

GENERATION OF RADIAL POLARIZED LASER BEAM AND ITS APPLICATIONS FOR ACCELERATOR

Akira Maekawa^{A)}, Hiromitsu Tomizawa^{B)}, Mitsuru Uesaka^{A)}

^{A)} Nuclear Professional School, University of Tokyo
2-22 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1188

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

Abstract

We are developing several methods to generate the radial polarization. Various polarizations such as radial/azimuth polarizations can be available for many accelerator applications. One of the applications is for a laser wire monitor [1], because we can easily obtain fine TEM01 or TEM10 modes from radial polarization with rotating a polarizer. And we will also apply radial polarization for Z-polarized beam generation [2] and broadband EO sampling (3-D femtosecond bunch monitor) [3]. We can generate radial polarization from linear polarization via a liquid crystal (LC) cell or 8-divided wave plates. Here we demonstrate and evaluate the radial polarized beam generation by means of these 2 methods.

ラジアル偏光レーザービームの生成と加速器応用

1. はじめに

1.1 特殊偏光への変換制御

通常用いられているレーザーの偏光状態は、直線偏光や円偏光などのエルミートガウスビームである。一方で、ラジアル・アジマス偏光ビームやラグエルガウスビームなど、様々な光学素子を用いることで極めて特徴的で有用なレーザーの偏光状態を生成することが出来る。図1に様々なレーザーの偏光状態とその変換方法を示す。我々は他にも非回折ビーム等の応用も検討している。ここでは特に、ラジアル偏光を最も一般的な偏光状態であるTEM00の直線偏

ように放射状に分布している。このため、同じく同心円状に偏光軸が分布しているアジマス偏光と合わせて軸対称偏光ビームと呼ばれる。ラジアル偏光は、レーザー加工や高分解顕微鏡、光ピンセットなどへの応用研究が近年進められている。

1.2 ラジアル偏光の加速器応用

ラジアル偏光は、図1に示したように、偏光子を回転させることでエルミートガウスビームのTEM01とTEM10に簡単に分離・切替をすることが出来る。非破壊の電子ビームサイズ診断手法であるレーザーワイヤーモニタでは、使用するレーザーのスポットサイズによって分解能が決定する。従って、TEM00よりも複雑な空間構造を持つTEM10を用いることで、より高い分解能を得ることが出来る[1]。このため、TEM00からラジアル偏光、更にTEM10へと簡単かつ高効率に変換する手法の開発が極めて有用である。

また全く新規の応用として、ラジアル偏光を集光した際に発生するZ偏光のフォトカソードへの適用[2]や、3次元フェムト秒バンチモニタ（ブロードバンドEOサンプリング）[3]等への応用も考えている。

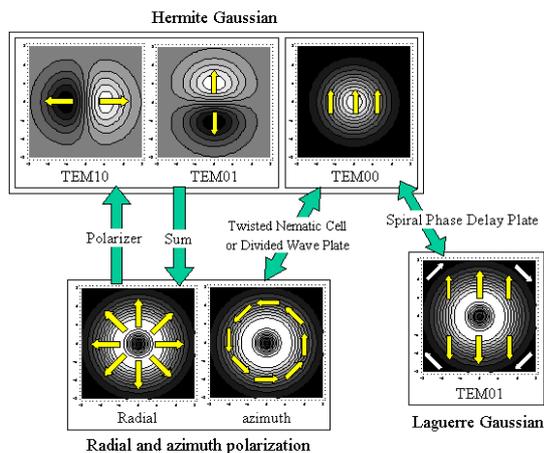


図1 レーザー偏光状態の制御

光から生成する手法とその応用について議論する。直線偏光や円偏光が空間的に均一な偏光軸を持つものに対し、ラジアル偏光での偏光軸は図1に示した

2. 分割波長板によるラジアル偏光生成

2.1 分割波長板による生成

直線偏光のTEM00からラジアル偏光を生成する手法の一つとして、分割波長板[2]を用いる手法がある。これは、図2に示すように結晶軸が異なる $\lambda/2$

