

タンデムアンジュレータによる放射光ベクトルビームの生成

松葉俊哉

高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

藤本将輝

自然科学研究機構 分子科学研究所 極端紫外光研究施設 〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38

保坂将人

名古屋大学シンクロトン光研究センター 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

加藤政博

自然科学研究機構 分子科学研究所 極端紫外光研究施設 〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38

広島大学放射光科学研究センター 〒739-0046 広島県東広島市鏡山 2-313

要旨

ベクトルビームは光ビーム断面内の偏光の方向が一定の規則に従って空間的に変化するもので、直線偏光が径方向を向いて分布するラジアル偏光ビームや、方位角方向を向いて分布するアジマス偏光ビームが代表的なものである。ベクトルビームはレーザー分野では光学素子を用いて合成する手法が確立されている。我々は放射光でベクトルビームを生成する新たな手法を考案した。直列に配置された2台の円偏光アンジュレータから回転方向が互いに逆向きの光渦ビームを生成し、これらをクロスアンジュレータの原理により重畳することで、偏光の向きが中心軸のまわりで方位角に応じて変化するベクトルビームが生成できる。本稿では UVSOR の光源開発ビームライン BL1U で行った実証実験の結果を紹介する。

1. はじめに

光の偏光や位相、強度が空間的に変調された光は structured light と呼ばれ、応用展開へ向けて近年活発に研究が行われている¹⁾。Fig. 1(a), (b), (c), (d) に代表的な structured light である光渦の一例を示す。光渦は偏光状態は一樣であるが、光軸に垂直な断面で見た場合その位相が光軸まわりの方位角に沿って変化する²⁾。光の中心が位相特異点となることに対応してドーナツ状の強度分布を持ち、この性質を利用した STED 顕微鏡技術 (Stimulated Emission Depletion Microscopy) が2014年のノーベル化学賞に選ばれたことはよく知られている³⁾。また、この光渦は軌道角運動量を運ぶとされている点からも幅広い分野で注目されている。Fig. 1(e), (f) にもう一つの代表的な structured light であるベクトルビームの一例を示す。(e) は偏光状態が方位角に沿って変化し、ビーム中心から径方向に振動するようなものでラジアル偏光と呼ばれる状態で、(f) は方位角に沿った偏光の向きが逆に回転するもので anti vortex 偏光などと呼ばれる。ラジアル偏光は収束すると回折限界を超えて集光され、集光位置で強い進行方向電場が現れるといった特性があり、ナノテクノロジーや顕微鏡など様々な応用研究がなされてきた^{4,5)}。

近年までベクトルビームはレーザーと光学素子を用いて生成するのが一般的であり、可視光や赤外といった波長域ではその発生方法が確立されている。例えばレーザーの内部共振器に素子を配置して、発振モードをベクトルビームに限定するような方法⁶⁾、2次元的に光学軸が異なるように分割配置された1/2波長板に一樣偏光を通すことで生成するもの⁴⁾、液晶空間光変調素子を使うもの⁷⁾などがあげられる。最近では高次高調波発生によっても生成されている^{8,9)}。

加速器ベースの光源も近年になって、structured light の発生研究が進んでいる。円偏光アンジュレータの高次放射やらせん状にバンチングされた電子ビームからの放射によって光渦が生成できることが実証されている¹⁰⁻¹³⁾。一方、ベクトルビームについては遷移放射¹⁴⁾やエッジ放射¹⁵⁾がラジアル偏光ビームであることは知られている程度にとどまっていた。そこで我々は2台のアンジュレータを直列に配置したタンデムアンジュレータを用いてベクトルビームを生成する手法を考案し実証実験を行った^{16,17)}。その生成原理と実験結果について報告する。

