

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13412

研究課題名(和文) 小型高出力テラヘルツ光源のための基本波スミスパーセル自由電子レーザーの開発

研究課題名(英文) Development of Smith Purcell FEL at fundamental wavelength for a compact THz light source

研究代表者

西森 信行(Nishimori, Nobuyuki)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：60354908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はカスケードスミスパーセル自由電子レーザー(SP-FEL)による、エバネッセント基本波長でのコヒーレントスミスパーセル(SP)放射の実証と、高出力小型テラヘルツ(THz)光源開発を目的とした。本小型光源は電子源とスミスパーセル放射光用回折格子装置で構成される。本研究で、SP-FELに必要な4.3mAの大電流ビーム生成に150kVの高電圧で成功し、SP放射光用回折格子装置整備を完了した。しかし、大電流ビーム試験中に真空トラブルが発生し、実験装置が1Paの空気に晒された。電子銃高電圧性能を回復させたが、再ビーム試験に至らなかった。道具立ては既に揃っており今後もSP-FEL実験を続ける。

研究成果の概要(英文)：This work aims at demonstrating a Smith-Purcell free electron laser (FEL) at evanescent wavelength for a high power compact radiation source at THz wavelength. The compact THz source consists of an electron gun and a grating for Smith Purcell radiation. We successfully delivered 4.3 mA beam at 150 kV which will satisfy electron beam performance necessary for FEL amplification and prepared a vacuum chamber consisting of a grating on a linear motion and a THz diode detector with a focusing horn and a mesh filter with 10% band width. We however encountered a vacuum trouble where the gun system was exposed to 1 Pa air. We could not recover every system within limited time schedule. We will continue our Smith-Purcell FEL experiment.

研究分野：数物系科学

キーワード：自由電子レーザー スミスパーセル放射 光陰極直流電子銃

1. 研究開始当初の背景

スミパーセル(SP)放射は、電子ビームと回折格子の組み合わせで任意波長の放射光を発生できる。1998年には、超放射的なSP放射出力の増加が観測された。この発見により、小型高出力光源としてSP放射は注目を集め、理論的に盛んに研究された。Brauが2004年に提唱したスミパーセル自由電子レーザー(SP-FEL)理論は、SP超放射を説明すると共に2009年には新たな実験で追証された。SP-FEL理論によると、電子ビームが回折格子表面に励起するエバネッセント波が電子ビームと相互作用し、波長 $\lambda$ 毎に電子バンチを形成する。

バンチした電子ビームによるSP放射は、波長 $\lambda_{SP}=L(1/\beta - \cos\theta)$ が $\lambda$ の整数分の1に一致する角度でコヒーレントとなる(図1(上))。コヒーレント放射強度は基本波が最も強く、高調波では次数の増加と共に一桁程度づつ減少する。残念なことに、高調波に比べて一桁以上の高出力化が見込まれるエバネッセント基本波でのコヒーレントSP放射は理論上不可能である。

2. 研究の目的

本研究ではエバネッセント波長でのSP-FEL実現に挑戦するため、周期長を変えた2つの回折格子を繋ぎ、前半部でエバネッセント基本波での電子バンチ形成、後半部で基本波でのコヒーレントSP放射というカスケードSP-FELを提案し、小型高出力テラヘルツ光源用の基本波SP-FEL開発を目的とした。テラヘルツ光源として用いるには、前段部でテラヘルツ領域(300 $\mu\text{m}$ 程度)のエバネッセント波を得る必要がある。過去のSP-FEL

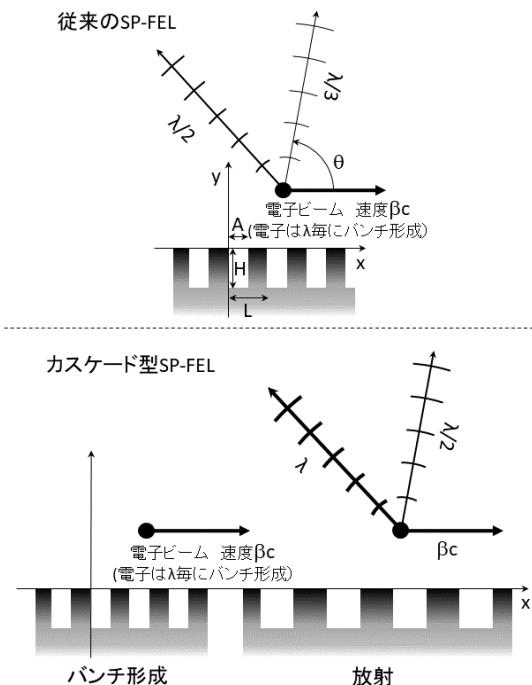


図1: 従来のSP-FEL(上)と本研究目的のカスケード型SP-FEL(下)

