

アンジュレータ極短周期化のための、誘電体二重周期微細構造を用いる レーザー電磁場空間位相変調法の開発 I

VERY SHORT PERIOD UNDULATOR BASED ON SPATIAL PHASE MODULATION OF LASER FIELDS GIVEN BY DIELECTRIC DOUBLY PERIODIC FINE STRUCTURE I

山本樹^{#, A)}, 益田伸一^{A)}, 三浦永祐^{B)}

Shigeru Yamamoto^{#, A)}, Shinichi Masuda^{A)}, Eisuke Miura^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

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

Abstract

We are developing a new type of extremely short-period undulator with a period length of about 0.1 mm. An undulator field is generated by spatial phase modulation of the laser wavefront using a dielectric with a doubly periodic fine structure. The electron trajectory in the spatially phase modulated electromagnetic laser field was analyzed in detail to clarify radiation characteristics from the electrons. A prototype of doubly periodic fine structure device was fabricated. The spatial phase modulation of a YAG laser field after passing through the device was demonstrated by interferometric measurement. An optical system was developed to precisely align two doubly periodic fine structure devices placed facing each other to generate an undulator field while injecting laser light from the back of both the devices.

1. はじめに

高輝度放射光はさまざまな分野において有用な分析手段として広く利用されている。しかしながら、現在の放射光施設は巨大施設であり、研究室や工場の製造ラインに設置することは難しいため、放射光施設の小型化が望まれている。放射光施設の主要な装置であるアンジュレータの小型化は、放射光施設の小型化のために重要な一つの開発案件である。アンジュレータとは、光速で進む電子に対してその進行方向に垂直方向の磁場を進行方向に沿って一定の周期で交互に磁場方向が反転するよう配置することによって、電子を周期的に蛇行させ単色度が強く指向性が高い高輝度放射光を発生させる装置である。アンジュレータからの放射強度や放射のスペクトル特性は、アンジュレータの磁場周期長と磁場強度の積に比例する K 値と呼ばれるパラメータによって特徴付けられる。アンジュレータ周期長の短縮化は、従来よりも低エネルギーの電子ビームから高エネルギー放射光発生を可能にするので、放射光施設において電子ビームを供給する加速器の小型化にも寄与するのみならず、アンジュレータの小型化に直接に寄与する。

現在、通常のアンジュレータは磁石材料を着磁した永久磁石のブロックをアンジュレータ周期長の半周期毎に磁場方向が反転するように並べて、その磁石ブロック列に対して磁極配置の位相を半周期ずらした磁石ブロック列を対向するように配置してアンジュレータ磁場を発生させている。磁場強度はそれらの磁石ブロック列同士の間隔によって調整される。この方法では、磁石ブロックの寸法を小さくすることによってアンジュレータの小型化が実現できるが、磁石ブロックの着磁精度と組み立て精度の問題でアンジュレータ周期長は cm オーダーの長さが限界である。

この問題を解決するため、本報告の著者の一人である山本によるモノリシック極短周期アンジュレータの開発が行われている[1-7]。これは、板状の磁性材料にアンジュレータ周期長の半周期毎に磁場方向を反転するように交互に着磁した磁石板と、着磁の位相を半周期ずらした磁石板を対向配置してアンジュレータ磁場を生成する方法であり、現在実用化が進んでいる[7]。この方法によって、磁石ブロック方式を用いる通常アンジュレータよりも短周期化した高精度なアンジュレータ磁場が実現できるが、現在利用可能な磁性材料で達成可能な磁場強度は通常アンジュレータのそれと同程度であるため、周期長の短縮によって K 値も減少する。実用的なアンジュレータとして働くために必要な K 値 (~ 1 程度)を保つためには mm オーダーの周期長が限界である。

必要な K 値を維持したまま 1 mm 以下のアンジュレータ場を生成する新しい方式として、我々は、レーザー電磁場を使用することを提案した。この方式に基づく我々の検討によれば周期長 0.1 mm のアンジュレータ磁場を生成することが可能である。レーザー電磁場の集光強度に原理的に限界がないので、磁場強度を永久磁石方式よりも大幅に強くできるためである。

レーザー光と電子ビームの相互作用によって放射光または散乱光を得る方法は幾つか提案されている。レーザー電磁場中での相対論的電子の振動によって放射されるトムソン散乱による方法では[8]、アンジュレータ周期長(レーザー波長で規定される)が非常に短くなるため必要な K 値を得ることが困難である。 K 値を大きくするには高強度極短パルスレーザーを強く集光する必要があるが、相互作用長(アンジュレータ長に相当)が短くなってしまいう問題がある。また、電子と光子の衝突で生じる逆コンプトン散乱による X 線発生[9]については、多くの加速器施設で実験的研究が行われている。アンジュレータ放射とは発生過程が異なるが、 K 値に相当するパ

