

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06296

研究課題名(和文) プレバunch電子線を用いたスミスパーセル超放射

研究課題名(英文) Smith-Purcell superradiat using pre-bunched electron beam

研究代表者

根尾 陽一郎 (NEO, YOICHIRO)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号：50312674

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)： Smith-Purcell超放射を誘導する高速変調電子ビームを形成する為、高量子効率・高速応答のホトカソードの実現を目標として本研究を実施した。

ホトカソードにバイアルカリ光電面(K-Cs-Sb)を選択しレーザーパルス列による光励起により高速変調ビーム形成を行う。光電面形成過程を観察するため、in-situで透過光スペクトル及び量子効率文王特性を評価した。K-Cs-Sb光電面は、K-Sbを行った後に、K-Cs-Sb化を行う。今回新たにK-Sb形成過程には2段階の量子効率の変化がある事が分かった。またK供給量に最適条件がある事を明らかとし、10%を超える量子効率の光電面形成を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案するプレバunch方式によるSmith-Purcell超放射は、従来の超放射とは異なり電子パルス列を入射電流に用いる。これにより超放射に至る閾値電流密度を著しく低減可能であり、これまで計算による予測のみであった超放射が比較的容易に実現可能となる。これによりサブミリ波帯・テラヘルツ帯における高出力、周波数可変、可干渉な光源となる。この波及効果は第5世代以降の大容量情報通信のみならずあらゆる高周波デバイスの高機能化に直結する重要なものである。

また本研究で明らかとしたバイアルカリ光電面の形成過程の詳細な物性は、光電子増倍管など光電面を利用するデバイス高機能化に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The photocathode with high quantum efficiency and fast response time had been studied for Smith-Purcell superradiant emission. Bi-alkali photocathode was adopted and its transmission spectra and quantum efficiency as a function of wave length were measured. we had found that there were two steps in K-Sb alloying process. The deposition of K was one of crucial condition for ideal K-Cs-Sb photocathode. As a result, K-Cs-Sb pthocathode wiht over 10% quantum efficiency was successfully fabricated.

研究分野：真空エレクトロニクス

キーワード：アルカリ光電面 バイアルカリ光電面 スミス・パーセル超放射

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 ( 共通 )

## 1. 研究開始当初の背景

サブミリ波帯以上の波長帯の高出力源は、医療分野(生体組織の機能診断,無侵襲医療診断,薬物診断),通信分野(超高速情報通信),安全衛生(サブミリ波スキャナー)など各分野からの要求があり、急務となっている。Smith-Purcell Superradiant(SP超放射)は理論計算によりその可能性が示されているが未だ実現に至っていない高周波デバイスの動作原理である。SP超放射とは、高出力化、コヒーレント放射、広帯域化、カットオフ周波数に制限を受けない、サブミリ波帯以上の波長域の発振が可能などの様々な優位性をもつ究極の真空電子高周波デバイスになりえると期待される。また構造が単純で機械加工による律束を受けない為にサブミリ波帯の発振器として期待されている。しかし計算ではSP超放射に必要な電流密度は $50 \sim 100 \text{ A/cm}^2$ 程度の非常に高い閾値がある事や1T程度の外部磁場が必須となる事が示され、克服困難な課題であった。研究代表者はこれまで自然放射SPの開発を行い、紫外線から近赤外にわたる観測に成功している。この知見より、高効率・高出力化が可能でプレバンチ電子線を用いたSP超放射の提案に至った。本手法では閾値電流密度を無視でき、世界初のSP超放射の実証実験が可能であると考えられる。プレバンチ電子線による高周波真空デバイスは未だ報告がなく学術的にも大きな意味を持つ。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、SP超放射を世界に先駆けて実現する為の要素技術、アルカリ光電面の形成過程の詳細な分析及び最適な形成プロセス確率及びプレバンチ電子ビームの形成である。SP超放射光に必要なプレバンチ電子ビーム形成技術は加速器等を用いた巨大な装置以外では報告がない。よってプレバンチ電子線形成は、持ち運びが可能なサイズで実用化することを重要視した。またSP超放射を考えた場合、裏面入射の表面からの電子放出が望ましい。これら仕様を満たす方法として、アルカリ金属光電面のピコ秒レーザー励起を選択した。アルカリ光電面形成過程での物性評価、それを用いたプレバンチ電子ビーム形成を目的とした。