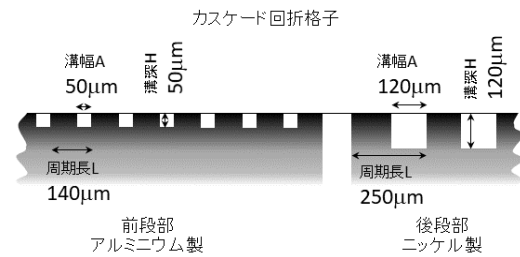


図2: カスケード回折格子パラメータ。

のエバネッセント波は700 $\mu\text{m}$ 、70mmであり、SP-FELの短波長化も課題である。

図2に本研究で提案する基本波SP-FELのためのカスケード回折格子パラメータを示す。カスケード前段部について、SP-FEL理論から求めたエバネッセント波長、及びSP波長を電子銃電圧の関数として図3に示す。エバネッセント波長はSP波長範囲外のやや長波長側にある。

SP波長は電子速度 $\beta$ に反比例し、電子銃電圧が150kVを下回ると急速に長くなる。テラヘルツ波長領域のエバネッセント波のためには、過去のSP-FELで例のない150kV以上の電子銃電圧が望ましいため、本研究では250kV直流光陰極電子銃を用いる。

本研究は、基本波SP-FEL開発に主眼を置いているが、電子銃の高性能化によるSP放射の高出力化という側面もある。平均電流は過去の例では1mA以下であったが、我々の電子銃は50mAまで生成できる。高電圧・低エミッタンスビームを用いるためそのサイズを半分以下にでき、ビームを回折格子に近づけることができる。SP放射光パワーはビームと回折格子間距離に反比例して指数関数的に増加する。電子銃性能だけで、従来のSP-FEL光源に比べて二桁程度の高出力化が見込まれる。

3. 研究の方法

本研究では、カスケードSP-FELにより、エバネッセント基本波長でのコヒーレントSP放射を実証し、高出力小型テラヘルツ光源を開発する。次の3項目実施を目標とした。

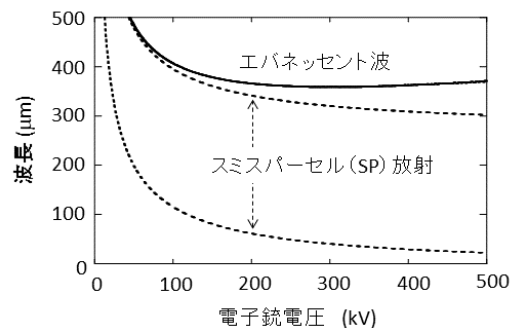


図3: 電子銃電圧を関数としたエバネッセント波長、SP波長。回折格子パラメータは図2の前段部。

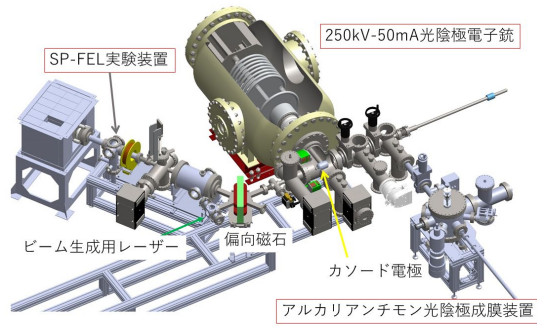


図 4: 電子銃配置図。

- (1) 250kV 光陰極電子銃から、SP 放射に適した電子ビームを生成する。
- (2) 電子ビームを回折格子とテラヘルツ検出器からなる測定システムに導き SP-FEL 測定を行う。テラヘルツ領域エバネッセント波の高調波で、コヒーレント SP 放射が得られることを確認する。
- (3) カスケード回折格子を用いて SP-FEL 測定を行い、テラヘルツ領域エバネッセント基本波長で高出力コヒーレント SP 放射が得られることを実証する。

250kV 光陰極電子銃、及び本研究で開発を進めた装置群を図 4 に示す。本電子銃は次世代放射光源用としてガリウムヒ素半導体を光陰極として開発したものである。本研究では、光陰極の長寿命化、大電流化の観点からアルカリ光陰極を用いる。高電圧電源は 250kV-50mA の最大能力を持つ。本研究は、これらの資源を有効活用しながら進める。

