

機関番号：84502

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20612024

研究課題名（和文）超コンパクト・マルチバンチZ偏光フォトカソード電子銃の開発

研究課題名（英文）The development of compact Z-polarization multi-bunch photocathode gun

研究代表者

富澤 宏光 (TOMIZAWA HIROMITSU)

財団法人 高輝度光科学研究センター 加速器部門 副主幹研究員

研究者番号：40344395

研究成果の概要（和文）：

フォトカソード表面で、Z 偏光というレーザ伝搬方向に平行な電界を集光点で作成し、光電子放出の量子効率（QE）の Z 偏極電場強度依存性の確認を目的として行った。波長 264 nm（パルス幅：100 fs）の Z 偏光ベッセルビームを銅カソードに照射し、表面で 1.6 GV/m の電界を達成した。ラジアル偏光素子に入射するレーザの偏光面を半波長板で連続回転し、ラジアル偏光からアジマス偏光へと連続的に変化させる Z 偏光強度の変調装置を開発した。ラジアル偏光の集光時（Z 偏極電場が最大）に、光電子放出の電荷量増大（最大で 40%）を観測した。表面（鏡像）ポテンシャルをもつ金属カソードでの Z 偏光レーザ照射による放出電荷量増大の確認により、レーザ電場によるショットキー効果が起こりうることを実証した。変調させた Z 偏極電場強度の変化に同調して増減する QE を観測し、この現象の再現性も確認した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a novel photocathode gun gated by laser-induced Schottky-effect since 2006. This new type of gun utilizes a laser's coherency to aim at a compact femtosecond laser oscillator as an IR laser source using Z-polarization on the photocathode. This Z-polarization scheme reduces the laser pulse energy by reducing the cathode work function due to Schottky effect. A hollow laser incidence is applied with a hollow convex lens that is focused after passing the beam through a radial polarizer. According to our calculations (convex lens: NA=0.15), a Z-field of 1 GV/m needs 1.26 MW at peak power for the fundamental wavelength (792 nm) and 0.316 MW for the SHG (396 nm). In the first demonstration of Z-field emission enhancement was done with copper cathode at THG (264 nm). Consequently, we observed 1.4 times enhancement of photoemission at 1.6 GV/m of an averaged laser Z-field on the copper cathode surface by comparing radial and azimuthal polarizations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野： 加速器科学

科研費の分科・細目： 量子ビーム科学

キーワード： (1)軸対称偏光・ラジアル・アジマス偏光 (2)フェムト秒レーザー (3)ショットキー効果 (4)フォトカソード (5)Z偏光電子源 (6) RF 電子銃 (7)X線自由電子レーザー(XFEL) (8) 次世代放射光加速器

1. 研究開始当初の背景

フォトカソード電子銃は、第4世代放射光光源の高輝度電子源、リニアコライダー等のスピン偏極電子源の最有力候補であり、加速器将来計画に不可欠な技術である。この技術の進展には以下の2点の課題がある。

- (1)カソードの高量子効率化と長寿命化
- (2)低エミッタンス(高輝度)電子ビーム生成用のレーザーパルス光源の高品質化

最終的に、レーザー光源とカソード材料との相互作用まで上述の(1)(2)を把握した上で進めなければ、フォトカソードの高度利用も進展しない。しかし、それぞれ独立に研究されており、総合的な観点で両者を解決する方法の提案や研究の事例が世界的にない。

レーザーのコヒーレント性に着目し、カソード面に垂直な高強度レーザー電場(Z偏光)の生成により、仕事関数を低減する方法を世界で初めて本研究代表者が提案した。ラジアル偏光を集光することでZ偏光が得られる。小型のフェムト秒レーザーオシレーターでも得られる1GV/mのZ偏極電場でカソードの量子効率がショットキー効果により約1~2eV下がるため、赤外レーザーでも長寿命の金属カソードが使用可能になる。また、Z偏極電場強度を任意に制御し、カソードの実効的な仕事関数をレーザー光子エネルギーに合わせ込み、熱エミッタンスを極小化できる。以上のことから、コンパクトな光源で、GHzのCW運転可能な超高輝度電子源の実現が期待される。

