

UVSOR-Ⅲにおける短波長コヒーレント光渦発生の研究

STUDY OF SHORT WAVELENGTH COHERENT LIGHT VORTEX GENERATION IN UVSOR-III

松永幸大^{#, A)}, 高嶋圭史^{B) A) C)}, 保坂将人^{B) C)}, 真野篤志^{B)}, 郭磊^{B) A) C)}, 藤本将輝^{E)}, 加藤政博^{D), E), B)}
Yukihiro Matsunaga^{#, A)}, Yoshifumi Takashima^{B), A), C)}, Masahito Hosaka^{B), C)}, Atsushi Mano^{B)}, Lei Guo^{B), A), C)},
Masaki Fujimoto^{E)}, Masahiro Katoh^{D), E), B)}

^{A)} Graduate School of Engineering Nagoya University

^{B)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

^{C)} Aichi Synchrotron Radiation Center

^{D)} Hiroshima University

^{E)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

Abstract

Electro-magnetic radiation, whose phase distribution changes continuously in the azimuthal direction around the optical axis, is called a optical vortex. Since the center of the optical vortex is a singular point whose phase is not specified, it has a toroidal intensity distribution. Furthermore, the optical vortex carries an orbital angular momentum. In the previous research, we have succeeded in generating the optical vortex from an electron beam traversing in a circular polarization undulator at the UVSOR-III. We have already succeeded in experiments on coherent harmonic generation (CHG) via interaction between an electron beam and a short pulse laser in an optical klystron. Applying the CHG method to the circular polarized undulator radiation, short wavelength coherent light vortex is expected to be generated. We starts an experiment on short wavelength coherent light vortex using the optical klystron type variable polarization undulator and a Ti:Sa short pulse laser in UVSOR-III. Laser transport system is developed and special and temporal alignment system is examined online and offline. The system works relatively except for the special resolution and we are going to replace the telephoto camera to improve it.

1. はじめに

通常の光の波面は平面または球面であるが、光渦という螺旋状の波面を持つ光がある。伝搬する光を光軸に垂直な面内で切った時の断面において位相が中心軸の周りで $2n\pi$ 変化する分布をもつ。ただし、 n は 0 でない整数である。光軸上の位相は明確な値を持たず暗点となって現れる。これを位相特異点という。このため光渦はドーナツ状の強度分布を持つ。光の運ぶ運動量を示すポインティングベクトルが光軸周りの方位角の方向成分を持つことから、軌道角運動量を運ぶ[1]。これらの特徴を用いた光渦に関する応用研究が発展している[2]。

近年の先行研究により、円偏光アンジュレータから放射される自発放射光が光渦の性質をもつことが明らかとなった。[3] 可変偏光アンジュレータ内で電子はらせん運動する。らせん運動はある中心のまわりの円運動とその中心自身の等速直線運動の合成と考えることができる。円運動する電子からの放射場を古典電磁気学的に計算すると Fig. 1 に示すように、その周波数成分により、基本波は球面波であるが高調波は螺旋状の波面を持つ。このような電磁場をローレンツ変換することで得られるのが円偏光ア

ンジュレータ光であり、その基本波は通常光であるが、高調波は光渦となる[3]。なお、光渦にも偏光の向きが存在するが、円偏光アンジュレータの高次光は円偏光の光渦である。

アンジュレータからの自発放射光は時間的にコヒーレントではない。これに対し、光クライストロン型アンジュレータと外部レーザーを用いることでコヒーレント高調波発生(CHG)の手法で時間的にコヒーレントな短波長高調波が発生できることが実証されている[4]。本研究では円偏光型光クライストロンを用いてコヒーレントな光渦を発生することを目的とする。実験は UVSOR-BL1U の可変偏光光クライストロン型アンジュレータおよび 800 nm パルスレーザーを用いて行う。

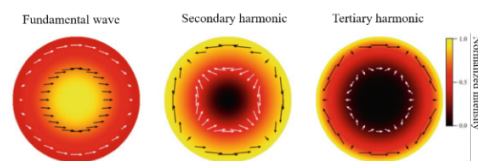


Figure 1: The electric field distribution of CHG. (Left): Fundamental wave. (Center): Secondary harmonic. (Right): Tertiary harmonic.

