

Laser-induced Shottoky effect-gated multi-bunch photocathode injectors to downsize the ERL laser source system

Hiromitsu Tomizawa^{1,A)}, Minoru Kobayashi^{B)}

^{A)} Accelerator Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

^{B)} Research & Development Division, Nanophoton Corporation

A-509, Center for Advanced Science and Innovation, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan

Abstract

We proposed Shottoky effect-gated photocathode RF gun using z-polarization of laser source. Radial polarized laser propagation modes exist theoretically and were recently generated practically. Focusing a radial polarized beam on the photocathode, the Z-polarization of laser is generated at the focusing point. The generated Z-polarization can exceed an electrical field of 1 GV/m easily with fundamental wavelength from compact femtosecond laser systems. According to our calculations (NA=0.15), the Z-field of 1GV/m needs 1.2 MW at peak power for fundamental (790 nm) and 0.31 MW for SHG. In the field of 1GV/m, the work function of copper cathode reduces ~ 2 eV. The quantum efficiency will be $\sim 10^{-4}$ at SHG by the Shottoky effect associated with the 1 GV/m. This Shottoky effect can be used as a gate of photo-emission process. In our design of Shottoky effect-gated Photocathode, the fundamental is used as gate pulse and SHG as laser source for photo-emission process. The same single laser pulse can also gate its emission by itself. To keep normal incidence on the cathode, we developed modified-Cesegrain-type incident optics combining with axicon lens pair. In the first test run, we are preparing z-polarizer for SHG to generate radial and azimuth polarizations. Comparing photo-emission process with these polarizations, we make clear the feasibility of this new concept of photocathode.

Z 偏光レーザ高電界を利用した超コンパクト・マルチバンチ・ フォトカソード電子銃の可能性

1. はじめに

X線自由電子レーザ、逆コンプトン散乱によるX線光源、電子顕微鏡、電子線描画装置などの電子源として電子銃が用いられている。電子銃には、熱エネルギーにより電子放出を行う熱カソード電子銃、光電効果によって電子放出を行うフォトカソード電子銃、高電界をカソードに印加することで起きる電界放出を行う電界放出型電子銃がある。フォトカソード電子銃は、他のカソード電子銃に比べると、

(1) 低エミッタンス化が可能である、(2) 光源の強度によって容易に電子ビームの輝度がコントロールできる、などの利点がある。

しかしながら、安定して長期間使用することが可能な、銅やダイヤモンドなどのカソード材料は仕事関数が大きいため、光電子放出には深紫外の光源が必要となり装置の肥大化につながる問題がある。

この解決策(折衷案)として、フォトカソード面に垂直な電場を印加することにより、フォトカソードの仕事関数を小さくし、フォトカソードの量子効率を高める方法が提案されている^[1]。しかしながら、フォトカソードの量子効率を高めるために必要な電

場は1GV/m以上であるため、このような高電場を得るための装置が非常に大型になるという問題点があった。またタングステン製のカソードをニードル化し、0.8 GV/mの電界を先端部に生じさせることで355nmのレーザ光源での光電子生成をしている^[2]。残念ながら電子銃空胴に入るとエージング中にニードルの先端が磨耗してしまうようである。

一方、SPring-8において高品質極短バンチ電子銃の実用化のためにフォトカソード電子銃を開発研究している。SPring-8のレーザ光源は長期安定で高度に最適整形されたビームを提供できる状態にはなっている。しかしながら現状では巨大で複雑なため、普及上の問題となっている。そのため、現状のSPring-8のRF電子銃の性能を維持しながら、レーザのコンパクト化が可能な方法を検討した。

従来のフォトカソード電子銃は、超短パルスレーザを単なるNAの小さな光電子発生用光源としてしか利用して来なかった。しかし、レーザ本来の特徴であるコヒーレント性を利用すれば、超短パルスレーザは高強度場を利用できるはずである。もし、これを有効利用できれば、レーザの超コンパクト化と電子ビーム発生の制御性が偏光制御によって向上する。通常は、レーザの電場は伝播方向に対し垂直なため、

