

## テラヘルツコヒーレントアンジュレータ放射の偏光制御

### POLARIZATION CONTROL OF COHERENT THz UNDULATOR RADIATION

柏木茂<sup>#,A)</sup>, 齊藤寛峻<sup>A)</sup>, 全炳俊<sup>B)</sup>, 入澤明典<sup>C)</sup>, 日出富士雄<sup>A)</sup>, 武藤俊哉<sup>A)</sup>, 森田希望<sup>A)</sup>, 山田悠樹<sup>A)</sup>, 南部健一<sup>A)</sup>, 鹿又健<sup>A)</sup>, 高橋健<sup>A)</sup>, 長澤育郎<sup>A)</sup>, 柴田晃太郎<sup>A)</sup>, 三浦禎雄<sup>A)</sup>, 石附 勇人<sup>A)</sup>, 寺田健人<sup>A)</sup>, 濱広幸<sup>A)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>#,A)</sup>, Hirotooshi Saito<sup>A)</sup>, Heishun Zen<sup>B)</sup>, Akinori Irizawa<sup>C)</sup>, Fujio Hinode<sup>A)</sup>, Toshiya Muto<sup>A)</sup>, Nozomu Morita<sup>A)</sup>, Hiroki Yamada<sup>A)</sup>, Ken-ichi Nanbu<sup>A)</sup>, Ken Kanomata<sup>A)</sup>, Ken Takahashi<sup>A)</sup>, Ikuro Nagasawa<sup>A)</sup>, Koutaro Shibata<sup>A)</sup>, Sadao Miura<sup>A)</sup>, Tuto Ishizuki<sup>A)</sup>, Kento Terada<sup>A)</sup> and Hiroyuki Hama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

<sup>B)</sup> Institute of Advanced Energy (IAE), Kyoto University

<sup>C)</sup> Institute of Science and Industrial Research (ISIR), Osaka University

#### Abstract

Variable polarized THz sources are very useful for biological analysis. Vibrational circular dichroism (VCD) measurements in the THz region are extremely sensitive to conformational changes in proteins. We are developing a variable polarized THz source that can generate arbitrary polarization states by utilizing the coherence of undulator radiation. A short electron pulse can produce the coherent undulator radiation at wavelengths longer than electron pulse length with the intensity proportional to the square of the number of electrons contained in the pulse. This THz source can manipulate the polarization utilizing a linearly polarized radiation from an undulator using Martin-Puplett interferometer employed as an optical phase shifter. The polarization control of coherent undulator radiation has been demonstrated using the THz coherent undulator radiation source driven by a compact photocathode RF-gun linac at IAE, Kyoto University. Preliminary results will be presented in this conference.

#### 1. はじめに

現在、生体科学分野ではタンパク質の立体構造(コンフォメーション)変化やホールディングが生体機能に及ぼす影響を調べることが重要な研究テーマになっている。特にテラヘルツ帯における振動円偏光二色性(VCD: Vibrational Circular Dichroism)計測は、タンパク質のコンフォメーション変化やホールディングスに対して極めて感度が高く、左右円偏光したテラヘルツ波源は生体分析に大変有用である。

通常、紫外から赤外域のレーザでは $\lambda/4$ 波長板を使うことによって直線偏光を円偏光に変換するなど、比較的容易に偏光を操作することが可能である。その一方でTHz帯では広帯域にわたり使用可能な波長板が存在しないため、偏光操作は限られた波長域でしか実現されていない。こうした背景を踏まえ、現在我々は加速器駆動のテラヘルツ光源の一つであるコヒーレントアンジュレータ放射(CUR)の可干渉性を利用して、その偏光状態をCURの位相を制御することによって実現する偏光可変THz光源の開発を行っている。我々はこれまでに東北大学電子光理学研究センターにおいて、時間幅が約100 fsの極短電子ビームと25周期のアンジュレータを用いて、共鳴周波数が約2.9 THzのCURの発生とその測定に成功している[1, 2]。現在、コヒーレントアンジュレータ放射の可干渉性を利用した2種類の偏光可変光源の開発を進めており、1つは交叉型アンジュレータを用いたもの[3, 4]、もう1つは1台の平面型アンジュレータを用いたものである。Figure 1に後者の1台の平面型アンジュレータを使った偏光可変THz光源の概念図を示す。

偏光操作技術については、京都大学エネルギー理工学研究所が所有する光陰極RF電子銃を電子源とするテラヘルツ光源加速器(THz-CUR光源[3])を使い試験実験を実施した。本学会では、コヒーレントアンジュレータ放射を使った任意の偏光状態を作り出せる偏光可変THz光源の開発状況について、試験実験の結果も含め報告する。