[#] matsunaga.yukihiro@c.mbox.nagoya-u.ac.jp

2. コヒーレント光渦発生方法

2.1 可変偏光型光クライストロン

UVSOR-III の光源開発用ビームライン BL1U には可変偏光型の光クライストロンが設置されている。これは、2 台の可変偏光型アンジュレータと 1 台のバンチャー電磁石で構成されている。UVSOR-III における可変偏光型アンジュレータのパラメータを Table 1 に挙げる。

Table 1: Parameters Condition of Undulator Variable Polarized Optical Klystron

Undulator	Upstream	Downstream
Polarization	Horizontal	Circular(Ellipse)
Length	0.968m	0.968m
Period length	0.088m	0.088m
Number of periodicity	10	10
Maximum deflection parameter	7.36	4.06(Circular)
Setting wavelength	800nm	532nm
Maximum wave(750MeV)	569nm	356nm
Maximum wave(600MeV)	886nm	556nm
Buncher	Electromagnet 3-poles	
Length	410mm	
Maximum magnetic field	0.42T	
Maximum R56	72 μ m(600MeV)	

2.2 コヒーレント高調波発生原理

Figure 2 に示すように、電子ビームとレーザー光を光クライストロンで相互作用させることで、コヒーレント高調波を発生させることができる。

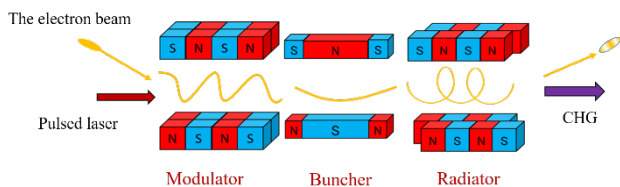


Figure 2: The structure of optical klystron.

上流のモジュレータ(水平偏光)中で電子ビームとレーザー光とを相互作用させ、電子ビーム内にレーザー波長でのエネルギー変調を生成する。その後バンチャーでこのエネルギー変調を密度変調に変換させ、マイクロバンチングを起こす。バンチャーを通過後、下流のラディエータ(円偏光)を通して電子ビームから基本波とその高調波である CHG 光渦を発生させる。

3. 実験内容

3.1 アンジュレータ調整と自発放射光の測定

通常のビームエネルギー750 MeV では 800 nm レー

ザーとの相互作用や放射光の発生が困難であるため、本実験では 600 MeV とした。また、上流アンジュレータの基本設定波長を 800 nm, 下流アンジュレータの基本設定波長を 532 nm とした。設定したアンジュレータパラメータを Table 1, UVSOR で用いたパラメータを Table 2 に示す。

Table 2: Condition of UVSOR-BL1U

Electron beam	
Beam energy	600MeV
Bunch width	100psec
Bunch mode	Single bunch
Frequency	5.63MHz
Laser	
Ti:Sa mode lock laser: Legend (Coherent Co.)	
Pulse width	1psec
Frequency	1kHz
Wavelength	800nm
Average power	2.0W

簡便には発生する 2 次高調波を 400 nm にしたいところであるが、その場合基本波が 800 nm となり、UVSOR の U1 の円偏光モードでも最大 K 値を用いても電子エネルギー600 MeV ではその波長よりも短波長になる。そこで円偏光アンジュレータの 2 倍波として 266 nm 高調波を取り出すことを考える。

また、分光器を用いた放射光スペクトル測定実験から、下流アンジュレータを円偏光かつアンジュレータ間のギャップを最小(24 mm)にしても基本波の最大発生波長が 532 nm より短くなったために満たなかった。このため、下流アンジュレータを楕円偏光にして 532 nm の基本波を発生させることを考えた。

