検証するため、2次元および3次元空間において同一パラメータを用いたシミュレーションを行った。図 5 に、次元間の違いが最も顕著に表れたワイヤ間隔に対する $1\ \text{MeV}$ 以上の光子収量の変化を示す。ワイヤ間隔の影響を評価するため、ワイヤ直径はすべて $300\ \text{nm}$ で統一し、光子収量は両次元で比較できるようスケールを調整している。

図 5 より、2次元シミュレーションにおける最適なワイヤ間隔は $4.0\ \mu\text{m}$ であったのに対し、3次元シミュレーションにおける最適な間隔は $1.0\ \mu\text{m}$ へと変化した。この違いは、3次元化によってターゲットの空間充填率が低下したこと、およびZ方向へのプラズマ膨張が可能になったことに起因すると考えられる。Z方向への自由度が存在することで自己ピンチ後のプラズマ膨張が急速に進み、ワイヤ内部およびワイヤ間の電子密度が適度に低下した結果、レーザーがより深部まで浸透し、電子との相互作用領域が拡大したためと推測される。

実際に図 6 の電子密度分布を見ると、同一のタイムステップであっても、2 次元の場合は強いピンチ効果によって $10^{30} m^{-3}$ 程度の高い電子密度が維持されているのに対し、3 次元の場合はワイヤ先端付近で既にプラズマの膨張が始まっており、より低い密度状態にあることが確認できる。さらに、図 7 に示す光子のエネルギー密度分布においても、2 次元の場合は膨張したワイヤ先端 ($y = 3 \mu m$ 付近) にのみ局所的に光子の発生が集中しているが、3 次元の場合はワイヤ側面やワイヤ間の広い領域で高いエネルギー密度の光子が発生していることが分かる。

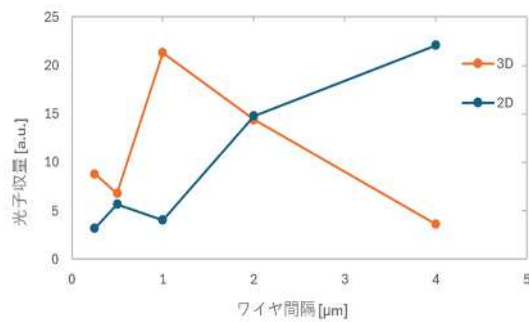


図 5：光子収量とワイヤ間隔

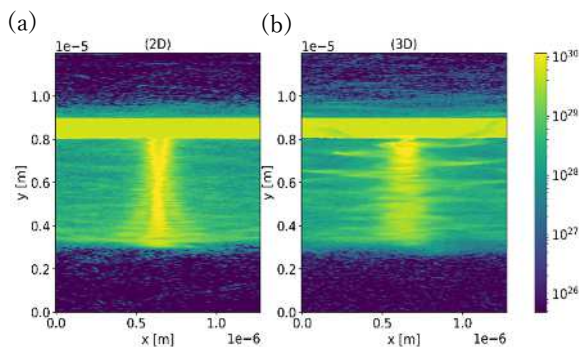


図 6：電子密度分布。(a)二次元シミュレーション。(b)三次元シミュレーション

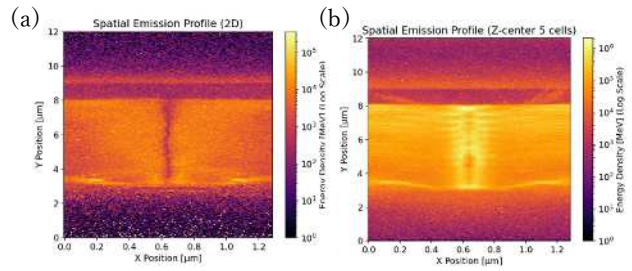


図 7：光子発生時のエネルギー密度分布

(a)二次元シミュレーション

(b)三次元シミュレーション

5. おわりに

本研究で我々は、三次元シミュレーションを用いたパラメータスキャンを行い、二次元シミュレーションによる最適化とは異なる結果が得られることが判明した。三次元では二次元と比較してより狭いワイヤ間隔で最も光子発生効率が高くなり、それは三次元化によるピンチ後の膨張速度の違いによるものだと考えられる。

本研究では、実験における光子発生効率が最適なナノワイヤアレイターゲット設計指針を示すことができた。今後は、ガンマ線の角度分布や時間依存性を解析することで、高輝度なガンマ線源開発に取り組む。

参考文献

- (1) K. Imasaki, et al., Energy Convers. Manag. **49**, 1922-1927 (2008).
- (2) T. Nishikawa, et al., Appl. Phys. Lett. **75**, 4079-4081 (1999).
- (3) S. Bagchi, et al., Appl. Phys. Lett. **90**, 141502 (2007).
- (4) K. Yamanaka, et al., The 46th Annual Meeting of the Laser Society of Japan (2026).
- (5) A. Gonoskov, et al., Phys. Lett. E **92**, 023305 (2015).