#### 2. 偏光可変テラヘルツ波源

##### 2.1 コヒーレントアンジュレータ放射

光の放射に用いられる電子ビームのパルス長が放射波長よりも十分短い場合には、時間コヒーレンスを持つ放射となり、その放射パワーは1つの電子ビームパルスに含まれる電子数の2乗に比例するようになるため、強い放射強度を得ることができる。アンジュレータを用いた放射光源においても同様に、その共鳴波長よりも電子ビームのパルス長が十分短い場合には、その放射はコヒーレント放射となる。Figure 2は、25周期のアンジュレータ( $K = 3.9$ )にパルス長が200 fsの電子ビーム( $E = 19$  MeV)が入射したときの放射電場分布を示す。電場分

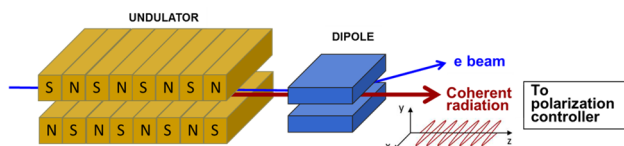


Figure 1: Variable polarized coherent THz source using one planar undulator.

<sup>#</sup> kashiwagi@lms.tohoku.ac.jp

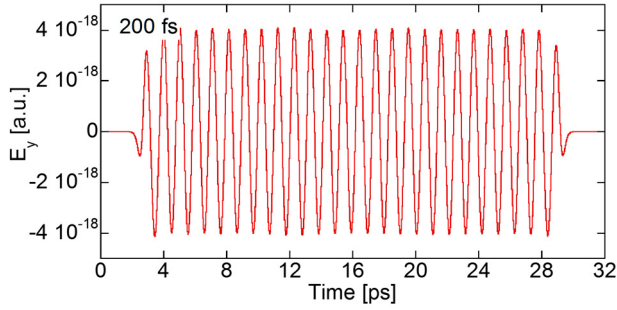


Figure 2: Electric field distribution of coherent undulator radiation from an extremely short electron bunch. ( $N = 25$ ,  $f_r = 1.0$  THz).

布は、アンジュレータ周期数と同じサイクルを持つ正弦波形状となる。この放射の可干渉性を利用することによって偏光の操作を実現する。

## 2.2 偏光制御

Figure 3 に現在開発中のマーチンパレット型の偏光制御システムを示す。この偏光制御システムを用いることで、直線偏光の CUR を円偏光や楕円偏光、直線偏光など、任意の偏光状態へと変換する。偏光制御システムは、ワイヤーグリッド偏光子をビームスプリッターとして使い、90 度電場振動方向の異なる放射へと 2 分割する(偏光分割)。次に、Roof-top ミラーを使い反射すると同時に直線偏光の光の電場振動方向を 90 度回転させる。その時に、一方の、Roof-top ミラーを可動ステージに搭載し、最初に分割した 2 つの放射の一方のみの位相を変化させる。再び、ワイヤーグリッドを使い合成することによって偏光操作を実現する。このとき、可動ステージを使い  $\pm 1/4$  波長分 ( $\pm \lambda/2$ ) ステージを移動させるだけで、左右円偏光を反転させることが可能である。

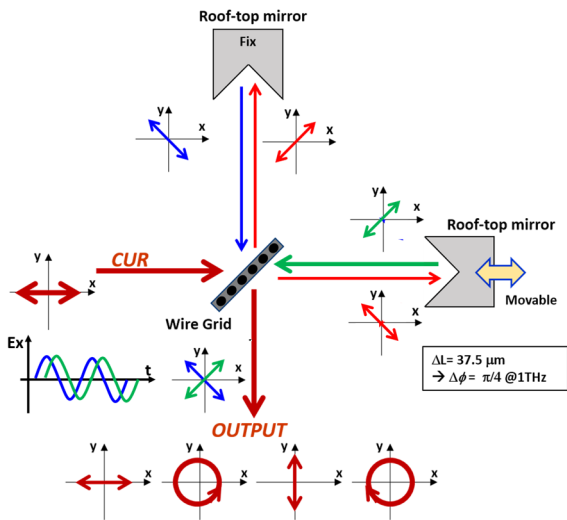


Figure 3: Martin-Puplett type polarization control system.