波長板を組み合わせで作成したものである。この分割波長板を用いて生成したラジアル偏光を集光した際に発生する、Z成分強度分布の計算結果を図3に示す。8分割波長板を用いることで、ラジアル偏光

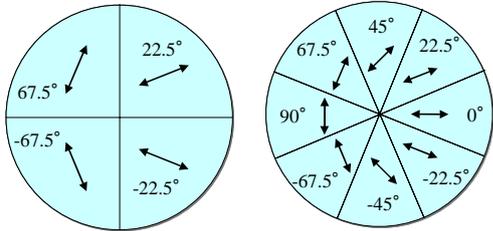


図2 (左) 4分割波長板、(右) 8分割波長板。図中の矢印は結晶軸を表す。

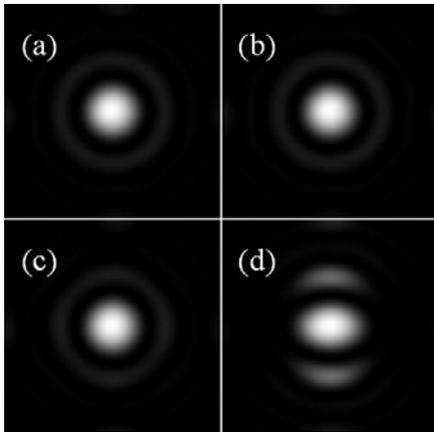


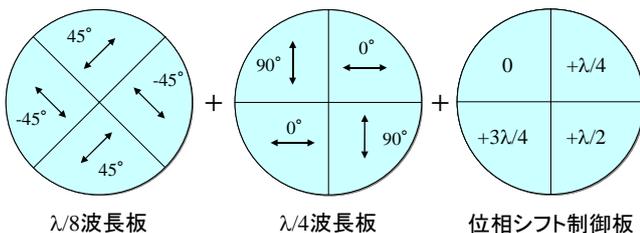
図3 レーザー集光時のZ方向強度分布。(a)理想的なラジアル偏光、(b)8分割波長板、(c)4分割波長板、(d)2分割波長板。詳細は文献[2]参照。

を生成できていることがわかる。

2.2 4分割波長板の組み合わせによる生成

前節で述べたように、分割波長板を用いることでラジアル偏光を生成することが可能である。この方法の特徴は、深紫外域の波長でもラジアル偏光が生成可能であることで、後述のLCセルを用いる手法ではこの点で制約がある。しかし、分割数が多くなると分割波長板を生成することが困難になるため、2枚の4分割波長板を組み合わせることで8分割波長板と同等の偏光状態を生成することが出来れば非常に有用である。

そこで、図4に示すような $\lambda/8$ 波長板と $\lambda/4$ 波長板



$\lambda/8$ 波長板 $\lambda/4$ 波長板 位相シフト制御板

図4 4分割波長板の組み合わせによるラジアル偏光生成。図中の矢印は結晶軸を表す。

を用いた4分割波長板の組み合わせを考案した。ここでは、右円偏光のTEM00を分割波長板に入射することでラジアル偏光を生成する。しかし分割波長板の組み合わせだけでは位相のずれが発生してしまうため、図4に示したように各分割領域において位相シフト制御を行う必要がある。

3. LCセルによるラジアル偏光生成

ラジアル偏光を生成する2つ目の方法として、LC (Liquid Crystal) セルを用いる方法がある。これは液晶の分子配列のねじれに応じて、入射したレーザーの偏光方向が回転する効果を用いたものである。我々は今回、ARCOptix社 (スイス) のRadial Polarization Converterを使用した。透過率は70%以上、液晶の損傷閾値はCWで200W/cm²、10nsパルスで100mJ/cm²、適用可能波長は400nm-1700nmである。この手法の利点は白色光のラジアル偏光を作ることが出来ることである。富澤が提案した有機E0結晶 (DAST結晶等) を用いた3次元フェムト秒パンチ形状モニタ (特願2007-133046) では、有機結晶の透過波長帯域 (DAST結晶の場合620~1600nmで透明 [4]) の白色ラジアル偏光プローブ光を生成する必要がある [3]。このような広帯域のラジアル偏光の