3.2 レーザー輸送路の構築と光軸調整

本実験では、Fig. 3 のようなレーザー輸送経路の設計を行った。レーザー発振装置(Coherent 社 Legend HE)がアンジュレータ下流側に設置されている関係上このような経路となった。レーザー光をアンジュレータ内の真空パイプに通すことで大気による揺らぎを低減している。また、上流の折り返し経路に複数の反射を適用することでレーザー光の傾きや位置、偏光の向きを上流側経路のみで調節できる。この他、偏光の向きを適切に操作することで、レーザー戻り光の分離廃棄と、折り返し前後の光軸一致によるコンパクト化を行っている。

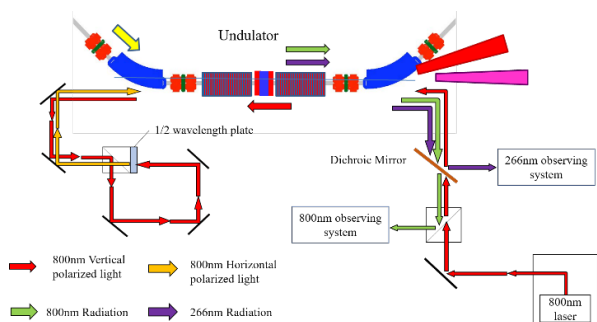


Figure 3: The traffic channel of laser.

レーザー装置から鉛直偏光レーザー光が発振され、偏光ビームスプリッター(PBS: Polarization beam splitterとダイクロミックミラー(315 nm 以下のみ反射)を一度透過し真空チャンバー内を通過して上流へ輸送される。レーザー光を水平偏光で入射するため PBS と 1/2 波長板を用いて上流で偏光の向きを変えた。そしてレーザー光を再びアンジュレータへ入射し、電子ビームと相互作用させて放射光を発生させた。尚、この経路ではレーザー光が偏光の向きを変えて上流から同じ経路で折り返されるため、下流側に偏光ビームスプリッターを設置し戻り光を反射させレーザー装置に入らないようにした。

下流に示すダイクロミックミラーは 315 nm より短波長の光のみ反射させ、それ以外を透過させるミラーである。このため、本実験では放射光の基本波とレーザー光は透過し 266 nm の 2 次高調波は反射する。ダイクロミックミラーを透過した光は Fig. 4 に示す経路で後述するアライメントに用いた。

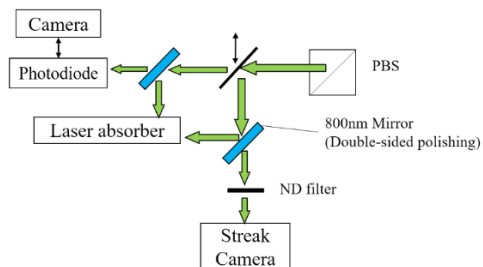


Figure 4: The traffic channel of 800nm observing system.

3.3 空間アライメント

ダイクロミックミラーを透過した光は前述の通り PBS を反射させアライメントに用いた。望遠レンズをつけたカメラを Fig. 4 に示す位置に設置し、アンジュレータ(モジュレータ)中のレーザー光と放射光の光軸を一致させる空間アライメントを行った。レンズのピント調整機構を用い、モジュレータ全域にわたり両者の光軸を一致させた。重なり合った時の結果を Fig. 5 に示す。



(a) Only SR. (b) Consensus of laser and SR.

Figure 5: Laser and SR from alignment camera.