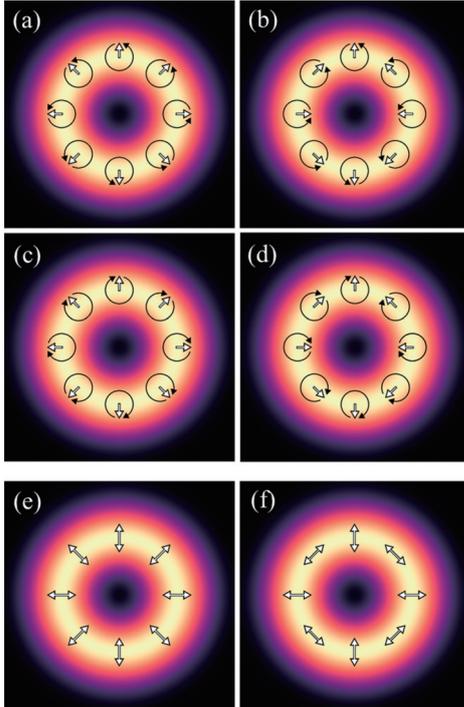


Fig. 1 (Color online) (a), (b), (c), (d) Schematic illustrations of optical vortices. The white arrows in the figures indicate the instantaneous electric field vector, and circular arrows indicate the handedness of circular polarization. Optical vortices of (a), (d) have a right-handed spiral wavefront, and (b), (c) have a left-handed spiral wavefront. (e), (f) Schematic illustrations of vector beams. The arrows in these figures are indicated the polarization directions.

2. 生成原理の概要

Fig. 1(e), (f)のようなベクトルビームは円偏光の光渦で等位相面の回転方向が互いに反対の2つの光渦を重ね合わせることで生成できることが知られていた⁷⁾。文献⁷⁾の**Fig. 2**で示されているように、例えば**Fig. 1(a), (c)**の二つの左と右の円偏光で等位相面が右旋回と左旋回であるような反対の二つの光渦を重ね合わせると(e)のようなラジアル偏光が発生する。**Fig. 1(b), (d)**は左円偏光左旋回の光渦と右円偏光右旋回の光渦であるが、その重ね合わせでは**Fig. 1(f)**のベクトルビームができる。ジョーンズベクトルを用いて右円偏光右旋回の光渦と左円偏光左旋回の光渦の重ね合わせを表すと、次のように書ける、

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(r, \phi) &= E(r) \left(\exp[i(\phi)] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \exp[-i(\phi + \alpha)] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \right) \\ &= 2E(r) \exp\left[i\left(-\frac{\alpha}{2}\right)\right] \begin{bmatrix} \cos(\phi + \alpha/2) \\ -\sin(\phi + \alpha/2) \end{bmatrix}, \quad (1), \end{aligned}$$

(r, ϕ) は極座標、 α は光の位相差を表す。このベクトルは直線偏光で、振動方向が観測場所而变化して、 $-(\phi + \alpha/2)$ の角度を向く光を表現している。座標 ϕ の増加に従っ

て直線偏光の向きが逆回転していくものは anti-vortex と呼ばれる種類のベクトルビームであり、位相差 α が0であれば偏光の分布は **Fig. 1(f)** の状態になる。

放射光ではクロスアンジュレータと呼ばれる手法で直列に配置された2台のアンジュレータからの放射の偏光状態を重ね合わせることが可能である¹⁸⁾。元々は時間的には重なっていない2台のアンジュレータからの放射が分光器によって波束が伸ばされることで時間的に重なり合う。クロスアンジュレータは偏光スイッチング可能な光源として実用化されている¹⁹⁾。我々は、円偏光アンジュレータの高次光が円偏光の光渦となっていることに着目し、クロスアンジュレータの手法を2次元的な光の重ね合わせに拡張し、2台の円偏光アンジュレータから放射される光渦を重ねあわせることでベクトルビームを生成することを着想した。

