

## THz アンジュレータ放射の偏光スイッチング

### POLARIZATION-SWITCHING OF COHERENT THz UNDULATOR RADIATION

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

We are developing an accelerator-based terahertz source that can produce arbitrary polarization states from linearly polarized coherent undulator radiation (CUR). The polarization manipulation of the CUR can be realized using the Martin–Puplett interferometer employed as an optical phase shifter. This study also demonstrates a variable polarization manipulator by using the terahertz CUR (THz-CUR) source based on an extremely short electron bunch at Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University. The horizontally polarized CUR with a frequency of 1.9 THz was manipulated into variable polarization state, and Stokes parameters were measured to derive the degree of polarization. Beam experimental results will be presented in this conference.

#### 1. はじめに

生体高分子である蛋白質等の立体構造(コンフォメーション)の差異やダイナミクスを観測することが生体科学分野で重要な研究課題となっている。その測定手法としてテラヘルツ帯における振動円二色性分光計測(VCD)が注目されており、そのシステム開発が進められている[1,2]。また、高強度 THz 光照射によりコンフォメーションを制御する可能性も近年の研究結果から示唆されている。現在、我々は VCD 計測や蛋白質等のコンフォメーションを制御することを目的に、加速器ベースの偏光可変の THz 光源の開発を行っている。

東北大学電子光物理学研究センターでは、試験加速器(t-ACTS)において、100 フェムト秒以下の極短電子ビーム生成とそれを用いた高輝度コヒーレント THz 光発生に関する研究を行っている。その光源の 1 つがアンジュレータを用いた準単色のコヒーレントアンジュレータ放射(CUR)である[3]。現在、交叉型アンジュレータと移相器を用いる方式[4]と 1 台のアンジュレータとマーチンパレット型干渉計を用いる方式[5]の 2 種類の偏光可変光源の開発を行っている。

今回、t-ACTS において 1 台のアンジュレータからの周波数が約 1.9THz のコヒーレント放射に対してマーチンパレット型干渉計を用いて偏光操作を行い、偏光子と波長板を用いて偏光度測定を実施した。本稿では、ビーム実験および偏光度測定結果について報告する。

#### 2 コヒーレントアンジュレータ放射を用いた THz 偏光可変光源

マーチンパレット型干渉計を利用し、コヒーレントア

ンジュレータ放射から任意の偏光状態を作り出す。Figure 1 に偏光制御システムの構成を示す。平面型アンジュレータからの水平直線偏光の放射をワイヤグリッド偏光子により±45 度直線偏光の二光束へ分割し、それぞれの光束をルーフトップミラーにより反射させ、同時に偏光方向を 90 度回転させる。そして再び 2 光束をワイヤグリッドで合成する。干渉計内の一方の光路長を波長程度移動させるだけで、垂直直線偏光、左右円偏光や楕円偏光などの偏光状態を作り出すことが可能である[6]。放射の 1/2 波長だけ光路長を変えるだけで、左円偏光から右円偏光状態へスイッチングすることができる。例えば、1THz の波長が 300 $\mu\text{m}$  のテラヘルツ波の場合には、干渉計内のステージを 1/4 波長に相当する 75  $\mu\text{m}$  移動させるだけで右円偏光から左円偏光へとヘリシティを反転することができる。偏光操作に利用するマーチンパレット型干渉計は、光の輸送効率が高いので光源出力をほぼそのまま実験に使用することができる。また、こ

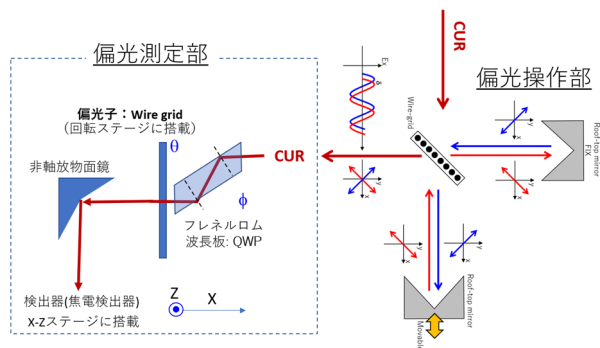


Figure 1: Variable polarization manipulator (VPM) using a Martin–Puplett interferometer.