3.4 時間アライメント

3.3 の空間アライメント終了後、Fig. 4 に示すようにカメラとフォトダイオード(周波数域~1.2GHz)を入れ替え、下流の同じ場所で時間アライメントを行った。オシロスコープでレーザー光と放射光の信号を観測した。(Fig. 6) フォトダイオードで 1 nsec までの分解能で時間アライメントが可能であった。

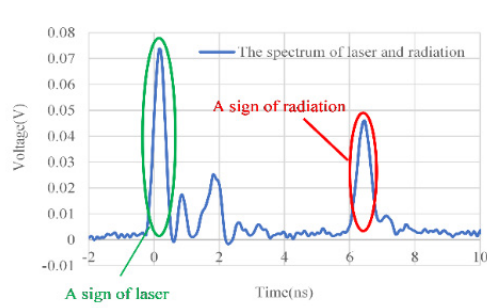


Figure 6: Signals of spectrum from oscilloscope.

重なり合った時 266 nm 観測系で CHG が発生するはずだが、フォトダイオードの分解能が低く両者の信号を一致させても CHG の発生を確認できなかった。そこで、より高分解能であるストリークカメラを用いて観測したところ、レーザーと放射光が時間的にずれていた。その結果を Fig. 7 に示す。アライメントに取り掛かったところ、ビーム入射系でのトラブルにより実験中止となった。

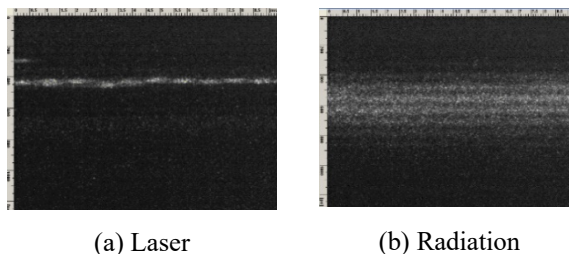


Figure 7: Laser and SR from streak camera.

3.5 カメラの分解能測定試験

本実験では、加速器のトラブルにより CHG の観測に至らなかった。一方実験を通して空間アライメント用カメラの分解能が低いことが考えられ、分解能確認試験を行った。測定方法として、Fig. 8 に示すようにターゲットを撮影し、1 mm がどれだけのピクセル数に相当するかを読み取った。ターゲットとカメラ間の距離は実際の実験中のアライメントを模擬して 11 m とした。測定には Imaging source 製の DMK42ACU03(解像度 1280×960, ピクセル幅 3.75×3.75 μm)を用いた。測定の結果、およその分解能の値は 0.78 mm/pix となった。この値ではアライメントが不可能でないが、本実験から更なる空間アライメントの簡易化が必要であると考え、より高分解の望遠レンズでの再アライメントを検討している。

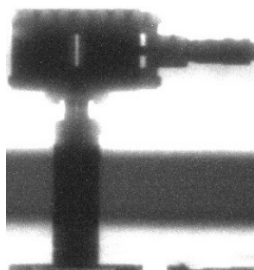


Figure 8: The target of camera.

4. まとめ・今後

現在は、放射光とレーザーの時間・空間アライメントを行ったが、完全一致とまでいかず CHG は発生できていない。カメラやフォトダイオードの分解能が低くより微細な調節ができないことが原因である。今後は、ストリークカメラなど分解能の高い調節カメラやフォトダイオードを用いたアライメントを考えている。また、時間アライメントを簡易化するためレーザーパルス長を伸ばすことも視野に入れている。アライメントに成功し CHG 発生後 ICCD(Image Intensifier Charge Coupled Device)を用いて空間強度分布を観測し発生した CHG が光渦であることを確認する予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、UVSOR の職員の方々をはじめ多くの加速器関係者に実験協力を中心とした数多くのご支援やご指導を頂き、深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, *Phys. Rev. A* 45, 8185 (1992).
- [2] K. Shigematsu *et al.*, *Phys. Rev. B* 93, 045205 (2016).
- [3] M. Katoh, *et al.*, *Scientific Reports* 7, 6130 (2017).
- [4] M. Labat *et al.*, *Physical Review Letters* 101, 164803 (2008).