3. 実験の概要, 結果

実験は分子科学研究所 UVSOR-III の光源開発用ビームライン BL1U で行った。実験を紫外線領域で行うことと、エミッタンスの影響をなるべく排除するため²⁰⁾、加速器は500 MeV で運転された。このときエミッタンスは通常の半分の8 nm-rad 程度の状態となる。実験セットアップの概要を **Fig. 2** に示す。BL1U には2台の APPLE-II 型可変偏光アンジュレータが直列に並んでおり、その間にバンパ軌道を作って電子を遅延させ2台のアンジュレータからの光の位相差を調整するウィグラー型電磁石(フェーズシフター) が設置されている。アンジュレータは長さ1.056 m、磁石列周期88 mm、周期数10であり、2台のアンジュレータの中心間は約1.6 m 離れている。アンジュレータ光はミラーなどの光学素子を通すことなく、SiO₂ の真空窓を通して大気中に取り出され、248 nm ± 1 nm FWHM のバンドパスフィルターを通した後、アンジュレータ中心から7.5 m の位置に設置した CCD で強度分布を測定している。偏光分布の測定にはワイヤグリッド偏光子を用いた。アンジュレータはそれぞれ右と左の円偏光を発生するように設定されており、その2次高調波の波長がバンドパスフィルターの波長と一致するようになっている。右、左円偏光アンジュレータの2次高調波は **Fig. 1(d), (b)** のような円偏光の光渦になっている。左右逆の円偏光を重ね合わせることで直線偏光となるが、さらにこれが光渦であることで、中心軸の周りで2つの光の位相差が変化するために直線偏光の向きが変わる (**Fig. 1(f)**)。

偏光の2次元的な分布状態をみるために、偏光子の透過軸の角度を30度刻みで360度変えて、12の透過軸角度で光の強度を取得した。**Fig. 3** に実験及び Synchrotron Radiation Workshop²¹⁾ によるシミュレーションの結果を示す。

左から1列目が偏光子を入れずに取得した強度分布で、2列目以降は偏光子の透過軸を図中左上の矢印方向に設定

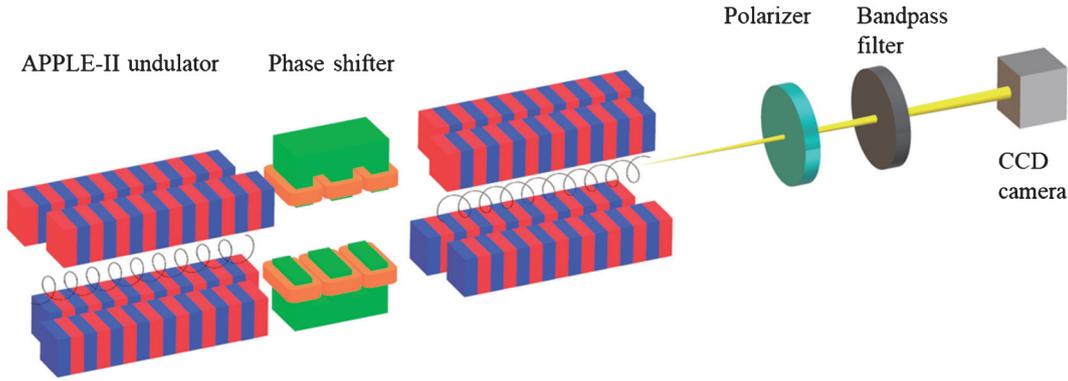


Fig. 2 (Color online) Schematic illustration of the experimental configuration. Reproduced from ref¹⁶.