¹ E-mail: hiro@spring8.or.jp

有効にレーザーの高強度場をショットキー効果に利用できない。ところが、ここに間接的な証拠がある。レーザーのカソードへ照射方法には斜め入射と直入射があるが、斜め入射の方が量子効率の高いことは一般的に知られている。SPring-8での斜め入射の実験ではシリンドリカル・レンズによりカソード照射面での長円化を補正したが、入射方式の違いによる量子効率の差は説明できず、またカソードへの入射角に依存するレーザー偏光特性でも斜め入射角が80度を超えないと説明できない。とすると、レーザー電場によるカソード面でのショットキー効果がこの2つの入射方式の量子効率の差ではなかるうか？

著者はレーザー高強度場を最大限利用し、ショットキー効果により光電子発生にゲートをかける為の可能性を検討した。レーザー光をカソード面に対して垂直入射することを前提に、レーザー進行方向に偏光させる円環ラジアル偏光集光系を設計した。この方法によれば、フェムト秒オシレータレーザーでカソード表面上に1~2 GV/mの高電界を垂直に発生させ、仕事関数を2~3 eV程度下げることが可能となる。安定な金属カソードでも、レーザー基本波での反射率が比較的低い材料を選択すれば、光電子生成が可能となる。今回は、その計算結果と準備状況を報告する。

2. Z偏光生成原理と円環ラジアル光学系

2.1 Z偏光発生の原理

Z偏光とは、図1のようにラジアル偏光をカソード面に集光させることで、レーザー伝播方向と平行なZ成分のみの電場を残すことで発生可能である。

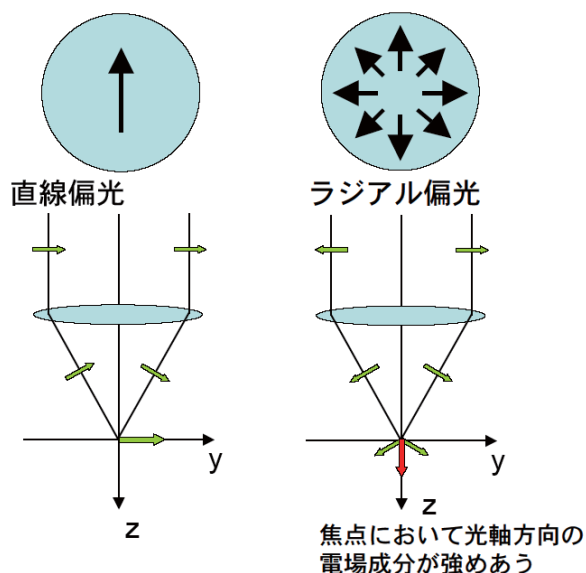


図1: ラジアル偏光からZ偏光をカソード面に生成する原理

2.2 分割波長板を用いた円環ラジアル偏光光学系

ラジアル偏光は伝播モードとして存在する。この最低次モードは、エルミート・ガウシアンモードである TEM_{01} と TEM_{10} とが偏光方向を互いに直交した重ねあわせ合わせとして記述できる^[3]。しかし、

例えばこの TEM_{01} モードのみを直接レーザー発振させることは可能ではあるが難しい。そこで、ガウシアンビーム TEM_{00} (またはフラットトップ) の直線偏光から簡便にラジアル偏光化できる分割波長板方式をとることにした。分割波長板はセクターごとに光軸の向きを図3のように配向することでラジアル偏光子として働く。図2にカソード面上に垂直な電場強度分布の分割数依存性の計算結果を示す。8分割以上ではほとんど完全なラジアル偏光に近いことが分かる。今回は図3に示す、楕円フォトンのZPo1を用いてラジアル偏光を生成し、そのレーザー入射の際に電子ビームとの衝突を避けることと、Z偏光を最大化する為にアキシコンペアで円環状に拡大整形することにした。この円環の幅は入射ビーム径を、円環サイズはペア間距離を変えることで調節できる。