2. 研究の目的

(1)カソード面に垂直なZ偏光レーザー電場を実現するための光学系を製作する。直線偏光の入射レーザーをラジアル偏光からアジマス偏光へ自由に変換できる分割波長板をTi:Saレーザーの3倍高調波(264nm)で実現する。

(2)金属フォトカソードをカートリッジ型カソード交換方式のRF電子銃に組み込んで実際の光電子発生実験を行う。カソード面に垂直な高強度電場~GV/mを(1)のラジアル偏光レーザーの集光で実現する。それにはカソード面の反射率が使用波長で低い材料を選ばなければ、カソード面に垂直なZ成分電場が打ち消されてしまう。波長264nmで銅カソードは鏡面に磨いたものでも反射率25%であるため、まずは銅カソードでの量子効率の

Z偏極電場強度依存性の有無を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)分割波長板(264nm用)に入射するレーザー偏光軸を半波長板で90°回転させ、ラジアル偏光からアジマス偏光に変化することを偏光モード強度分布から確認する。

(2)半波長板を回転させ、カソード面上のZ偏光強度をゼロから最大まで連続的に変化させることで、光電子発生の量子効率の増減からZ偏光電子源の実証試験をする。具体的には、1セット12個の銅カソードをカートリッジ式RF電子銃に組み込んで光電子発生実験をする(図1)。この方法により多光子吸収と区別し、Z偏光(Z偏極電場)によるショットキー効果だけの計測が可能である。

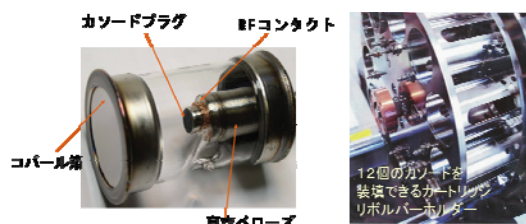


図1 カートリッジ式RF電子銃への装填装置

4. 研究成果

(1)図2に示すような分割波長板(264nm用)を世界で初めて製作した。入射するレーザー偏光軸の回転によりラジアル偏光からアジマス偏光に連続的に変化することを確認し、偏光ビームスプリッターを用いて評価した。結果として、設計通りの性能を確認した。

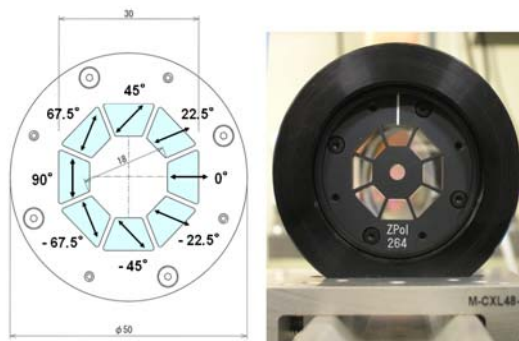


図2 ホロー・レーザー入射用264nmラジアル偏光素子

(2)ラジアル偏光をカソード面に集光するとZ偏光強度が最大になり、逆にアジマス偏光を集光するとゼロになることを利用し、カソ

一ド面上に誘起されるZ偏光レーザ電場強度を連続的に変化させ、変調させる装置を図3に示すような原理で実現した。

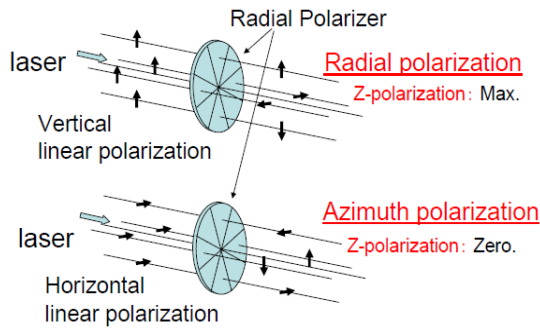


図3 ラジアル偏光とアジマス偏光の切替え原理

光電子発生実験をカートリッジ式カソード方式 RF 電子銃に組み込んだ銅カソードを用いて、Z 偏光強度変調と関連した光電子発生量子効率 (QE) の増減を確認することで再現性の確認をした。図4に実験結果を示す。

