

Test of multibunch beam extraction from LaB₆ photocathode

K.Kanno^{1,A)}, I.Sato^{B)}, K.Hayakawa^{B)}, T.Tanaka^{B)}, Y.Hayakawa^{B)}, A.Mori^{B)}, K.Nogami^{B)}
T.Sakai^{A)}, K.Ishiwata^{A)}, K.Nakao^{A)}

^{A)} Graduate School of Nihon University,
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

Abstract

A photocathode RF gun for Free Electron Laser (FEL) system covering wavelength from 0.3 μ m to 0.8 μ m is being developed at LEBRA of Nihon University. FEL lasing in the short-wavelength region requires an electron beam with a long pulse duration due to a small amplification gain. Therefore, the photocathode RF gun needs to generate multibunch electron beam with a long macropulse duration and high micropulse repetition rate. Then LaB₆ which has long lifetime and small work function was experimented for generation long macropulse multibunch electron beam.

LaB₆によるマルチバンチ光電子発生試験

1. はじめに

自由電子レーザー、リニアコライダーや逆コンプトン散乱X線源のような非常に質の良い電子ビームが必要な装置の開発が活発である。そのような加速器の高度利用のための高輝度電子源として、RF電子銃の研究開発も活発に行われている。RF電子銃はDC電子銃に比べ高電界加速が可能のため、電子のエネルギーが相対論領域になるまでの時間が短い。従って、空間電荷による影響が少なくでき、低エミッタンス電子ビームを得ることが可能である。日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、すでに赤外自由電子レーザーの発振に成功し^[1]、現在では0.885~6.13 μ mにわたる発振波長領域を連続的に得ることに成功している。さらにLEBRAでは、0.3~0.8 μ mの紫外-可視領域自由電子レーザーの利用も目指しているが、この場合、現在よりさらに良質の電子ビームが必要になると考えられる。そこで、高周波電子銃の開発が検討されている。本施設で計画しているような、紫外-可視光領域の自由電子レーザーは利得が低いため、レーザーが飽和にいたるまでの時間が長く、長マクロパルス電子ビームが必要である。そのため本施設のリニアックは20 μ sと比較的長い値になっている。しかし、このパルス幅を熱陰極RF電子銃で実現しようとする、高周波電場の逆加速位相によるバックボンバードメントがおり、電子放出を不安定になり、マクロパルス幅を長くすることができないと考えられる。そこで、高出力短パルスレーザーによって陰極を照射して得られる光電子を利用する光陰極RF電子銃の開発を進めている。また、自由電子レーザーを用いた実験は長時間にわたるため、陰極寿命は十分に長くなければならない。

RF電子銃に使用できる光陰極材質は、銅などの寿命が長い純金属陰極やCs₂Teなどの量子効率が高いアルカリ系金属陰極などが使用されている。この二種類の陰極は様々な施設で開発、研究が実施されており成果を上げているが、純金属陰極では仕事関数が高いのでレーザーシステムに負担がかかり、アルカリ系金属では寿命が短すぎ、本施設で使用することは難しい。そこで、本施設ではLaB₆の仕事関数の低く、活性化が容易であるなどの優れた特長に着目し高輝度マルチバンチ電子ビーム発生用の陰極として検討している。

2. 要求性能

自由電子レーザーの利得はピーク電流に比例し、波長の二乗に比例する。従って紫外や可視光などの短波長の自由電子レーザーでは、赤外領域に比べ非常に利得が小さくなり、50A以上の大きなピーク電流が必要と考えられる。また、利得が小さくなると自由電子レーザーが飽和に達するまでの時間が長くなり、マクロパルス幅が長い電子ビームが必要となる。このように短波長FELは大電流・長マクロパルス電子ビームが必要である。LEBRAの短波長FEL計画は0.3~0.8 μ mの紫外-可視光領域でリニアックは20 μ sと長いマクロパルス幅で運転をしている。従って、LEBRAの紫外-可視光領域FELにはマクロパルス幅20 μ sの大電流、低エミッタンス電子ビームが必要で、つまり20 μ sのマルチバンチ電子ビームが必要となる。