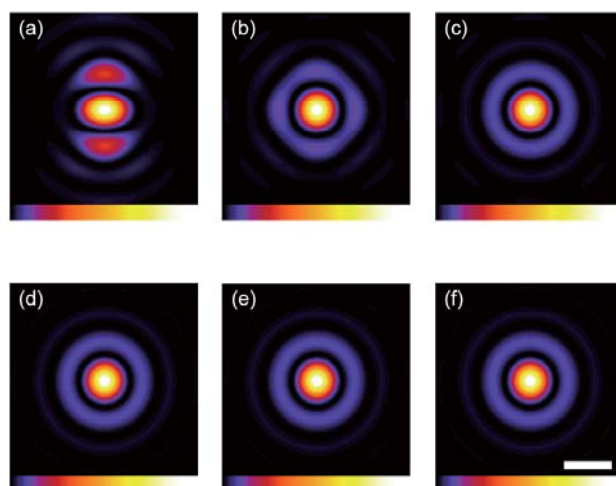


図2: 分割波長板を用いてレーザーを集光した場合の、焦点近傍の電場強度 $|E|^2$ の分布。それぞれ、(a)2分割、(b)4分割、(c)8分割、(d)16分割、(e)32分割、(f)完全なラジアル偏光の場合。スケールバーは790nmで $7.5 \mu\text{m}$ (NA=0.1; Flattop入射時)。

8分割の波長板

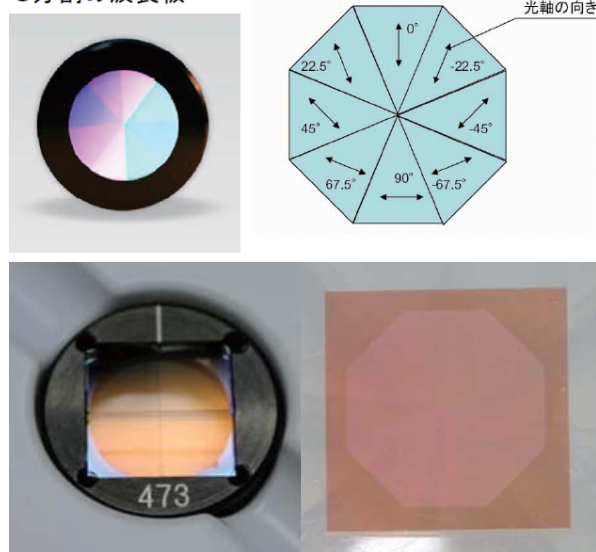


図3: 分割ゼロオーダー波長板(ラジアル偏光素子)

上: 8分割波長板の光軸配向とそのラジアル偏光素子; 左下: 4分割で張合せたもの; 右下: 8分割で1枚の基板の上に波長板として働くフォトニック結晶を成長

2.3 Z成分比率についてのシミュレーション結果

図4に焦点位置でのZ偏光強度と分割数の関係を、分割数無限大の時のラジアル偏光を入射した場合を1として示す。レンズ面でのラジアル成分比率はZ偏光強度の比率よりも大きくなり、回転対称成分の比率はZ偏光強度の比よりも小さくなる。計算結果から、8分割波長板では約95%以上が完全なラジアル偏光として伝播することが分かっている。

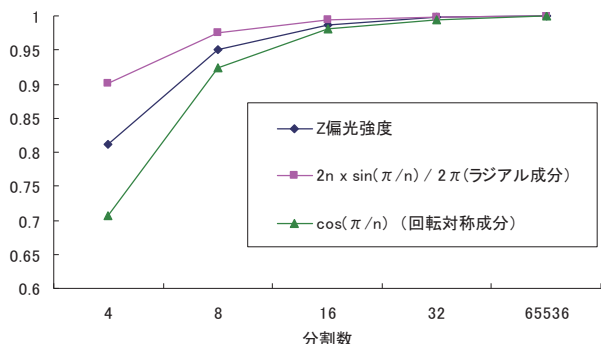


図4: Z成分比率

2.4 Z偏光強度の円環ビーム比率と集光NA依存性

まず、発生するZ偏光強度は波長 λ の2乗に反比例する。次にレンズの焦点距離を変えた場合の効果を計算すると、Z偏光強度はレンズのNAのほぼ4乗に比例（焦点距離の4乗に反比例）することが分かった。したがって、カソードまでの作動距離を短くしてZ偏光の変換効率を上げることが必要となる。