ショットキー効果の検証

実験結果

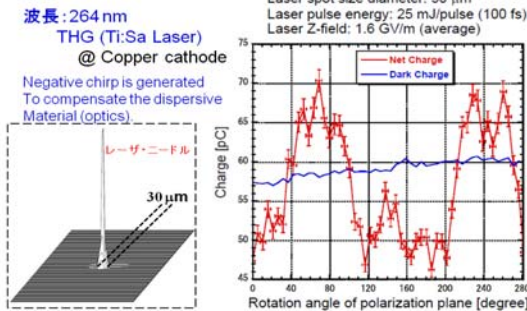


図4 Z 偏光強度変調で増減する量子効率(QE)の確認

(3) 本実験結果から光電子放出の諸過程に関して考察した。この実験でアジマス偏光をカソードに集光した時に得られる QE は、通常のフォトカソードの垂直入射に相当する。これは図5の過程Aのみになる。ラジアル偏光の場合には過程A, A', Bが含まれる。過程C, Dについては、本実験条件 (1.6 GV/m) のショットキー効果で 1.5 eV 下がった真空準位を頂点とする三角ポテンシャル障壁のトンネル確率を計算 (WKB 近似) した結果から、 10^9 程度で無視できることが分かった。

Z偏光電子銃の電子放出過程 (金属+UV)

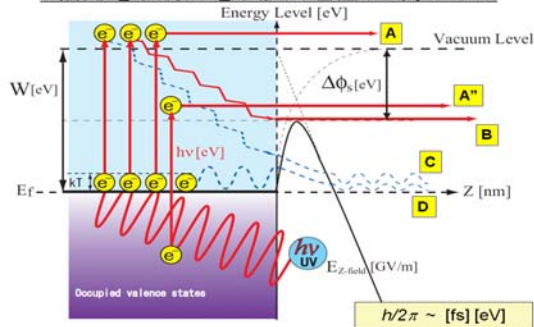


図5 Z 偏光レーザ照射による光電子放出過程

(4) 上記の光電子放出過程に関する考察から、WKB 近似で計算すると、トンネル確率が 0.1 になる条件は、銅で 5.0 GV/m、AlGaAs で 2.5 GV/m、GaAs で 3.5 GV/m と分かった。実際に、トンネル効果が Z 偏光レーザ電場で起こるかをトンネル確率が金属に比して高い GaAs 型半導体を用いて実証する必要がある。スピン偏極電子銃では、スピン偏極度を損なうことなく、伝導帯に励起した電子を真空中に取り出すために、伝導帯付近まで真空準位を押し下げてやる必要がある。具体的には、円偏光レーザで GaAs 半導体結晶内でのスピン偏極電子の励起 (波長 : 780 nm) と、フェムト秒パルスレーザ光源 (中赤外波長 30 μm) で現実的な 3~4 GV/m の Z 偏極電場を利用し、高いスピン偏極度の電子ビームを生成する。この方法によれば、低真空下での耐久性に問題のある NEA(Negative Electron Affinity)表面 (準動的な界面) が必要ないため、世界で初めて RF 電子銃でスピン偏極電子源が実現することが期待される。このスピン偏極 RF 電子銃は、背面照射方式とカソード材料の設計まで含めて特許出願をした。

Z偏光電子銃のスピン偏極電子放出過程

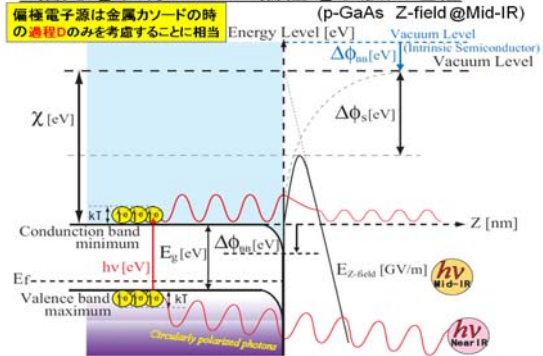


図6 Z 偏光電子銃のスピン偏極電子源への応用

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① 富澤宏光、高輝度光陰極電子銃を実現する先端レーザ技術、Journal of the Vacuum Society of Japan、査読有、in press (2011).

② 富澤宏光、Advanced metaheuristic algorithms for laser optimization in optical accelerator technologies、Radiation Physics and Chemistry、査読有、in press (Available on line 5 March 2011).

[学会発表] (計 9 件)

① 富澤宏光、Z 偏光レーザ強電場を利用した NEA 面を用いないスピン偏極電子源の研究開発、日本物理学会 第 66 回年次大会、平成 23 年 3 月 25 日、新潟大学 五十嵐キャンパス (新潟県) .