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

の偏光制御システムを活用することができるのは、アンジュレータ放射が準単色光であるからである。

### 3. t-ACTS におけるビーム実験

#### 3.1 電子ビームおよびアンジュレータパラメータ

東北大学電子光理学研究センターの試験加速器 t-ACTS でビーム実験を実施した。t-ACTS では、熱陰極高周波電子銃により電子ビームを生成し、進行波加速管を使った Velocity bunching により 100 fs 以下までバンチ圧縮することが可能である。また、電子ビームのエネルギーは約 22MeV、規格化エミッタンス水平、垂直方向ともに 5  $\mu\text{m}$  程度である。実験に使用した平面型アンジュレータの基本パラメータを Table 1 に示す。これは、交叉型アンジュレータを用いたテラヘルツ光源開発[3]のために製作したうちの 1 台である。

ビーム実験では、最初にアンジュレータ上流部に配置したマイケルソン干渉計を用いてバンチ長を計測し、最もビームの時間幅が短くなるように調整し[7]、次に CUR の強度を計測しながら加速管へのビームの入射位相を微調整した。Figure 2 に偏光制御システムにも使用されているマーチンパプレット干渉計を使い測定した干渉パ

Table 1: Undulator Parameters

磁石ブロックサイズ	70×23×20 mm <sup>3</sup>
周期長・周期数	80 mm・7periods
全長	587 mm
ギャップ	33 mm (固定)
ピーク磁場	0.471 T
K 値	3.52

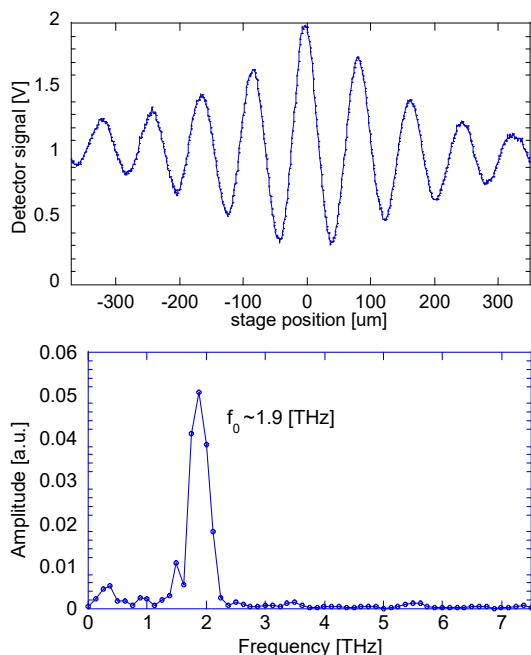


Figure 2: Measured Interferogram and the spectrum of the CUR using the Martin-Puplett interferometer.

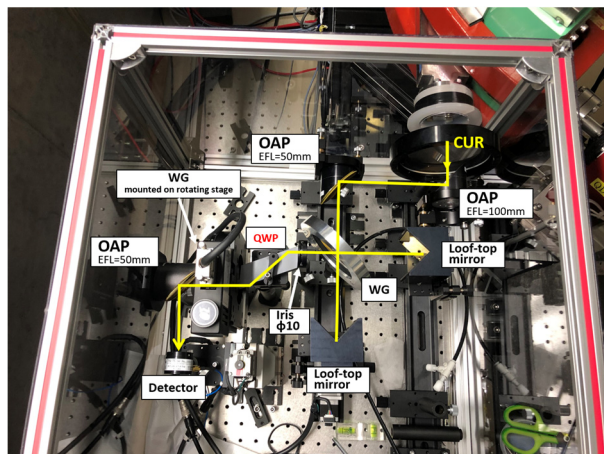


Figure 3: Experimental setup. The VPM system was installed beside the beam line of t-ACTS. (OAP: off-axis parabolic mirror; CUR: coherent undulator radiation; WG: wire-grid polarizer; QWP: quarter wave-plate.)

ターンとスペクトルを示す。今回の実験でのアンジュレータ放射の基本波長は約 1.9THz であった。

#### 3.2 偏光制御および偏光度測定システム

Figure 3 に偏光性制御と偏光度測定(ストークスパラメータ測定)のセットアップを示す。システムはアクリルケースの中に構築し、水蒸気によるテラヘルツ波の吸収を抑えるために乾燥窒素に置換した状態で測定を行った。アンジュレータからの CUR は z-cut 水晶製の窓を使いビームライン真空中から取り出される。そして、2 つの焦点距離が異なる非軸放物面鏡によりコリメートされマーチンパプレット干渉計へと輸送される。2 つの非軸放物面鏡は 1/3 の縮小光学系となっている。干渉計内のワイヤーグリッド (GS57202: wire diameter of 5  $\mu\text{m}$ , wire spacing of 12.5  $\mu\text{m}$ ) の角度は水平偏光の放射がちょうど 2 分割されるように調整した。ルーフトップミラーは反射損失をできる限り抑えるために、反射率の高い金コーティングのものを選択した。ワイヤーグリッドで合成された放射は、偏光度測定系 (Fig. 3 左側) へと導かれる。