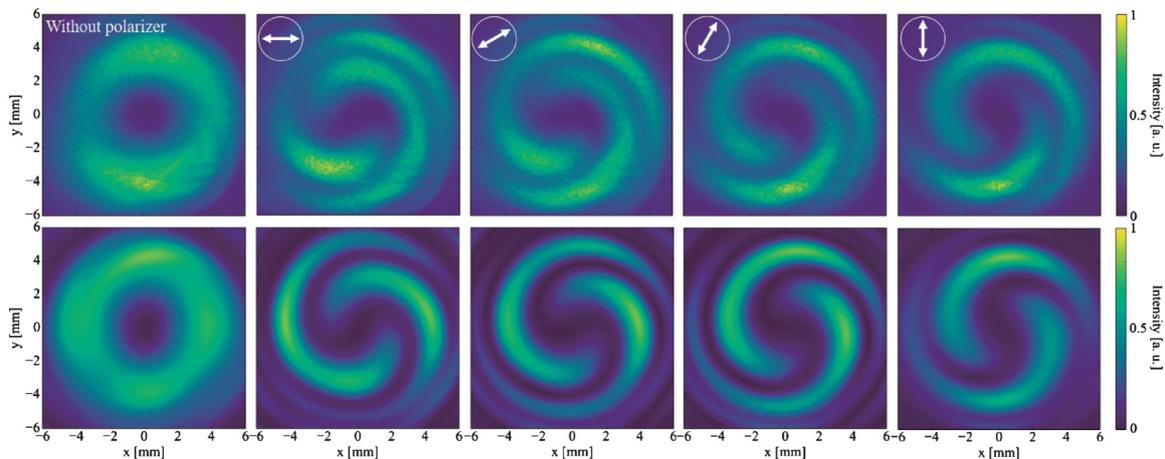


Fig. 3 (Color online) Obtained intensity distributions of superposed light. The results of the experiment and the simulation are shown in the top and bottom row respectively. The most left column shows the intensity without a polarizer, and others show the intensity through polarizer. The transmission axis of the polarizer is shown in the top left of each column as an arrow in the circle. Reproduced from ref¹⁶.

して取得した強度分布である。特定方向の直線偏光強度の大きい部分はらせん状に分布し、偏光子の回転方向と反対に回転する。式1で表される理想的なベクトルビームであれば、特定の向き of 偏光は180度対抗する直線上に強度を持つはずである。しかし、アンジュレータ光は球面波であり、観測面における光軸からの距離に依存して上流と下流のアンジュレータからの光の位相差が変わり²²⁾、この結果、特定の向き of 偏光成分は直線ではなくらせん状に分布することになる。さらに、今回生成したベクトルビームは Fig. 1(f) のタイプであり、中心軸の周りで時計回りに観測点を変えるとそこでの偏光の向きは反時計回りに回転していく。従って偏光子を時計回りに回転すると強度の強い場所は反時計回りに移動する。これらの効果が相まって偏光子の回転方向とらせんの回転方向が反対となる。

この強度分布のそれぞれの位置での直線偏光の向きを強度分布の角度依存性から解析したものを Fig. 4 に示す。

強度の変動が小さい点をビーム中心として選び、中心から半径1.33, 1.98, 2.63, 3.28 mm の円上で15度ごとに24点

の位置で強度の偏光子の角度依存性を sin 関数でフィッティングして、偏光の向きと直線偏光度を求めた。角度位置が変わるにしたがって偏光の向きが回転していく様子が見て取れ、中心に近い微小な領域ではきれいな分布が得られている。この偏光の分布は Fig. 1(f) が回転したベクトルビームとなっていることが確認できる

この時の直線偏光度を Fig. 5 に示す。ここで直線偏光度は強度の偏光子角度依存性の振動成分の全幅とバックグラウンドも含めた全強度との比で定義している。偏光度は、時間領域での2台のアンジュレータからの波束の重なり具合、偏光子の消光比、観測位置における光の強度差などに影響され低下する。本実験においては60-80%程度で分布している。時間的に光が重なる割合はバンドパスフィルターによって波束がどの程度伸びるかによって決まるが、シミュレーションに取り込めなかったため、文献¹⁸⁾に従って一律に15%偏光度が減少するとして扱った。このようにするとシミュレーションでも60-80%近い偏光度となっており実験結果と概ね一致する。方位角に応じて偏光度