図 5 に実験セットアップを示す。SP 放射光強度は、電子ビームと回折格子間距離の関数として指数関数的に増加し、ビームをできるだけ格子面に近づけることが重要である。そこで、回折格子位置でのビームサイズ測定を行う。次に前段部回折格子を単独で用いて SP-FEL 測定を行う。ビーム電流 1mA、サイズ  $24\mu\text{m}$  を仮定し、SP-FEL 理論と図 2 の回折格子前段部パラメータから求めたエバネッセント波の成長ゲイン、格子材質の磁気抵抗に

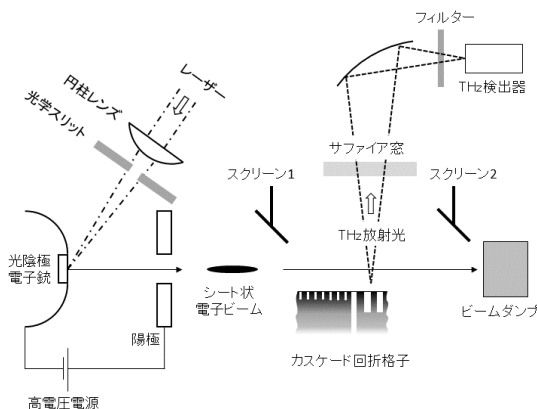


図 5: SP-FEL 実験セットアップ。

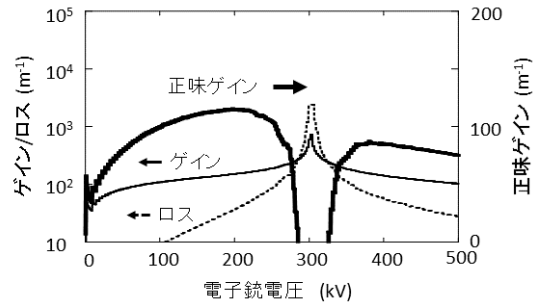


図 6: カスケード SP-FEL の前段部のエバネッセント波のゲイン、ロス、正味ゲイン (ゲイン - ロス) を電子銃電圧関数としてプロット。

よる減衰 (ロス) 正味ゲイン (ゲイン - ロス) を図 6 に示す。本研究では正味ゲインが最大となる 200kV を SP-FEL の電子銃電圧として設定した。図 3 から 200kV のエバネッセント波長は 0.82THz に相当する  $\lambda=366\mu\text{m}$  で、SP 波長の範囲は 62 -  $341\mu\text{m}$  である。

最後に、カスケード回折格子を用いてテラヘルツ領域エバネッセント基本波長で高出力コヒーレント SP 放射を実証する。

#### 4. 研究成果

##### (1) アルカリ光陰極成膜装置の開発

光陰極は厚さ 0.5mm のシリコンウェハを基板とし、モリブデン製のパックにインジウムで接着されている。MBE (Molecular Beam Epitaxy) 装置を改造してアルカリ光陰極成膜装置を構築した。99.9999%純度のアンチモン粒 (SB-020100:ニラコ) をモリブデン製ポートに乗せ加熱しシリコン基板に蒸着した。セシウム源 (AS-6-Cs-415-V:アルパテック) は基板から 3cm 離れたところに設置した。可動式膜厚計 (CRTS-4U:アルバック) を基板の位置にセットし、アンチモンとセシウムの膜厚を測定した。装置の真空度は  $5 \times 10^{-9}\text{Pa}$  を実現している。