偏光度測定系は、フレネルロム 1/4 波長板とワイヤーグリッド偏光子、テラヘルツ検出器 (THz-10, Sensor und Lasertechnik、検出有効径:  $\phi$  10mm) で構成されており、ストークスパラメータを測定することにより、偏光度の評価を行った。

#### 3.3 ストークスパラメータ計測による偏光度評価

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、放射の偏光状態を表すことができる[8]。ストークスペクトル:  $S$  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、

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

PASJ2020 THOT05

と表すことができる。ここで、 $S_0$ はビーム全強度、 $S_1$ 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。完全偏光の場合は  $P = 1$ 、(1)式の右辺の第1項は消える。 $S_1, S_2, S_3 \neq 0$ では楕円偏光のストークスペクトルとなる。無偏光の場合は  $P = 0$  となり、 $S$  は無偏光のストークスペクトルとなる。また、偏光度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 $\lambda/4$ 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。偏光子と波長板の偏光角がそれぞれ $\theta, \phi$ での強度を $I(\theta, \phi)$ と表したとき、 $I(0,0), I(\pi/2,0), I(\pi/4,0), I(\pi/4,\pi/2)$ の4つの場合の強度を測定することで、次式より4つのストークスパラメータを求めることができる。

$$\begin{aligned} S_0 &= I(0,0) + I(\pi/2,0) \\ S_1 &= I(0,0) - I(\pi/2,0) \\ S_2 &= 2 \cdot I(\pi/4,0) - S_0 \\ S_3 &= S_0 - 2 \cdot I(\pi/4,\pi/2) \end{aligned} \quad (3)$$

Figure 4 にフレネルロム  $1/4$  波長板を使用せずに偏光

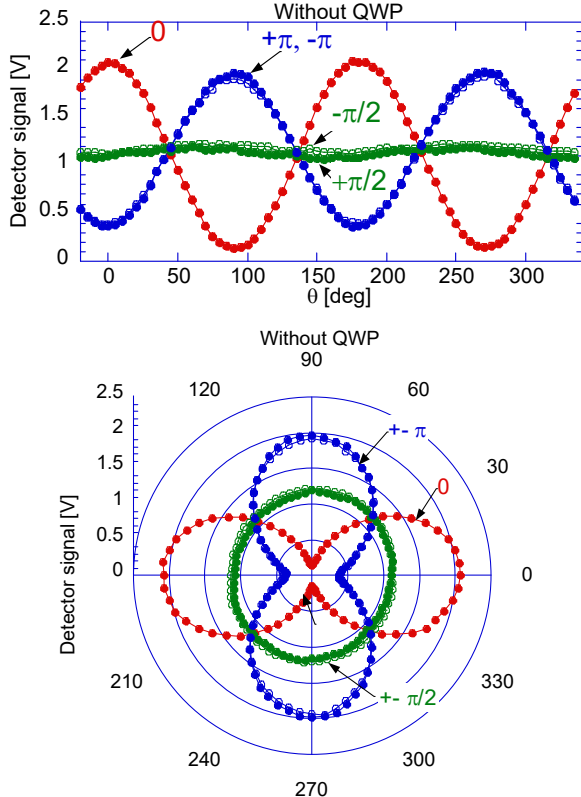


Figure 4: Measured intensity of CUR as a function of different angle of the wire-grid polarizer without Fresnel waveplate.

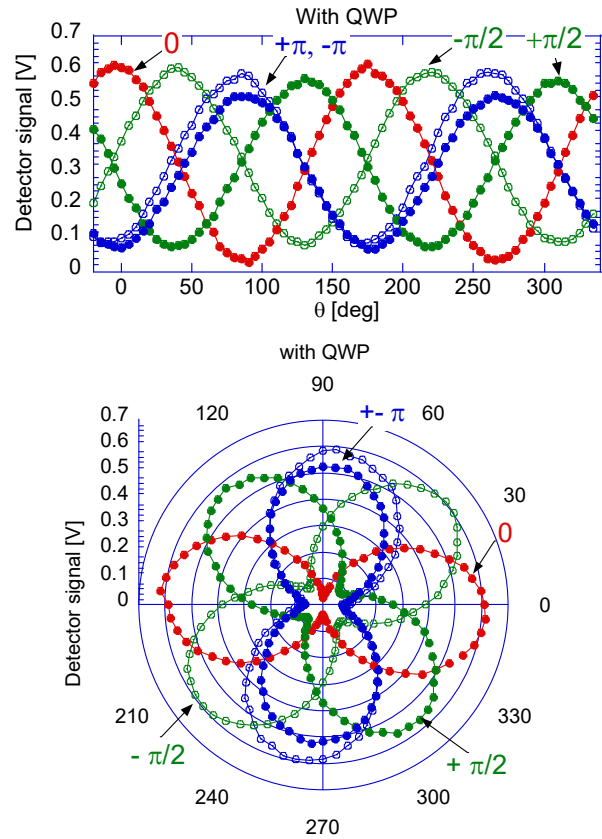


Figure 5: Measured intensity of CUR as a function of different angle of the wire-grid polarizer with Fresnel waveplate.