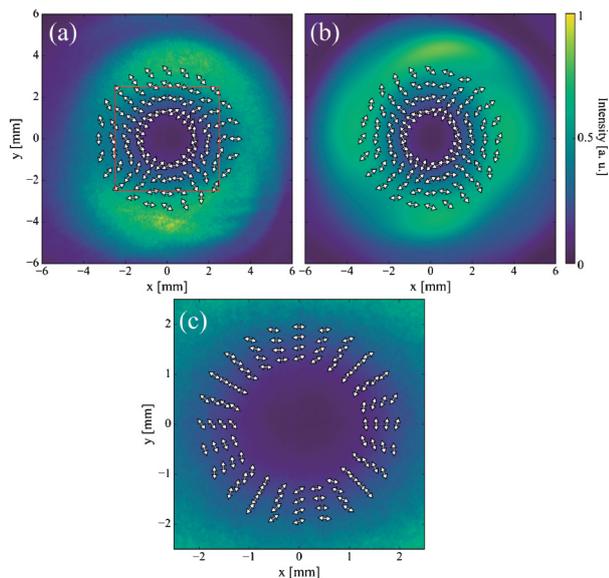


Fig. 4 (Color online) Distributions of directions of polarization on the observing plane. Figure (a) and (b) show measurements and simulations respectively. Figure (c) is an enlarged view of (a) in the range of the red line. Reproduced from ref¹⁶⁾.

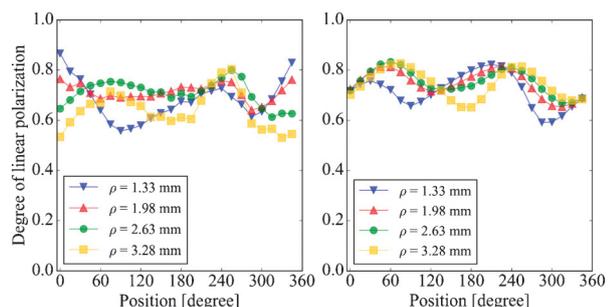


Fig. 5 (Color online) Degree of linear polarization on the observing plane. The left and right figures are the measurement and the simulation corresponding to Fig. 4 (a) and (b), respectively. The horizontal axis represents their azimuthal angles of observation point, and ρ is their distances from the center. Reproduced from ref¹⁶⁾.

が振動しているのはアンジュレータ端部の影響などが原因と考えられるが、さらなる研究が必要である。

次にアンジュレータ間にあるウィング型電磁石を使って $0.12 \mu\text{m}$ 程度の軌道長の伸びをアンジュレータ間を作って電子を遅延させ、2つのアンジュレータからの光の位相差を180度変えて偏光の分布を観測した。結果を **Fig. 6** に示す。**Fig. 4** の偏光方向の分布がビーム断面全域で一斉に約90度回転することが確認され、Eq. (1) と矛盾しない結果が得られた。

4. まとめ

クロスアンジュレータの手法を拡張して、直列配置され

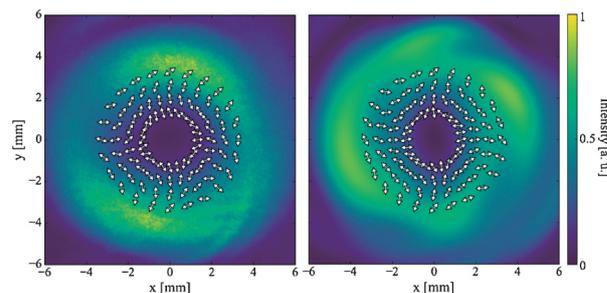


Fig. 6 (Color online) Distributions of directions of polarization on observing planes with a relative phase shift of 180 degrees from the results of Figure 4. Left and right figures show measurements and simulations respectively. Reproduced from ref¹⁶⁾.