② 富澤宏光、Z偏光レーザ強電場を利用した
新型電子銃の研究開発、第8回高輝度・RF電子
銃研究会、平成23年1月12日、広島大学 東広
島キャンパス (広島県)。

③ 富澤宏光、水野明彦、出羽英紀、谷内努、花木
博文、First emission of novel photocathode gun
gated by Laser-induced Schottky effect、The 32nd
International FEL Conference、平成22年8月2
6日、Malmo (Sweden)。

④ 富澤宏光、Strategy of metaheuristics algo-
rithms for laser optimization、The 10th International
School and Symposium on Synchrotron Radiation
in Natural Science、平成22年6月10日、
Szkarska Poreba (Poland)。

⑤ 富澤宏光、水野明彦、出羽英紀、谷内努、花木
博文、First Emission of Novel Photocathode Gu
n Gated by Z-polarized Laser Pulse、The 1st
International Particle Accelerator Conference、平
成22年5月26日、Kyoto (Japan)。

⑥ 富澤宏光、Advanced laser pulse shaping
(invited plenary talk)、Joint ICFA Advanced
Accelerator and Beam Dynamics Workshop、The
Physics and Applications of High Brightness
Electron Beams 2009、平成21年11月17日、
Maui, Hawaii (USA)。

⑦ 富澤宏光、Laser-induced Z-field emission for
the application of polarized electron source、The
3rd workshop of photocathode physics、平成21
年10月2日、名古屋大学 (愛知県)。

⑧ 富澤宏光、Alternative scheme instead of NE
A surface for polarized electron source、TILCO
9- Joint AVFA Physics and Detector Worksho
p and GDE Meeting on International Linear Co
llider、平成21年4月19日、国際会議場 エポカ
ルつくば (茨城県)。

⑨ 富澤宏光、水野明彦、出羽英紀、谷内努、花木
博文、Review of Advanced Laser Technologies
for Photocathode High-Brightness Guns (invited
talk)、XXIV Linear Accelerator Conference
(LINAC08)、平成20年10月3日、Victoria
(Canada)。

〔産業財産権〕

○出願状況 (計4件)

名称：軸対称偏光ビーム変換素子
発明者：富澤宏光、小林実
権利者：(独) 理化学研究所、(株) ナノフォトン
種類：特願

番号：特願 2010-243071
出願年月日：平成22年10月29日
国内外の別：国内

名称：格段がモジュール化された多段増幅式
レーザーシステムの自動最適化システム
発明者：富澤宏光、児島孝則
権利者：(財) 高輝度光科学研究センター、
(株) 光フィジックス研究所

種類：特願
番号：特願 2010-81135
出願年月日：平成22年3月31日
国内外の別：国内

名称：偏極電子銃、偏極電子線の発生方法、
電子銃の評価方法、及び逆電子分光方法
発明者：富澤宏光、西谷智博
権利者：(財) 高輝度光科学研究センター、
(独) 理化学研究所

種類：特願
番号：特願 2009-063992
出願年月日：平成21年3月17日
国内外の別：国内、PCT 外国出願中

名称：電子銃、電子顕微鏡、及び電子発生方法
発明者：富澤宏光
権利者：(財) 高輝度光科学研究センター、
種類：特願
番号：特願 2008-175843
出願年月日：平成20年7月4日
国内外の別：国内

〔その他〕
受賞等

名称：第11回高エネルギー加速器科学奨励会
西川賞

受賞者：富澤宏光
受賞年月日：平成22年3月3日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富澤 宏光 (TOMIZAWA HIROMITSU)
財団法人 高輝度光科学研究センター
加速器部門 副主幹研究員
研究者番号：40344395

(2) 研究分担者

出羽 英紀 (DEWA HIDEKI)
財団法人 高輝度光科学研究センター
加速器部門 副主幹研究員
研究者番号：20360836

谷内 努 (TANIUCHI TSUTOMU)
財団法人 高輝度光科学研究センター
加速器部門 副主幹研究員

研究者番号：60360822

水野 明彦 (MIZUNO AKIHIKO)
財団法人 高輝度光科学研究センター
加速器部門 副主幹研究員
研究者番号：30360829