成膜手順は次の通りである。シリコン基板

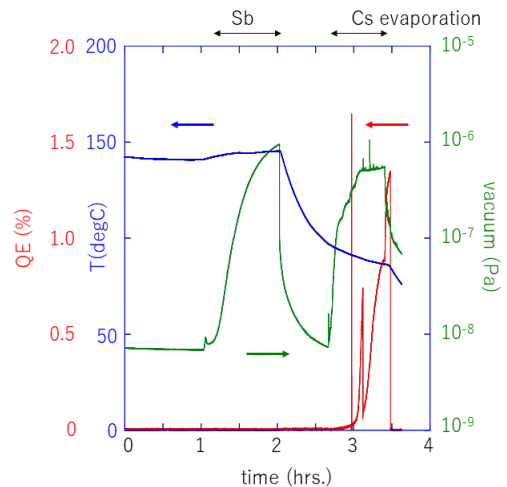


図 7: アルカリアンチモン光陰極成膜。QE (赤) パック温度 (青) 真空度 (緑)。

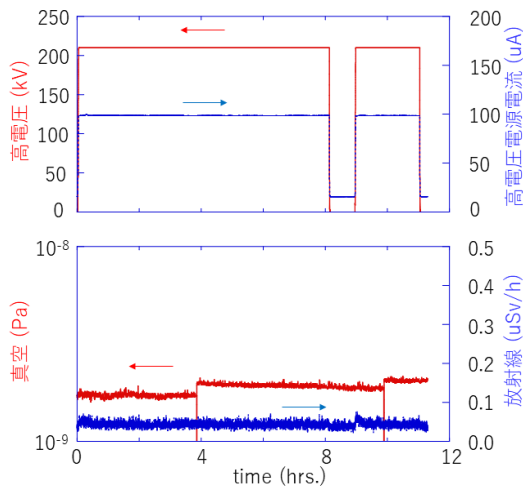


図 8: 電子銃高電圧保持試験の様子。高電圧（上赤）、高電圧電源電流（上青）、真空（下赤）、放射線（下青）

を 550 で 2 時間ヒートクリーニングし、室温まで冷却した。パックが固定されているステンレス製のパックホルダーには熱電対が取り付けられ、温度モニターとして利用する。パック表面温度とモニターの関係は校正済みである。アンチモンとセシウムの蒸着は、加熱洗浄とは別の日に行った。基板加熱温度を 170 とし、厚さ 40nm のアンチモンを蒸着した。その後、基板表面にレーザー照射し、発生電子（光電流）を測定しながらセシウムを蒸着した。用いたレーザーは波長 532nm、4.6mW のレーザーである。

図 7 はパックホルダーのすぐ近くにあるファラディカップで測定した光電流から求めた QE、パック温度、真空度である。ファラディカップは基板に対し +40V の電位を持つ。セシウムの蒸着終了直前に 1.0% の QE を記録し、終了後温度を下げ始めると急速に QE が上昇した。翌々日、室温条件下で測定した QE は 2.7% であった。

### (2) 250kV 光陰極電子銃の開発

光陰極直流電子銃を保有している。図 4 に示すように 250kV-50mA のコッククロフト電源、SF<sub>6</sub> 絶縁ガスタンク、高電圧真空容器、GaAs 光陰極準備装置、ソレノイドやレーザー導入真空容器で構成されている。マルチアルカリ光陰極準備システムを、GaAs 準備容器に接続し、トランスファーロードを用いて光陰極を輸送可能とした。

図 8 にカソード電極とそれを支えるサポートロッド電極をインストールした後の電子銃高電圧保持試験結果を示す。210kV で 8 時間以上、無放電という高電圧性能を示した。本試験に先立ち、延べ 18 時間の高電圧コンディショニングを行い、暗電流発生なく 230kV まで高電圧印加することができた。これらの高電圧印加試験では、ステンレス製ダミーパックをカソード電極先端に装着した。電子銃は 2 × 10<sup>-9</sup> Pa の極高真空を達成した。

### (3) 下流ビームラインの整備

ビーム生成試験のため、電子銃下流ビームラインを整備した。ビーム生成用レーザーは電子銃下流の偏向磁石真空容器のビューポートから打ち込む。光陰極で反射したレーザーは同じビューポートから取り出す。偏向磁石下流には差動排気容器を設置し、2 × 10<sup>-9</sup> Pa の極高真空である電子銃とビームダンプを真空中に切り離す役割を持たせた。差動排気直後に設置された YAG スクリーンを用いてビームプロファイルを観測した。プロファイルモニター下流にはビームを絞るためのソレノイド電磁石を設置した。また、ビームダンプは 500kV-10mA ビーム用に製作されたものを流用した。大電流ビームを扱うため、ビームダンプは水冷とし、ビームエキスパンダーと、ビームダンプを覆う鉛遮蔽を設置した。mA 級の大電流ビーム試験のための 3W レーザーを準備した。

### (4) ビーム生成試験

YAG スクリーンで最初のビームプロファイルを得るまでにやや手間取った。原因は電磁石のリモートコントロール操作に不具合が生じたからである。その間、偏向電磁石に磁場が印加されず、微少ではあるが、電子ビームがレーザー導入用の窓を直撃した。その影響でビーム生成中に電子銃放電が 2 回発生し、その後電圧とともに指数関数的に増加する暗電流が電子銃から発生した。電子ビームが窓を直接叩くことで発生した粉塵が電子銃に逆流し、カソード電極に付着して、暗電流発生源となったと考えられる。以降、暗電流による真空度の劣化が少ない 150kV においてビーム生成試験を行うことにした。