## 3. 研究の方法

プレバンチ電子線形成には、ピコ秒レーザーパルス列で励起されたホットカソードが理想的である。計算によりSPRでコヒーレント効果を発現する為には、金属回折格子のピッチ1/4以下の空間にパルスを集群する必要がある事がわかった。例えば電子ビーム速度を光速比1/10、波長0.3cm(100GHz)を仮定した場合、0.75mm(25psec)以下に集群した電子パルス列を0.3cm(100psec)間隔で形成する必要がある。またSP超放射を考えた場合、光を裏面入射して表面からの電子放出が望ましい。これら仕様を実現するためにアルカリ金属光電面のパルスレーザー励起を選択した。第一にアルカリ光電面の形成過程の解析及びプロセスの確立を目指す。形成過程の物性評価として図1に示す装置を作製した。in-situで膜厚測定、分光量子効率測定、透過/吸収スペクトル分光、放出電流測定が可能となっている。光源には405nmレーザー、ハロゲンランプ、キセノンランプ分光光源、検出器には分光器、ホットダイオードが切り替え可能である。プレバンチ電子線形成には、ピコ秒レーザーからのパルスを光路差により複数分割遅延したパルストレインを形成

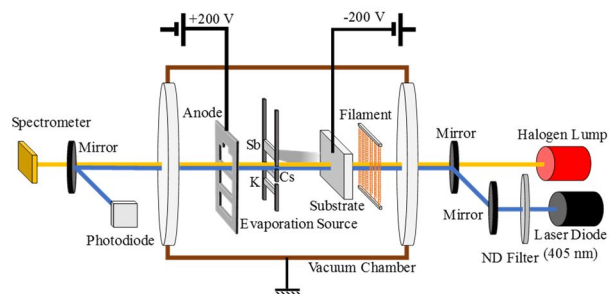


図1. アルカリ光電面形成装置

する。これをアルカリ金属光電面に裏面入射する事でプレバンチ電子線形成を実現する。

#### 4. 研究成果

##### バイアルカリ光電面の形成

プレバンチ電子ビーム形成時の励起光波長は Ti-サファイアレーザーの SHG を使用する為、400nm 程度に大きな量子効率を有するアルカリ光電面として、バイアルカリ(K-Cs-Sb)を選択した。バイアルカリ光電面の形成過程は Sb 膜堆積、K-Sb 合金化、K-Cs-Sb 合金化からなる。透過型アルカリ光電面では Sb 膜厚は 10nm が最適条件であった。続いての過程において、基板温度を 100 度 ~ 200 度で評価したところ、K-Sb 光電面の色及び透過スペクトルが異なる事が明らかとなった。700nm 以上の波長側の透過率の違いにあらわれた。これは K-Sb が立方晶と六方晶の構造を取りえる為である。K-Cs-Sb 形成には六方晶が適切である為、K-Sb 形成時の基板温度を 150 度と決定した。また K-Cs 形成途中に光励起電流が2回の上昇と下降を繰り返す事を新たに見出した。1回目では K-Sb と Sb の透過光スペクトルに変化はなく、2回目では可視光領域の吸収が大きくなった(図2参照)。また光電面の色により、理想的な K-Sb(六方晶)は2回目の変化で形成されている事が明らかとなった。続いて K-