## 2.3 偏光度測定

光の偏光状態は、4 つのストークスパラメータ ( $S_0, S_1, S_2, S_3$ ) を測定することによって表すことができる。第 1 のストークスパラメータ項  $S_0$  はビーム全強度を示し、 $S_1$  は垂直偏向と水平偏光の成分の差、 $S_2$  は  $-45^\circ$  直線偏向と  $+45^\circ$  直線偏向成分の差、 $S_3$  は左回り円偏向と右回り円偏向成分の差を表す。ストークスベクトル:  $S$  により、完全偏光と無偏光が混ざった部分偏光の状態は、偏光度:  $P$  ( $0 \leq P \leq 1$ ) を用いて、

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = (1 - P) \begin{pmatrix} S_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表すことができる。完全偏光の場合は  $P = 1$  であり、(1)式の右辺の第 1 項は消え、 $S_1, S_2, S_3 \neq 0$  では楕円偏光のストークスベクトルとなる。無偏光の場合は  $P = 0$  となり、 $S$  は無偏光のストークスベクトルとなる。また、偏光度:  $P$  は次式のように定義できる。

$$S = \frac{I_{POL}}{I_{TOT}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (2)$$

$I_{POL}$  は光の全強度、 $I_{POL}$  は部分偏光の強度である。

4 つのストークスパラメータは Fig. 4 に示した様に、 $\lambda/4$  波長板と偏光子を使うことによって測定することができる。測定される光の強度は、 $\theta, \phi$  を使い次式のように表すことができる。

$$I(\theta, \phi) = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta \cos \phi - S_3 \sin 2\theta \sin \phi] \quad (3)$$

偏光子の回転角:  $\theta = 0, \pi/4$  および  $\lambda/2$  の時の光量と、偏光子の回転角  $\theta = \pi/2$ 、波長板による位相シフト  $\phi = \pi/2$  のときの 4 つの場合のストークスパラメータ (式 (4)) を測定することによって、光の偏光状態を求めることができる。

$$\begin{aligned} S_0 &= I(0,0) + I(\pi/2, 0) \\ S_1 &= I(0,0) - I(\pi/2, 0) \\ S_2 &= 2 \cdot I(\pi/4, 0) - S_0 \\ S_3 &= S_0 - 2 \cdot I(\pi/4, \pi/2) \end{aligned} \quad (4)$$

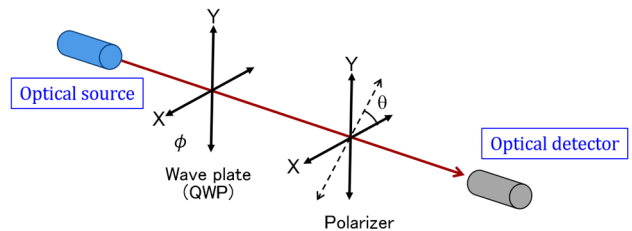


Figure 4: Measurement setup of Stocks parameters.

### 3. テラヘルツ波偏光操作試験実験

#### 3.1 実験セットアップ

偏光操作の実証実験を京都大学エネルギー理工学研究所 FEL 施設の THz-CUR 光源[5]を用いて実施した。エネルギー約 4.6 MeV の電子ビームを 10 周期の平面型アンジュレータ ( $\lambda_U = 70 \text{ mm}, N_U = 10, B_0 \sim 0.4 \text{ T}, K = 2.6$ ) に入射し、コヒーレントアンジュレータ放射を発生した。アンジュレータ放射のスペクトルを測定したのち、Fig. 3 に示した偏光制御システムを用いて偏光操作を試みた。Figure 5 に測定系のセットアップを示す。CUR はビームラインに金属板を挿入し、90 度方向に反射して大気中に取り出される。真空窓はテラヘルツ帯の光に対して高い透過率を持つ Z カット水晶窓を使用している。3 台の非軸放物面鏡 (OAP: Off-axis parabolic mirror) を用いて平行光にすると同時にビームサイズを縮小し、干渉計および偏光制御システムへと光を導く構成とした。

#### 3.2 スペクトル測定

最初に、偏光分離型のマーチンパレット型干渉計によりコヒーレントアンジュレータ放射のスペクトル計測を行った。検出器は焦電検出器 (PHULUXi 社製、PYD-1) を使用し、ワイヤーグリッドは SPECAC 社製のもの (GS57207: wire diameter: 10  $\mu\text{m}$ , wire spacing: 25  $\mu\text{m}$ ) を用いた。Figure 6 に測定された干渉パターンとその逆フーリエ変換により求めたスペクトルを示す。その結果、アンジュレータ放射の周波数は、0.16 THz (波長: 約 1.9 mm) であった。測定された干渉パターンは、アンジュレータの周期数である 10 サイクルの電場サイクルが重なり合ったプロファイルをしており、この干渉パターンからもアンジュレータ放射がコヒーレント放射であることが分かる。この干渉パターンの強度が最大となるステージの位置で、2 分割した光束の相対位相差 ( $\delta$ ) がゼロとなる。