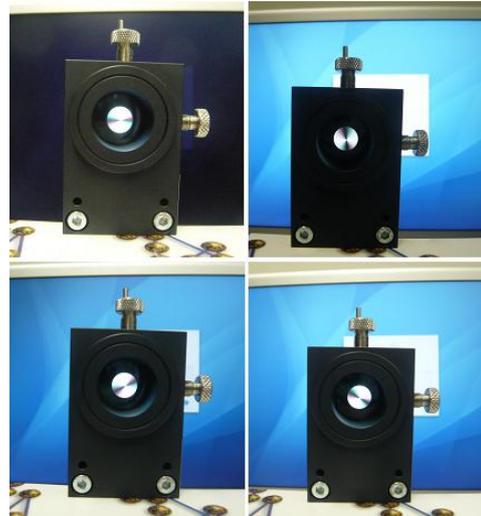


図5 LCセルによるラジアル偏光生成。4枚の写真は、デジタルカメラの直前に置いた偏光子を回転させて撮影したものである。生成は分割波長板では波長分散により不可能である。

LCセル及び偏光子を通して見た液晶画面の写真を図5に示す。図5は、偏光子を回転させながら4枚の写真を撮影したものである。背景にある液晶画面からの発光は直線偏光であり、その明暗によって偏光子の回転状態が分かる。また、LCセルを透過した光は偏光子の回転に応じて明暗の軸が回転しており、LCセルによって直線偏光がラジアル偏光に変換されていることが分かる。

また、実際にラジアル偏光をモニタ応用に用いる場合には、ラジアル偏光ビームを長距離伝播できる

かどうか問題となる。そこで、LCセルを用いて生成したラジアル偏光ビームを波面センサ(Hartmann Wavefront Analyzer, SPIRICON)を用いて計測した。計測体系を図6に、計測結果を図7に示す。図7の(c)と(d)は、LCセルと波面センサとの間に偏光子を入れて計測を行った。このとき、図7(c)