光陰極成膜 1 週間後のビーム生成試験で、波長 532nm レーザー 51μW に対し、ビームダンプ電流は 1.26μA であった。光陰極の QE は 5.8% と推定された。QE=5.8% は市販の光電子増倍管の Cs<sub>3</sub>Sb 光電面の QE と遜色ない値であり、成膜装置の健全性が示された。光陰極成膜の 4.5 ヶ月後に行ったビーム試験でも 5% の QE を示し、光陰極の暗寿命は年オーダー

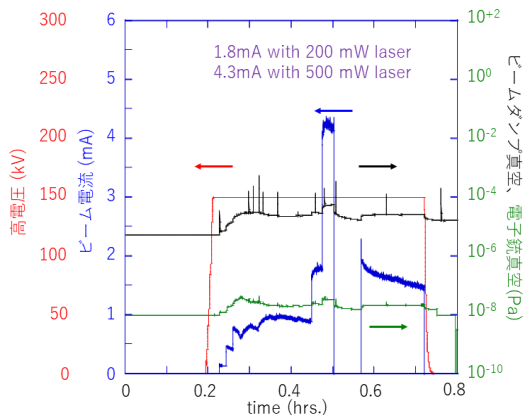


図 9: 低電流ビーム生成試験。高電圧（赤）、ビーム電流（青）、真空度（緑）、放射線（紫）

と見込まれる。

図 9 に最大出力 3W レーザーを用いた電子ビーム生成試験の結果を示す。電圧は 150kV (赤線) 青線で示す電流の最大値は約 4.3mA であり、この時のレーザーパワーは 500mW であった。緑線で示す電子銃の真空度は  $1 \times 10^{-8}$ Pa になっているが、これは下流ビームラインの真空度悪化に起因する。電子銃のみの真空度は  $2 \times 10^{-9}$ Pa のままであった。大電流試験時は光陰極成膜の 7 ヶ月後に行ったもので、QE は 2%程度に減った。QE の劣化が暗寿命によるものか、ビームラインの真空度が悪化したことによるものかは未調査である。

4.3mA ビーム生成に成功後、電子銃実験室の放射線モニタ値を減らすようにビーム軌道調整を行った。すると、電子銃の真空度が急に  $10^{-9}$ Pa 台から 1Pa に劣化し、インターロックが働いた。詳しく調査したところ、電子銃アノード電極直後のペローズに穴が開いていることがわかった。ビーム調整前後でビームダンプ電流に 0.7mA もの違いがあったことが判明した。0.7mA のビームがダンプまで運ばれず、どこかで失われていた可能性がある。かなりの量のビームがペローズに当たり、穴があいたものと思われる。

#### (5) 電子銃真空システムの再整備

電子銃本体の高電圧性能を回復するため真空作業を行った。電極表面の拭き取りも併せて行い、運転電圧が 150kV 以下に制限されていた原因と予想した電極表面に付着した微細粉塵除去に取り組んだ。ベーキング後に行った高電圧コンディショニングの様子を図 10 に示す。4 時間のコンディショニングで 200kV に達していることがわかる。図 8 の試験までに 18 時間のコンディショニングを要したことから、同様の時間をかければ 200kV 運転可能である。電極拭き取りにより、運転電圧が回復することも確認できた。

1Pa の空気に晒されたアルカリ光陰極の量子効率が悪化したため、再成膜を行った。0.5%程度まで量子効率は回復したが、短寿命

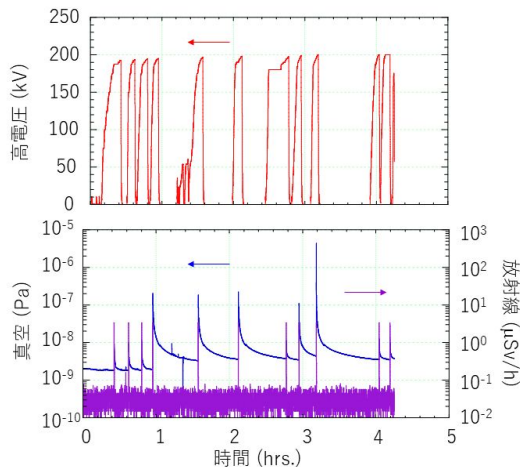


図 10: 高電圧コンディショニング。高電圧 (赤)、真空度 (青)、放射線 (紫)。

であったため、シリコン基板の交換から再開する必要が判明した。

ビームラインにはビーム位置モニターを追加し、真空トラブルの再発防止を図った。ビームラインのベーキング、非蒸発型ゲッターポンプの活性化は未実施である。

#### (6) スミスパーセル試験装置

スミスパーセル実験の準備として、図 2 の前段部回折格子を直線導入機のホルダーに取り付け、実験容器にインストールした。ホルダーには回折格子上でのビーム位置確認用の蛍光スクリーンが設置されており、直線導入機の調整でスクリーンと回折格子位置を切り替えられるようになっている。回折格子とビーム軸に対して 90 度の位置に石英窓を設置し、テラヘルツ光を外に取り出す。