子を回転角 5 度ステップで 360 度回転させた場合の測定結果を示す。これより、干渉計で位相差が 0 のときに水平偏光状態、位相差が $\pm\pi$ のときに垂直偏光状態が作り出されていることが分かる。また、位相差を $\pm\pi/2$  のときに、円偏光状態が作り出されていることは確認できるが Fig 4 (下)からも分かるように円偏光の左右回転方向を区別することはできない。

次に、フレネルロム波長板を挿入し、同様の測定を行った結果が Fig. 5 である。フレネルロムの透過率が約 30%であったため、測定されるテラヘルツ波の強度は小さくなっているが、フレネルロム波長板を使用しなかった場合に区別ができなかった左右円偏光がそれぞれ $-45^\circ$ 度、 $+45^\circ$ 度直線偏光へと変換されていることが分かる (Fig. 5 下グラフ、緑プロット)。この結果から、干渉計中のリニアステージを  $1/4$  波長に相当する約  $40 \mu\text{m}$  移動させるだけで円偏光のヘリシティを反転できることが確認できた。また、フレネルロム波長板を挿入することにより直線偏光の偏光方向が僅かに回転していることが Fig. 5(下)赤プロットなどから分かる。これはフレネルロム波長板が

Table 2: Measured the Degree of Polarization

Pol.state	$\delta$	$P$	$P_L$	$P_C$
Hor. Linear	0	0.883	0.875	0.116
R Circular	$\pi/2$	0.752	0.039	0.751
Ver. Linear	$\pi$	0.683	0.682	0.043



光軸に対してわずかに傾いていたことが原因であると考えられる。

式(3)を用いてストークスパラメータを求め、各偏光状態での偏光度を算出したものを Table 2 に示す。ここで、直線偏光度と円偏光度は次式を用いて求めた。

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} = P_L^2 + P_C^2 \quad (4)$$

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

Table 2 から、干渉計での位相差を大きくしていくと偏光度  $P$  が減少していることが分かる。これは、位相差を付けることで 2 光束の重畳する割合が減少するためであると考えられる。また、位相差  $\delta = 0$  の場合においても約 10% が無偏光成分であるという結果が得られたが、これは測定時に検出器にのる電氣的ノイズなどのバックグラウンドや電子ビームとテラヘルツ波を分離しているアンジュレータ下流の偏向電磁石で生じるシンクロtron放射などが CUR に混ざりこんだためだと考えられる。また、直線偏光度と円偏光度に関しては、完全偏光成分の中ではそれぞれの位相差で期待される偏光状態が高い偏光度で生成されていることが分かる。

#### 4. まとめと今後の予定

試験加速器 t-ACTS において、マーチンパレット型干渉計を用いた偏光操作システムを使い、1.9THz の水平直線偏光コヒーレントアンジュレータ放射から、水平・垂直直線偏光状態や左右円偏光状態へと偏光を操作できることを実証した。また、フレネルロム波長板を用いた左右円偏光の測定から、干渉計内のステージを 1/4 波長だけ移動させることで偏光のスイッチングが可能であることを確認することができた。

今後は、テラヘルツ帯において左右の円偏光に対して反射・吸収が異なる金属マイクロコイル[9]などを使って、VCD の試験的測定を行いたいと考えている。

#### 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 (ZE31C-12, ZE2020A-30)の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] G. J. Wilmink *et al.*, Invited Review Article: Current State of Research on Biological Effects of Terahertz Radiation, *J. Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 32 (2011) 1074–1122.
- [2] J. Xu, J. Galan, G. Ramian, Terahertz circular dichroism spectroscopy of biomolecules, *Proc. of SPIE Vol. 5268* (2004) 19-26.
- [3] S. Kashiwagi *et al.*, *Infrared Physics & Technology* **93**, 335-339, (2018).
- [4] H. Saito *et al.*, *Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia*, 1769-1771 (2019).
- [5] S. Kashiwagi *et al.*, *Infrared Phys. Technol.* 106, 1–4,

103274, (2020).

- [6] A. Catalano *et al.*, *New Astronomy* 10, 2 (2004) 79-89.
- [7] N. Morita *et al.*, *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THOI10* (2019) pp157–160.
- [8] H. G. Berry *et al.*, *Appl. Opt.*, 16(12) (1977) 3200–3205.
- [9] K. Kamata *et al.*, *Sci Rep* 4, 4919 (2014).