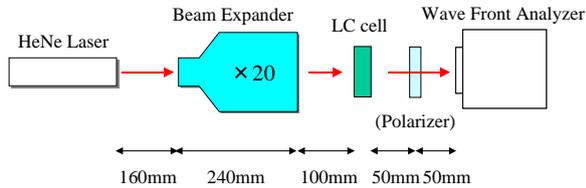


図6 波面計測の実験体系。

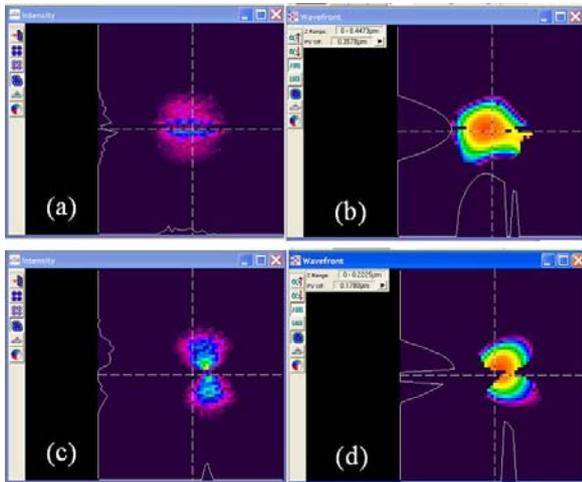


図7 LCセルを用いて生成したラジアル偏光の強度分布(a)及び波面(b)の計測結果と、LCセルの後方に偏光子を置いた場合の強度分布(c)と波面(d)。

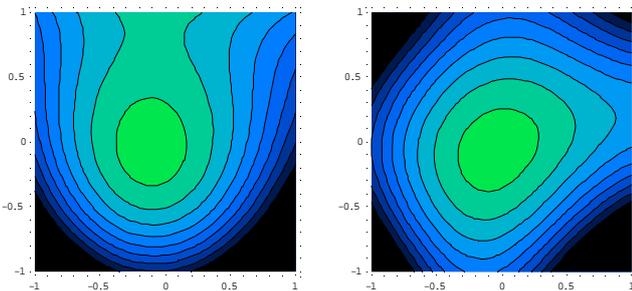


図8 波面センサによる計測結果からZernike多項式を用いて計算した波面。(左)LCセルが無い状態、(右)LCセルを入れた状態(図7(d)の波面)。に示したようにTEM10モードが得られていることが分かる。

図8に、波面センサでの計測結果を基にZernikeの多項式を用いて再構成した波面を示す。Zernikeの多項式とは、波面収差を評価する際に良く用いられるもので、各係数が光学系の収差に対応している。表1にZernikeの多項式と各項の光学的意味の一覧を示す。

図8の計測結果では(2,0)項が最も支配的となっており(LCセル有の場合 $r=133\text{nm}$ 、無の場合 $r=129\text{nm}$)、これは波面が完全な平面波ではなく、集光もしくは発散していることを表している。これはLCセルを入れていない場合でも見られるため、光源のアライメントをより精密に行う必要があると考えられる。今回の計測ではLCセルの有無による有意な差は見られなかったが、今後はLCセルから更に離れたポイントでの波面を計測するなど、より詳細に計測を行っていく予定である。

表1 Zernikeの多項式とその光学的意味

次数 (n,m)	多項式	光学的意味
(1,1)	$\rho \cos\theta$	傾き x
(1,-1)	$\rho \sin\theta$	傾き y
(2,2)	$\rho^2 \cos(2\theta)$	非点収差 x
(2,0)	$2\rho^2 - 1$	集光or発散
(2,-2)	$\rho^2 \sin(2\theta)$	非点収差 y
(3,3)	$\rho^3 \cos(3\theta)$	三つ葉収差 x
(3,1)	$(3\rho^3 - 2\rho)\cos\theta$	コマ収差 x
(3,-1)	$(3\rho^3 - 2\rho)\sin\theta$	コマ収差 y
(3,3)	$\rho^3 \sin(3\theta)$	三つ葉収差 y
(4,4)	$\rho^4 \cos(4\theta)$	テトラフォイル x

4. まとめ

ラジアル偏光の生成について、2つの手法に関して議論及び実証を行った。分割波長板を用いる方法について、分割数と集光時の強度分布の関係を調べた。また、4分割波長板を2つ組み合わせることで、8分割波長板と同等の偏光状態を生成することが可能であることを示した。LCセルを用いる方法については、実際に直線偏光がラジアル偏光に変換されていること、更にLCセルによる波面の歪みがほぼないことを確認した。また、実際に偏光子を用いることでラジアル偏光からTEM10を分離し、偏光変換素子と偏光子だけの簡単な体系でTEM10を生成することが可能であることを示した。

参考文献

- [1] Y. Honda, 9th ATF Collaboration Meeting, 20th Mar 2004
- [2] H. Tomizawa *et al*, "Feasibility Test of Laser-Induced Schottky-Effect-Gated Photocathode RF Gun", Proc. of FEL 2007 (2007) pp.382-385
- [3] H. Tomizawa *et al*, "Non-destructive Single-shot 3-D Bunch Monitor with Femtosecond-Timing All-Optical System for Pump & Probe Experiments", Proc. of FEL 2007 (2007) pp.472-474
- [4] 谷内哲夫, 「有機DAST結晶を用いた広帯域波長可変テラヘルツ波光源」、光センシング技術資料集 pp213-218, 2006年、オプトロニクス社