Cs-Sb 光電面を形成し、透過特性、量子効率を評価したところ、2回目のピークで Cs 供給を開始した場合は、Cs による量子効率の増加が観測されなかった。これは K-Sb で半導体特性が現れたのちにさらに K が過剰に供給されていると考えられた。また1回目ピークでは、K 供給量が不足し Sb 金属の特性を残したままであり、K-Cs-Sb 光電面の量子効率は 1% 以下にとどまった。これらの結果から K 供給量には最適条件があると判断し K 供給停止をパラメーターとして実験を行った。この結果、2回目ピーク到達までに

必要な供給量の 2/3 程度で、その後形成する K-Sb-Cs の QE が 10%を超えることが分かった。裏面より安定化ハロゲンランプを入射し、分光特性を評価したところ、K-Sb 及び K-Cs-Sb 光電面が半導体特性である事が確認された。さらに分光波長ごとの放出電流より量子効率分光特性を評価したところ、禁制帯幅が 1.77eV、電子親和力が 0.3eV の光電面である事を明らかにした(図3参照)。

スミパーセル放射光に応用するために、長寿命化に

ついて評価を行った。最適な条件で形成したK-Cs-Sbを室温にして量子効率を測定したところ、1時間で1/10程度まで低下する問題がある事が分かった。この状態の透過特性を評価した結果、変化がないことが分かった。再度基板温度を上昇させたところ若干の改善が見られ、Cs供給をすると初期の状態まで回復した。これにより表面状態の変化によると考えられ、不純物の吸着、Cs脱離による電子親和力が増加と原因だと考えられる。

またプレバンチ電子ビーム形成に必要な、光遅延をスタックしたレーザーパルス列形成を完了した。

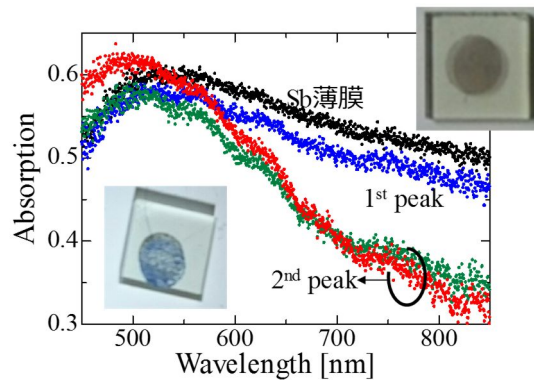


図 2. K-Cs 光電面の吸収分光の変化

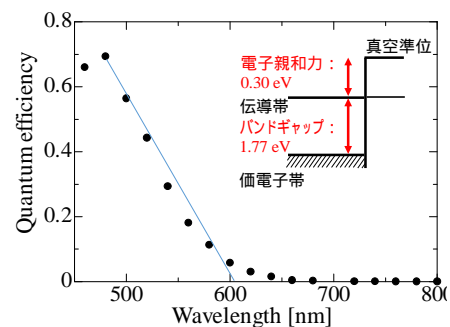


図 3. 分光量子効率とバンド図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 高橋 隼斗, 根尾 陽一郎, 細田 誠, 三村 秀典
2. 発表標題 バイアルカリ光電面の長寿命化
3. 学会等名 2018年第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋隼斗, 根尾陽一郎, 細田 誠, 三村秀典
2. 発表標題 アルカリ光電面を用いた超高速変調ビーム形成に関する基礎実験
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子デバイス研究会 電子管と真空ナノエレクトロニクス及びその評価技術
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takahashi, R. Yoshitake, Y. Neo, and H. Mimura
2. 発表標題 Bi-Alkali photocathode for a bunched electron beam
3. 学会等名 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉武亮, 高橋隼斗, 根尾陽一郎, 三村秀典
2. 発表標題 高速パルス形成の為のSb-Cs光電面に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会信学技報信学技報
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hayato Takahashi, Ryo Yoshitake, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura
2. 発表標題 Alkali photocathode for ultrafast response time electron bunch train formation
3. 学会等名 31st International Vacuum nanoelectronics conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光反射素子	発明者 根尾陽一郎, 富田誠, 松本貴裕	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018- 81467	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----