#### 3.3 偏光操作と偏光度測定

次に、ワイヤーグリッドスプリッターで 2 分割した放射の相対位相を可動ステージにより調整することで偏光操作を行なった。2.3 節で述べた様に、 $\lambda/4$  波長板と偏光子

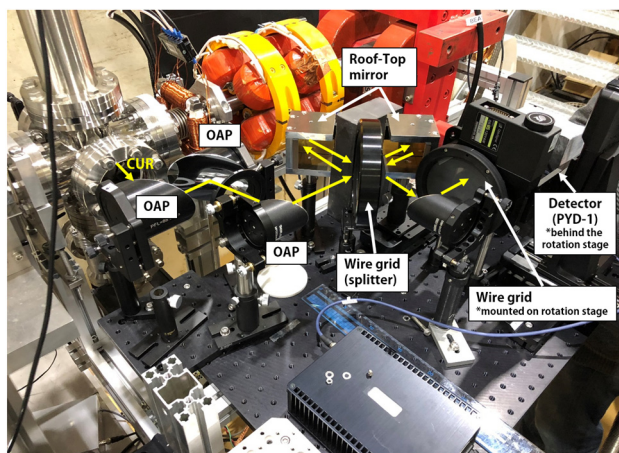


Figure 5: Measurement setup.

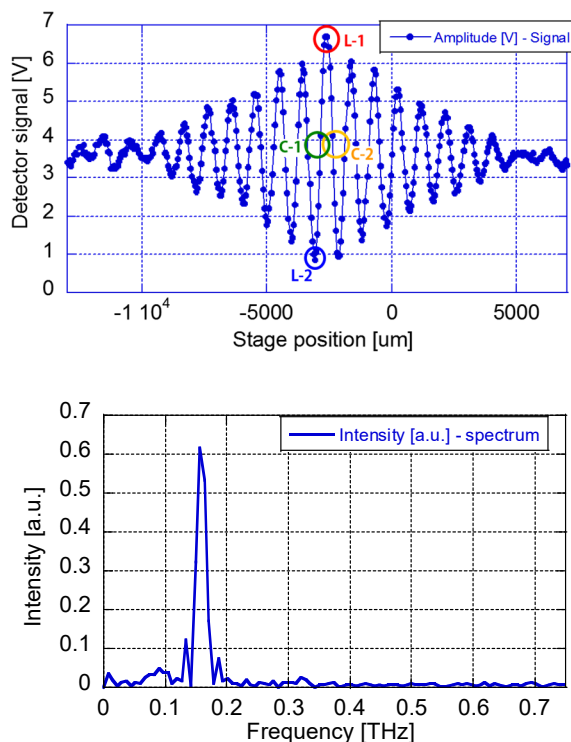


Figure 6: (Up) Interferogram of the undulator radiation. (Down) Frequency spectrum of the undulator radiation.

(ワイヤーグリッド)を使い、4 つのストークスパラメータを計測することによって光の偏光状態を知ることができる。しかし、今回は放射波長に合った  $\lambda/4$  波長板が使用できなかったため、(4) 式のパラメータ  $S_3$  を測定することができなかった。そこで、直交成分間で振幅と位相ともに相互関係がない無偏光成分が含まれていない

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} = P_L^2 + P_C^2 = 1 \quad (5)$$

の完全偏光という仮定のもと、直線偏光度 ( $P_L$ ) と円偏光度 ( $P_C$ ) を導出した。実際の測定では、相対位相差を 4 段階 ( $\delta = -\pi, -\pi/2, 0, +\pi/2$ ) に変化させ、ワイヤーグリッド偏光子を回転させ、その透過強度と回転角を測定することから求めた。直線偏光度と円偏光度は次式により求めた。

$$P_L = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad P_C = \sqrt{P^2 - P_L^2} \quad (6)$$

Figure 7 に偏光子であるワイヤーグリッドを  $5^\circ$  ステップで回転し、そのときの放射強度の測定結果を示す。直線偏光度がほぼ 1 になると予想される位相 (Fig. 7 (Up)) L-1 と L-2 では、それぞれ  $P_L = 0.89, P_C = 0.45$  と  $P_L = 0.76, P_C = 0.65$  という値が得られた。また一方、円偏光度がほぼ 1 になると予想される位相 (Fig. 7 (Down)) C-1 と C-2 では、 $P_L = 0.09, P_C = 0.996$  と  $P_L = 0.13, P_C = 0.992$