[#] shigeru.yamamoto@kek.jp

ラメータが非常に小さくなるため、極短周期アンジュレータの代わりに利用することは難しい。微細周期構造体によるレーザー波面の空間位相変調を利用すると、変調された波面に沿って光速で運動する電子に持続的に同じ方向に磁場を作用させることができる。これを発展させて最適な周期構造の探索を行い、二重周期を持つ微細周期構造体による空間位相変調極短周期アンジュレータ開発の着想を得た。極短周期条件下でアンジュレータ周期長をレーザー波長よりも長い(または非常に長い)周期長に設定し、電子とレーザー電磁場を相互作用させることができる。以上の検討に基づき、空間位相変調レーザー電磁場をアンジュレータ場の生成に使用できれば、アンジュレータの極短周期化の実用化が期待できる。

2. レーザー電磁場空間位相変調法

本研究は周期長 0.1 mm 以下の実用的な極短周期アンジュレータの開発を目的としている。永久磁石を使用して静磁場を生成する従来のアンジュレータ場生成方式では、アンジュレータの放射光源性能に必要とされる K 値を低下させずにこの領域の周期長の実現は難しいので、空間位相変調したレーザー電磁場を使用する新方式のアンジュレータ開発の研究を行なった。

本方式の原理[10]は、「短」・「長」二重の微細周期構造を持つ誘電体にレーザー光を照射し透過レーザー電磁場に与えられる空間位相変調を利用して極短周期アンジュレータ場を生成することである。(x, y, z)直交座標系におけるレーザー電磁場の空間位相変調の配置を Fig. 1 に示す。x方向に進行し電場がz方向に直線偏光している平面波レーザー光を、レーザー波長と同じ周期長の微細周期構造をz方向に施した誘電体に照射すると、その透過光の波面上にz方向に沿ってレーザー波長の半周期の長さで波面の位相が反転する様に「短」周期の空間位相変調が与えられる。そのレーザー光と対向して-x方向に進行するもう一つのレーザー光に同様の空間位相変調を与える。Figure 2 に示すように、二つのレーザー光同士をx = 0 の平面上で、それらの電磁場同士が電場は相殺し磁場は増強する様にレーザー位相を調整して配置する。この空間位相変調されたレーザー電磁場中のx = 0平面上をz方向に光速で通過する電子は、レーザー波面の変調された位相と同期し持続的にy方向の磁場を受け続けるので同じ方向に偏向され続ける。この「短」微細構造周期の位相をアンジュレータの半周期長毎に反転させる様に「長」微細周期構造により空間位相変調を与える[10, 11]。それにより、アンジュレータの半周期長毎に電子の偏向方向が反転するので、電子は蛇行し放射光を発生する。この二重微細周期構造体による空間位相変調方式では誘電体の損傷閾値以内であればレーザーパワーを増強することが出来るので、必要な K 値を得ることが出来る強度の磁場を生成可能になり従来方式よりも大幅に短い周期のアンジュレータの実現が期待できる。我々は、このようなアンジュレータ場中の電子軌道解析と電子からの放射特性の解析を行なった[10, 11]。

上述の原理に基づいて本方式によるアンジュレータ場

生成のためのレーザー装置として、市販レーザーとして普及している波長 1.06 μm 、エネルギー1 J、パルス幅 1 ns の YAG レーザーを使用することを前提に検討を行った。微細周期構造を石英材料で製作した場合、材料の損傷閾値は 10^{11} W/cm² であり、およそ 3 T の磁場強度の透過光が得られる。空間位相変調レーザー電磁場を使用する 0.1 mm オーダーの周期長のアンジュレータで 0.1~0.01 の K 値が期待できる。