た2台の円偏光アンジュレータからの二次高調波を2次的に重ね合わせることで、anti vortex ベクトルビームを生成できた。この手法を異なる高調波次数や偏光のアンジュレータ光に適用することで、様々なベクトルビームを生成することが可能である。光渦やベクトルビームに代表される structured light の特性を有効に利用するには電子ビームのエミッタンスが回折限界であることが理想である²⁰⁾。UVSOR での実験は紫外光の領域で行われたものであり、この波長域では UVSOR はほぼ回折限界である。このため本稿で示したような明瞭な結果が得られた。現在、世界各地で、検討、建設が進んでいる回折限界光源ではより短い波長でベクトルビームが利用可能となるものと期待される。

謝辞

本研究は佐々木茂美氏（広島大名誉教授）、宮本篤氏（現東芝）、川瀬啓悟氏（現 QST）、山本尚人氏（現 KEK）、許斐太郎氏（現 KEK）との共同研究として行われた。

本研究は科研費 JSPS 科研費 17H01075, 18K18304 の助成を受けたものです。また、自然科学研究機構分野融合型共同事業、分子科学研究所協力研究の助成を受けています。UVSOR BL1U は文部科学省量子ビーム基盤技術開発プログラムの補助を得て建設されたものです。

参考文献

- 1) H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. V. Berry, M. R. Dennis, D. L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, T. Bauer, E. Karimi, L. Marrucci, M. Padgett, M. Ritsch-Marte, N. M. Litchinitser, N. P. Bigelow, C. Rosales-Guzman, A. Belmonte, J. P. Torres, T. W. Neely, M. Baker, R. Gordon, A. B. Stilgoe, J. Romero, A. G. White, R. Fickler, A. E. Willner, G. Xie, B. McMorrin and A. M. Weiner: *J. Opt.* **19**, 013001 (2017).
- 2) 保坂将人, 金安達夫, 加藤政博: *放射光* **31**, 84 (2018).
- 3) T. A. Klar, E. Engel and S. W. Hell: *Phys. Rev. E*, **64**, 066613 (2001).
- 4) Q. Zhan: *Adv. Opt. Photon.* **1**, 1 (2009).

- 5) R. Dorn, S. Quabis and G. Leuchs: Phys. Rev. Lett. **91**, 233901 (2003).
- 6) D. Pohl: Appl. Phys. Lett. **20**, 266 (1972).
- 7) C. Maurer, A. Jesacher, S. FÜRhapter, S. Bernet and M. Ritsch-Marte: New J. Phys. **9**, 78 (2007).
- 8) R. Généaux, A. Camper, T. Auguste, O. Gobert, J. Caillat, R. Taïeb and T. Ruchon: Nat. Commun. **7**, 12583 (2016).
- 9) C. Hernández-García, A. Turpin, J. San Román, A. Picón, R. Drevinskas, A. Cerkauskaitė, P. G. Kazansky, C. G. Durfee and I. J. Sola: Optica **4**, 520 (2017).
- 10) S. Sasaki and I. McNulty: Phys. Rev. Lett. **100**, 124801 (2008).
- 11) J. Bahrtdt, K. Holldack, P. Kuske, R. Müller, M. Scheer and P. Schmid: Phys. Rev. Lett. **111**, 034801 (2013).
- 12) M. Katoh, M. Fujimoto, N. S. Mirian, T. Konomi, U. Taira, T. Kaneyasu, M. Hosaka, N. Yamamoto, A. Mochihashi, Y. Takashima, K. Kuroda, A. Miyamoto, K. Miyamoto and S. Sasaki: Sci. Rep. **7**, 6130 (2017).
- 13) E. Hemsing, A. Knyazik, M. Dunning, D. Xiang, A. Marinelli, C. Hast and J. B. Rosenzweig: Nat. Phys. **9**, 549 (2013).
- 14) U. Happek, A. J. Sievers and E. B. Blum: Phys. Rev. Lett. **67**, 2962 (1991).
- 15) R. A. Bosch: Nucl. Instrum. Meth. A **386**, 525 (1997).
- 16) S. Matsuba, K. Kawase, A. Miyamoto, S. Sasaki, M. Fujimoto, T. Konomi, N. Yamamoto, M. Hosaka and M. Katoh: Appl. Phys. Lett. **113**, 021106 (2018).
- 17) 松葉俊哉, 川瀬啓悟, 宮本 篤, 佐々木茂美, 藤本将輝, 許斐太郎, 山本尚人, 保坂将人, 加藤政博: 第15回日本加速器学会年会プロシーディングス, 長岡, p167 (2018).
- 18) K. J. Kim: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. **219**, 425 (1984).
- 19) S. Yamamoto, Y. Senba, T. Tanaka, H. Ohashi, T. Hirono, H. Kimura, M. Fujisawa, J. Miyawaki, A. Harasawa, T. Seike, S. Takahashi, N. Nariyama, T. Matsushita, M. Takeuchi, T. Ohata, Y. Furukawa, K. Takeshita, S. Goto, Y. Harada, S. Shin, H. Kitamura, A. Kakizaki, M. Oshima and I. Matsuda: J. Synchrotron Rad. **21**, 352 (2014).
- 20) T. Kaneyasu, Y. Hikosaka, M. Fujimoto, H. Iwayama, M. Hosaka, E. Shigemasa and M. Katoh: J. Synchrotron Rad. **24**, 934 (2017).
- 21) O. Chubar, P. Elleaume and A. Snigirev: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **435**, 495 (1999).
- 22) B. M. Kincaid: J. Appl. Phys. **48**, 2684 (1977).