テラヘルツ検出器として WR1.0ZBD を整備し、0.75~1.1THz の波長を検出できるようにした。専用の集光ホーンを準備しており、微小テラヘルツ光も検出可能である。中心波長 1.022THz、バンド幅 9.8% のメッシュフィルターを整備し特定波長のテラヘルツ光検出が可能となるよう準備を進めた。

SP-FEL 実験に必要なビーム電流は得られたが、SP-FEL 実験前に、真空トラブルが発生した。トラブル回復を完了させるには、数多くの作業を重ねる必要があったため、SP-FEL 実験は未実施である。今後、残りの作業を行い、SP-FEL 実験を行う予定である。その後、図 2 のカスケード型回折格子を準備し、基本波 SP-FEL 実験を行う。

#### 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 4 件)

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、アルカリアンチモン光陰極高電圧電子銃から mA ビーム生成、査読無、第 14 回加速器学会年会論文集 (2017) 141-144

[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEOM/WEOM08.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEOM/WEOM08.pdf)

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、アルカリアンチモン光陰極高電圧電子銃からのビーム生成、査読無、第 13 回加速器学会年会論文集 (2016) 464-467

[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP047.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP047.pdf)

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、250kV 大電流光陰極電子銃の開発、査読無、第 12 回加速器学会年会論文集 (2015) 508-510

[www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEPO/WEPO36.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEPO/WEPO36.pdf)

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、Development of a Multialkali Photocathode Preparation System、査読無、Proceedings of the 56<sup>th</sup> ICFA

Advanced Beam Dynamics Workshop on  
Energy Recovery Linacs ERL2015 (2015)  
184-188  
[http://epaper.kek.jp/ERL2015/papers/  
thpth1073.pdf](http://epaper.kek.jp/ERL2015/papers/thpth1073.pdf)

[学会発表](計 9件)

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、  
小型スミパーセル FEL 実験のための光  
陰極電子銃開発、物理学会第 73 回年次大  
会、2018 年

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、  
Development of a multialkali  
photocathode DC gun for a  
Smith-Purcell THz FEL、The 2<sup>nd</sup>  
International Workshop on CSR and Free  
Electron Lasers from Ultra Short  
Electron Beam、2017 年

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、  
アルカリアンチモン光陰極高電圧電子銃  
から mA ビーム生成、第 14 回加速器学会  
年会、2017 年

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、  
Development of a Multialkali  
Photocathode Preparation System、The  
59<sup>th</sup> ICFA Advanced Beam dynamics  
Workshop on Energy Recovery Linacs、  
2017 年

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、  
スミパーセル FEL 実験のための光陰極  
電子銃の開発、物理学会第 72 回年次大会、  
2017 年

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、  
アルカリアンチモン光陰極高電圧電子銃か  
らのビーム生成、第 13 回加速器学会年会、  
2016 年

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、  
大電流光陰極電子銃を用いたスミパー  
セル放射光源、Beam Physics 2015、2015  
年

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、  
250kV 大電流光陰極電子銃の開発、第 12  
回加速器学会年会、2015 年

西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一、  
Development of a Multialkali  
Photocathode Preparation System、The  
56<sup>th</sup> ICFA Advanced Beam Dynamics  
Workshop on Energy Recovery Linacs、  
2015 年

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西森 信行 (NISHIMORI Nobuyuki)  
東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：60354908

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

永井 良治 (NAGAI Ryoji)  
国立研究開発法人量子科学技術研究開発  
機構・高崎量子応用研究所・東海量子ビー  
ム応用研究センター・上席研究員

研究者番号：40354906

羽島 良一 (HAJIMA Ryoichi)  
国立研究開発法人量子科学技術研究開発  
機構・高崎量子応用研究所・東海量子ビー  
ム応用研究センター・上席研究員

研究者番号：30218432

### (4) 研究協力者

( )