3. レーザー電磁場空間位相変調アンジュレータ場中の電子軌道と放射スペクトル

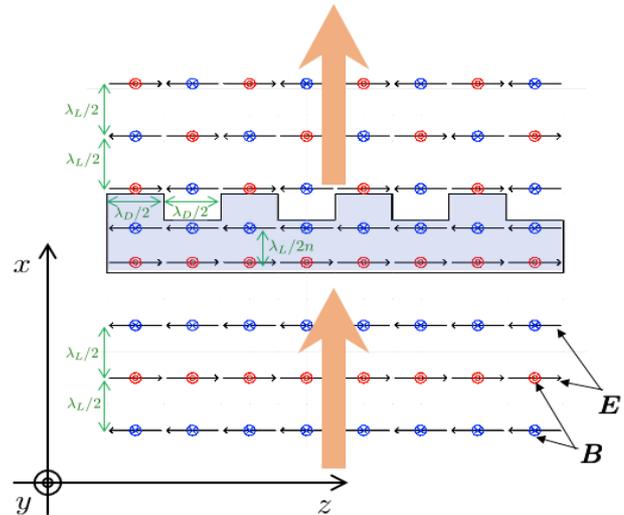


Figure 1: Spatial phase modulation of laser fields by dielectric periodic fine structure. λ_L : laser wavelength, λ_D : period length of dielectric fine structure, n : dielectric refractive index, E : electric field, B : magnetic field.

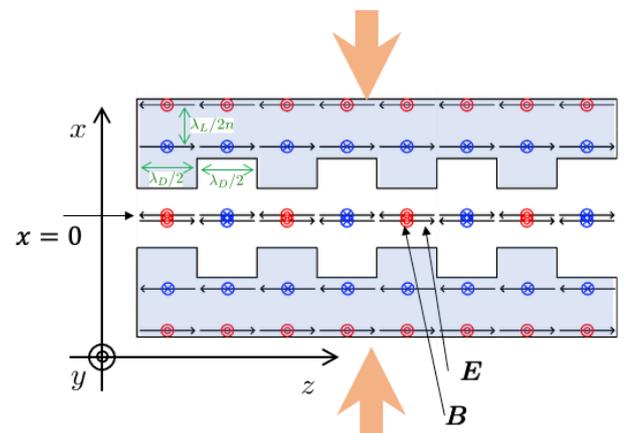


Figure 2: Interference electromagnetic field produced by two spatially phase modulated laser fields. The electric fields and the magnetic fields of the two lasers cancel and reinforce each other, respectively. When the period length of the fine structure is equal to the laser wavelength, electrons moving in z direction with speed of light synchronize with the spatially phase modulated magnetic field and are continually deflected in the same direction.

本方式により生成されたアンジュレータ場は空間的には固定されるが時間的にレーザー電磁場の周波数で変動しており、従来の静磁場方式によるアンジュレータ場と比較して、アンジュレータ場中の電子の軌道および電子からの放射特性が大きく異なることが予測される。時間変動する空間位相変調レーザー場中の電子の運動について解析し、その結果を使用して電子からのシンクロ放射の解析を行いアンジュレータ放射特性の詳細を調べた。

最も簡単なアンジュレータ周期長がレーザー波長の倍の場合における空間位相変調レーザー電磁場中の単電子の運動の解析を行なった。対向する空間位相変調レーザー電磁場が作るアンジュレータ場を、

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}^+ + \mathbf{E}^- = \mathbf{0} \\ \mathbf{B} &= \mathbf{B}^+ + \mathbf{B}^- = \hat{y}B_0 \cos(k_u z + \phi_u) \sin(\omega_L t + \phi_L) \end{aligned} \quad (1)$$

の様に表す (Fig. 2)。 B_0 は磁場強度の振幅、 ω_L はレーザー電磁場の角周波数、 k_u はアンジュレータ周期長 λ_u と $k_u = 2\pi/\lambda_u$ の関係にある波数、 ϕ_u 、 ϕ_L は任意の初期位相を与える。ここで、対向する空間位相変調レーザー電磁場の進行方向はそれぞれ $\pm x$ 方向であり、 $x = 0$ の平面上で電場 \mathbf{E} (z 方向)は相殺し磁場 \mathbf{B} (y 方向)は増強するようにそれぞれの直線偏光方向および位相のレーザーが対向して配置されているものとしている。その結果、 z 方向に空間位相変調が与えられる。 $x = 0$ 平面上

で z 方向に光速で運動する電子が式(1)のアンジュレータ場に入射する場合について、放射の発生する時間 t' における電子の軌道(x' , z')および真空中の光速で規格化した速度(β_x , β_z)に関する解析を行った[10, 11]。計算結果を Fig. 3 に示した。ここでは、アンジュレータ周期長 $\lambda_u = 100 \mu\text{m}$ 、仮想的なレーザーとして波長 $\lambda_L = 50 \mu\text{m}$ を仮定した。また電子のローレンツ因子 $\gamma = 500$ 、アンジュレータ周期数 $N_u = 10$ 、 $K = 0.1$ とした。入射電子は入射時刻 t'_0 に依存して速度 β_{x0} の横方向のキックを受けるが、アンジュレータ上流に逆方向のキックを与える微細構造を設けることにより、横方向キックは抑制可能である[11, 12]。Figure 3 に入射時刻 t'_0 に依存した電子軌道を示す。横方向キックは抑制されて $\beta_{x0} = 0$ としている。電子は入射タイミングに依存して異なる軌道を取るが、蛇行運動の基本周期は変化しないことがわかる。