著者紹介

**松葉俊哉**

高輝度光科学研究センター 研究員

E-mail: matsubash@spring8.or.jp

専門: 加速器科学, ビーム物理学

【略歴】

2012年広島大学大学院理学研究科博士課程修了, 博士(理学)。2012年から日本原子力開発研究機構, 2015年から放射線医学総合研究所での博士研究員, 2016年から広島大学放射光科学研究センター助教を経て2019年より現職。

**藤本将輝**

自然科学研究機構分子科学研究所 助教

総合研究大学院大学 助教

E-mail: mfmoto@ims.ac.jp

専門: 加速器科学, ビーム物理学

【略歴】

2016年大阪大学大学院理学研究科博士課程修了, 博士(理学)。2015年大阪大学産業科学研究所特任助教。2016年より現職。

**保坂将人**

名古屋大学シンクロトロン光研究センター

特任准教授

E-mail: m-hosaka@nusr.nagoya-u.ac.jp

専門: 加速器科学, ビーム物理学

【略歴】

1994年東北大学理学研究科博士後期課程終了, 理学(博士)。1995年分子科学研究所助手。2006年より現職。

**加藤政博**

広島大学放射光科学研究センター 教授

自然科学研究機構分子科学研究所 特任教授

e-mail: mkatoh@hiroshima-u.ac.jp

専門: 加速器・ビーム物理学

【略歴】

1986年東京大学大学院中退。博士(理学)。1986年高エネルギー物理学研究所助手。2000年岡崎国立共同研究機構分子科学研究所助教授。2004年同教授。2020年より現職。

Generation of vector beam based on synchrotron radiation using tandem helical undulators

Shunya MATSUBA Japan Synchrotron Radiation Research Institute, 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

Masaki FUJIMOTO Institute for Molecular Science, 38 Nishigo-Naka, Myodaij, Okazaki, 444-8585

Masahito HOSAKA Nagoya University Synchrotron Radiation Research Center, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

Masahiro KATOH Institute for Molecular Science, 38 Nishigo-Naka, Myodaij, Okazaki, 444-8585
Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University, 2-313 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-0046

Abstract Vector beams are a sort of structured light that have a spatially variant polarization state. Vector beams have long been of interest in the laser community due to their unique property. In accelerator based light source, edge radiation and transition radiation were only known as a sort of vector beam. Therefore, we propose a scheme to generate vector beam by tandem helical undulators. In this scheme, second harmonic radiations from two opposite circular polarized helical undulators are superposed by using a technique of "cross undulator". We describe the principle of the scheme and details of the experiment.