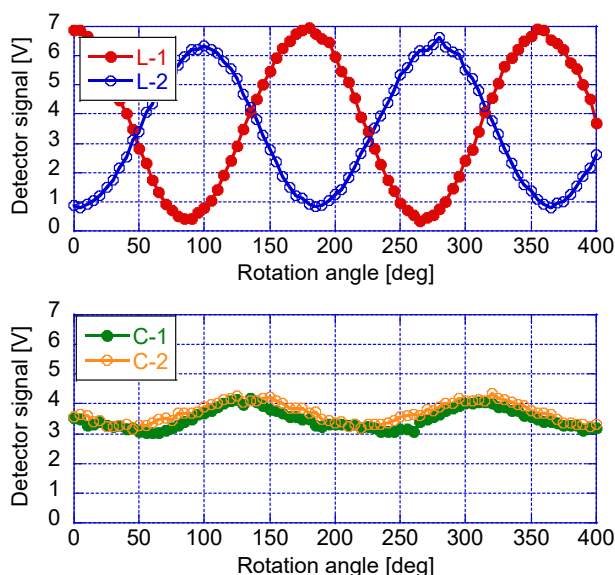


Figure 7: Measured intensity of undulator radiation as a function of rotation angle of the wire-grid. (Up) The lines L1 and L2 show the cases where the relative phase difference ( $\delta$ ) are 0 and  $\pi$ , respectively. (Down) The C1 and C2 represent the cases where the  $\delta$  are  $-\pi/2$  and  $+\pi/2$ , respectively.

であった。これらの結果より、コヒーレントアンジュレータ放射を2光束に分割しその相対位相を制御することにより、 $\pm 45$ 度直線偏光や円偏光へと偏光状態が変換できることを確認することができた。今回の測定では、4つのストークスパラメータを測定しその偏光度を評価しようと試みたが、測定系が完全でなかったために無偏向を含まないとしたことや、右巻きと左巻き円偏光の区別ができないといった測定方法に課題が残る結果となった。今回の(6)式に示した偏光度の導出では、円偏光度の中に無偏光も含まれて算出されてしまうため、高い円偏光度となった。また今回の測定では、ワイヤグリッドで光束を2分割したときに強度が完全に1:1に分割できているかの確認を十分に行わなかった。強度が非対称に分割されると完全な円偏光状態を作り出すことができないので注意が必要である。

#### 4. まとめと今後の予定

今回、マーチンパレット型の偏光操作システムを用いることで、水平直線偏光のコヒーレントアンジュレータ放射から垂直直線偏光や左右円偏光へと偏光を操作できることを確認することができた。光の偏光度計測では、 $\lambda/4$ 波長板を使うことができなかったために、条件付きでのストークスパラメータの計測になってしまった。今後、広帯域で使用可能なフレネルロム波長板を導入することにより完全な形でのストークスパラメータを行うことを予定している。

また、今回は京都大学エネルギー理工学研究所のTHz-CUR光源を使用して偏光操作の実験を行ったが、東北大学電子光理学研究センターにおいても、交叉型

アンジュレータ放射を用いた偏光可変 THz 光源の開発を進行中であり、光移相器の設計などが進行中である[6]。既に、交叉型アンジュレータ( $\lambda_U = 80$  mm,  $N = 7$ ,  $K = 3.51$ ,  $g = 33$  mm)の製作は完了しており、そのうちの1台平面型アンジュレータを用いて今回京都大学で実施した実験と放射の波長領域( $f_R = 1.5 \sim 2.0$  THz)は異なるが1台のアンジュレータからのコヒーレントアンジュレータ放射の偏光操作実験を行うことを計画している。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 基盤研究(A) 17H01070 および挑戦的萌芽研究 18K18758、京都大学エネルギー理工学研究所の ZE Research Program (ZE30C-08, ZE31C-12)の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] S. Kashiwagi *et al.*, Infrared Physics & Technology **93**, 335-339, (2018).
- [2] S. Kashiwagi *et al.*, Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, 1475-1477 (2019).
- [3] H. Saito *et al.*, Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, 1769-1771 (2019).
- [4] H. Saito *et al.*, in this proceedings (WEPI011).
- [5] S. Suphakul *et al.*, Inter. Jour. of Magnetism and Electromagnetism, 3, IJME-3-008 (2017).
- [6] N. Morita *et al.*, in this proceedings (THOI10).