さらに、電子の入射時刻 t'_0 に依存した放射スペクトル(軸上)の解析を行い、結果を Fig. 4 に示した[10, 11]。Figure 3 に示した電子軌道と入射タイミングを対応させている。また、Fig. 3 と同様に $\beta_{x0} = 0$ として計算した。基本共鳴周波数の奇数次の周波数にピークが観測される。横方向キックを抑制($\beta_{x0} = 0$)することにより、電子の入射時間に関係無く基本共鳴周波数は一定となるので、放射スペクトル上のピーク位置は電子の入射時間に依存しない[11, 12]。

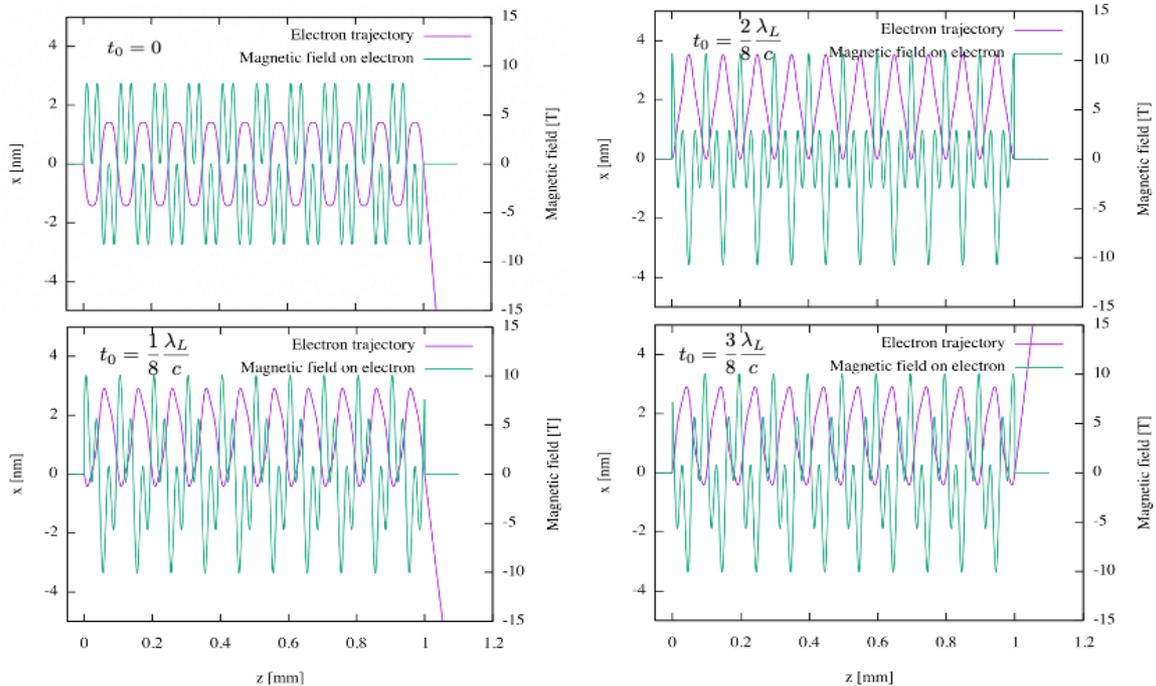


Figure 3: Electron trajectories in the undulator field produced by spatial phase modulation of laser electromagnetic field and magnetic fields acting on the electrons along their trajectories. Transverse drift is suppressed in this calculation ($\beta_{x0} = 0$). The electron takes different trajectories depending on the timing t'_0 of injection into the undulator field. However, the fundamental period of quiver motion is independent of t'_0 . Here $\lambda_u = 100 \mu\text{m}$, $\lambda_L = 50 \mu\text{m}$, $\gamma = 500$, $N_u = 10$, and $K = 0.1$.