円環の比率を変えた場合の、焦点位置でのZ偏光の強度依存性（NAが0.1, フラットトップビーム入射の場合）を図5に示す。アキシコンペアを用いた場合（損失無し）と単に中心をマスクした場合のZ偏光強度依存性を比較すると、前者の方が効率的にZ偏光変換できることが分かる。

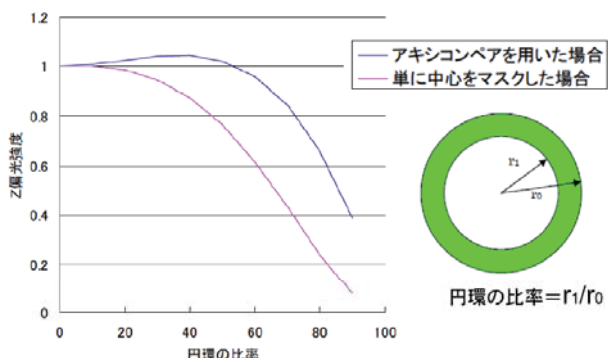


図5: 焦点位置でのZ偏光強度の円環比率依存性

3. レーザのカソード入射方式について

図6に示すように、レーザー光は1組のアキシコンレンズを透過することで円環状ビームに変換された後、ラジアル偏光子を透過する。この円環ラジアル偏光ビームは、中心をくり抜いたミラーで反射、レ

ンズでRF空洞内のフォトカソード表面に集光される。レーザ集光点においては、フォトカソード表面上に垂直な電場が発生し、フォトカソードの仕事関数を実効的に下げ、量子効率も高くなる。続いて、カソードより放出された電子ビームは加速され、前述の中心をくり抜いた光学系の穴を通過する。以上では、反射型のフォトカソードの場合であるが、透過型のフォトカソードの場合には、通常のみラーとレンズで、レーザを集光するだけでよい。

レーザ波長を適切に選べば、一つの波長でゲートと光電子生成が可能である。フォトカソードをゲートするレーザと別に光源レーザを同じ点に集光させることも可能で偏極電子源などの用途に有効である。

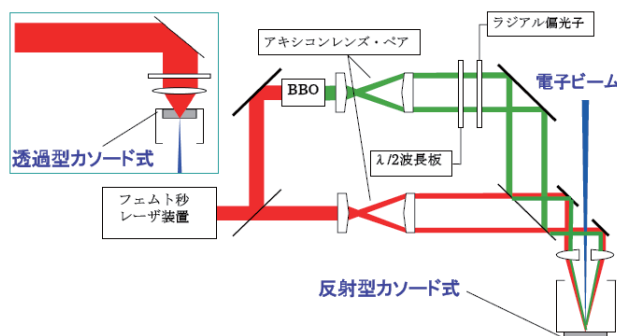


図6: 透過型および反射型カソードへの円環レーザ入射方式

4. 実証試験と今後の計画

ラジアル偏光子前でTi:Saレーザの倍波（395nm）の直線偏光を90度回転することで、ラジアル偏光からアジマス偏光まで変化できる。これにより集光点でのZ偏光強度を最大からゼロまで連続的に変化させ、閾値の確認と量子効率を計測する予定である。

5. まとめと考察

フォトカソード表面に垂直な1GV/m以上の電場を発生させることにより、実効的な仕事関数を下げ、従来よりも長い波長のレーザで金属カソードをドライブできる。例えば、銅カソードにおいては従来、288nmよりも短い波長の光源が必要であったが、この電子銃では倍波を光源に用いることができる。また、ダイヤモンドを材料に用いたフォトカソードにおいては従来226nmよりも短い波長の光源が必要であったが、3倍波（263nm）で可能である。

実際には金属カソードの鏡面反射率に依存するが、2倍波で円環径30mmのラジアル偏光レーザを焦点距離100mmのレンズで集光する場合、0.31MWのピーク強度で、1GV/mの電場が焦点で生じる。

参考文献

- [1] M.J. De Loos et al., PAC'99, 1999, p.3266.
- [2] T. INOUE, et al., JJAP, vol. 41, No.12, 2002, p.7402.
- [3] S.C. Tidwell, et al., Applied Optics, vol.29,15, 1990, p.2234.