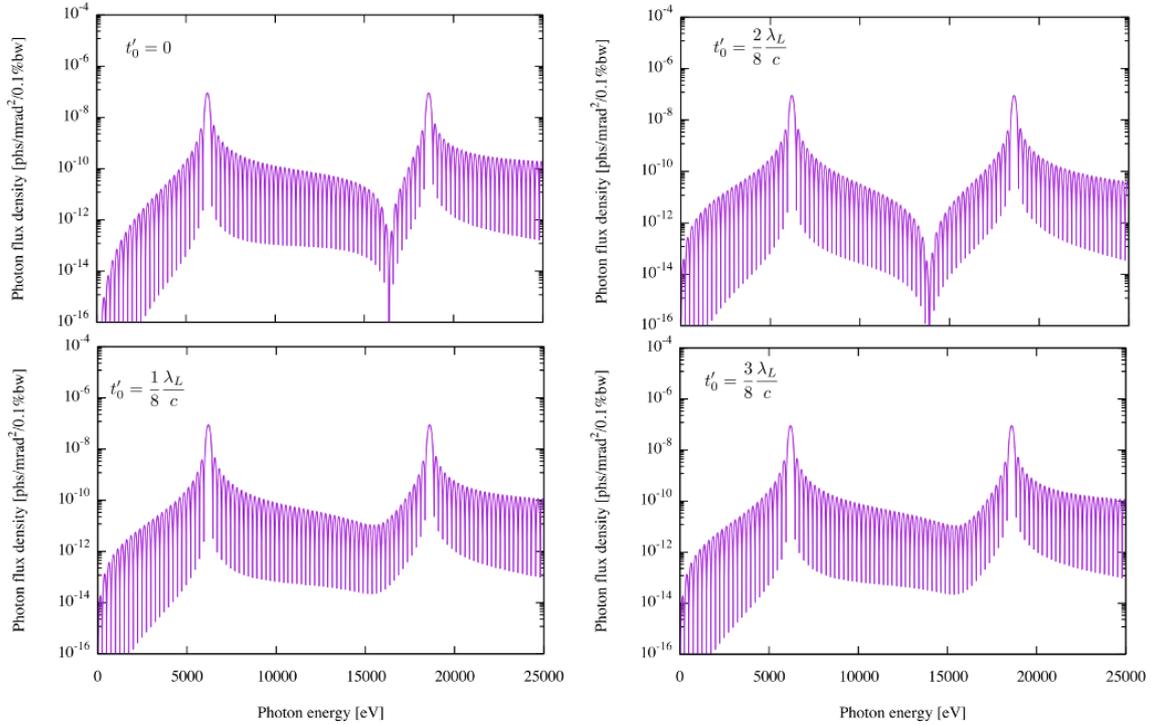


Figure 4: On-axis radiation spectra from a single electron in the undulator field produced by spatial phase modulation of laser electromagnetic field. When transverse drift is suppressed ($\beta_{x0} = 0$), fundamental (and higher) resonant frequency of radiation becomes independent on the timing t'_0 of injection into the undulator field. Here $\lambda_u = 100 \mu\text{m}$, $\lambda_L = 50 \mu\text{m}$, $\gamma = 500$, $N_u = 10$, and $K = 0.1$.

4. 微細周期構造体の試作と空間位相変調波面の計測

本方式によるアンジュレータ場生成のためのレーザー装置として、市販レーザーとして普及している YAG レーザーを使用することを前提に、空間位相変調のための微細周期構造体素子の試作の検討を行なった。YAG レーザーの基本波長は 1064 nm であり、レーザー電磁場の半波長の寸法でレーザー波面に空間位相変調を与えるためには、半周期 532 nm で周期構造を構築する必要がある。我々は、微細加工技術を応用し、フォトリソグラフィにより石英素子表面に周期構造を転写し、ドライエッチングにより石英素子に半周期 532 nm の所定の凹凸の微細構造を施して微細周期構造の試作を行なった。Figure 5 に微細周期構造体断面の電子顕微鏡画像を示す。所定の周期と深さをを持った微細構造を作成出来ることを確認した。レーザー波長と同一周期の凹凸微細構造(溝幅は半周期長の 532 nm)のほか、光学観測手法的確認のため、より長い複数の異なる周期の微細構造体素子(半周期 $100 \mu\text{m}$ の凹凸微細構造を含む)も製作した。

試作した周期微細構造体素子に YAG レーザー光を照射し、透過光に与えられる空間位相変調を測定して微細周期構造体素子の性能評価を行なった。空間位相変調を高精度で実現するため、デフォーダブルミラーを導入し、波面補償した YAG レーザー光を使用した測定系を構築した。空間位相変調の精密空間測定

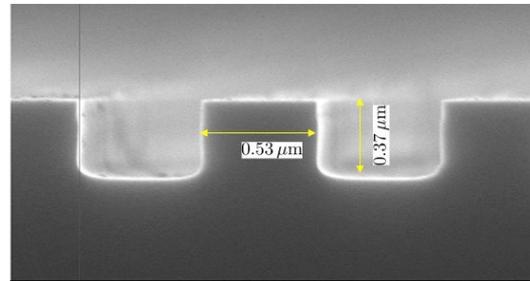


Figure 5: SEM image of dielectric periodic fine structure.

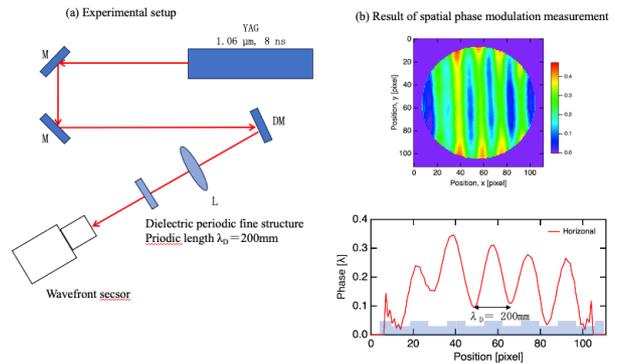


Figure 6: Measurement of spatial phase modulation of YAG laser with the wavelength of $1.064 \mu\text{m}$. Dielectric periodic fine structure with period length of $200 \mu\text{m}$ was used.

手法の確立のため、波面計測や干渉計測を使用した測定方法の開発を行った。半周期 $100\ \mu\text{m}$ の微細周期構造体素子に YAG レーザーを照射し透過光の波面を波面センサーにより観測した。Figure 6 に実験セットアップと測定結果を示す。 $100\ \mu\text{m}$ 毎に位相が反転していることが確認できる[10, 11]。

5. まとめ

我々は、誘電体二重周期微細構造によるレーザー電磁場の空間位相変調を利用した新方式のアンジュレータ開発を行った。時間変動する空間位相変調レーザー電磁場中の電子の運動および電子からの放射特性を調べた。電子入射時の横方向キックを抑制することにより、電子の入射タイミングによらずスペクトル上の同じ周波数にピークを得られることを確認した。

誘電体周期微細構造体を試作し、波面センサーにより空間位相変調の測定を実施し原理実証を行った。

アンジュレータ場を構成するためには、2つの二重微細周期構造体素子に対抗配置して、それぞれの素子の背面からレーザーを照射し、空間位相変調を与えられた透過光同士の位相を精密に一致させる必要がある。微細構造体の精密な位置合わせのため、対向する2つの二重微細周期構造体素子の平行度および間隔を光学観測するためのモニタ装置と、それらを精密駆動して位置決めする装置の開発を行なった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20K20524 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Yamamoto, Journal of Phys.: Conf. Ser. **425** 032014 (2013).
- [2] S. Yamamoto, WEOAA02, Proc. IPAC2014, pp.1845-1857, Dresden, Germany (2014).
- [3] S. Yamamoto, Synchrotron Radiat. News, **28**(3), pp.19-22. (2015).
- [4] S. Yamamoto, AIP Conf. Proc. **1741**, 020029 (2016).
- [5] S. Yamamoto, WEXGBD1, Proc. IPAC2018, pp.1735-1739, Vancouver, BC, Canada (2018).
- [6] S. Yamamoto *et al.*, J. Synchrotron Rad. **26**, pp.1902-1910 (2019). doi:10.1107/S1600577519013031
- [7] S. Yamamoto, Journal of Phys. Conf. Ser. **3010** 012028 (2025). doi:10.1088/1742-6596/3010/1/012028
- [8] P. Sprangle *et al.*, Phys. Rev. ST. Accel. Beams **12**, 050702 (2009).
- [9] D. Seipt *et al.*, Phys. Rev. A **91**, 033402 (2015).
- [10] 山本 樹, 益田伸一, 三浦永祐, 第 38 回日本放射光学学会年会, 12E4-03, つくば (2025).
- [11] 益田伸一, 三浦永祐, 山本 樹, 第 38 回日本放射光学学会年会, 12E4-04, つくば (2025).
- [12] 益田伸一, 山本 樹, 三浦永祐, 第 22 回日本加速器学会プロシーディングス FRP037, 東京 (2025).