¹ E-mail: tekkamen@lebra.nihon-u.ac.jp

3. LaB₆陰極の特徴

LaB₆は電子ビーム描画装置や電子顕微鏡用電子銃の熱陰極として用いられているが、DUKE大学の蓄積リング用の電子銃では光陰極として使用されている^[2]。酸化物について低い仕事関数を持ち、Nd:YAGレーザーの第三高調波（波長355nm）の一光子吸収による光電子励起が可能である。純金属の仕事関数は4~6eV程度で、Cs₂Teは3.6eVである。従って、Nd:YAGレーザーの場合、第四高調波（266nm）を照射する必要がある。この波長を得る際にさらにレーザーパワーが小さくなるので効率が悪い。また、活性化操作が酸化物や単原子層陰極陰極に比べて容易でありイオン衝撃や残留気体の影響も受けにくく、酸化物のように一旦活性化したあとで大気にさらしてしまうと、その後は使用できなくなるということはない。B₂O₃やLaBO₄など、表面の酸化物の蒸気圧がLaB₆に比べ高いので、1200°Cに加熱することで容易に除去が可能。従って常に高温にすると洗浄表面に近い状態が保てる。光陰極では熱電子放出を抑える必要があるのであまり高温にはできないが、使用する前に加熱による脱ガスを行うことで洗浄表面が得られる。高量子効率のアルカリ系金属や酸化物陰極の耐久性はあまり高くないが、LaB₆は2710°Cと高融点物質であり、レーザー照射に対する耐久性が高い。これらの特徴は長マクロパルスマルチバンチ光電子ビーム生成用陰極として期待できる。

4. 光電子励起用レーザーシステム

LaB₆光陰極用ドライブレーザーとして光電子励起用ドライブレーザーはNd:YAGレーザーの第三高調波が使用可能である。Nd:YAGレーザーはレーザー加工などでよく使用される赤外高出力固体レーザーで、熱伝導や熱への耐性が強く、強い光を励起することができる。また、十数ps程度の短パルス発振が可能でバックボンバードメントがおきない程度のバンチした電子ビームの励起が可能である。このシステムはLIGHTWAVE社のCW-Modelocked Nd:YAGレーザー発振器で得られた、波長1064nm、マイクロパルス幅50ps、繰り返し89.25MHzのレーザー光を、POSITIVELIGHT社のNd:YAG増幅システムを用いて増幅している。本施設のリニアックはマクロパルス幅20μs、繰り返し12.5Hzであるため、この増幅システムのポッケルセルによりパルス切り出しをしている。また、波長355nmの光を得るため波長変換素子LBOとBBOを使用している。このレーザーシステムより平均1W程度の出力が得られる。

5. 実験概要

5.1 実験内容と構成

マルチバンチ光電子ビーム測定を二極管構造にして行った。図1に実験装置の構成図を示す。Nd:YAGレーザーシステムから得られる355nmの光を真空度10⁻⁸Torr台に保たれた真空チェンバー内の陰極に照射する。図2にLaB₆陰極を示す。本実験で使用する単結晶LaB₆陰極はAPTECH社のCAMBRIDGEマウントの直熱型熱陰極で、直径2mmのボタン型である。結晶面は仕事関数が2.6eVと小さい[100]面である。レーザーを陰極面に垂直に照射するために陽極には図3に示すような切かきがある。これにより、陰極面に対して全角度で照射することが可能である。量子効率の角度依存を測定できるようにするためである。陰極-陽極間のギャップ長は3mmである。チェンバーをアースとし、アースに対して陽極に最大3kVの静電位をかけることができる。また、陰極はアースに対して電氣的に浮いている。これは光電子電流を陰極とアースの間に設置したシャント抵抗に流れる電流として測定するためである。この電流は1GHz、最大5Gs/sのTektronixTDS5104を用いて観察する。また、比較のためのレーザー光はNd:YAGレーザーシステムの下流のミラーでできる裏面反射がある。この光は使用する光の軌道から完全に外れている。そこで、この光をフォトダイオードで検出し、オシロスコープで観察する。陰極へヒーター電力を投入するための電源と陰極アッセンブリの間には、ヒーター電源に光電流が流入しないように、チョークトランスとコンデンサーを取付けた。

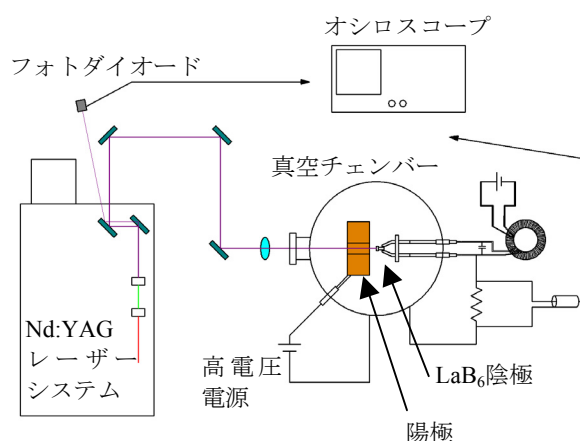


図1. 実験装置構成図。励起レーザーは陽極の切りかきを通り、LaB₆陰極表面に垂直に入射する。チェンバー内の真空度は10⁻⁸Torrに保たれている。

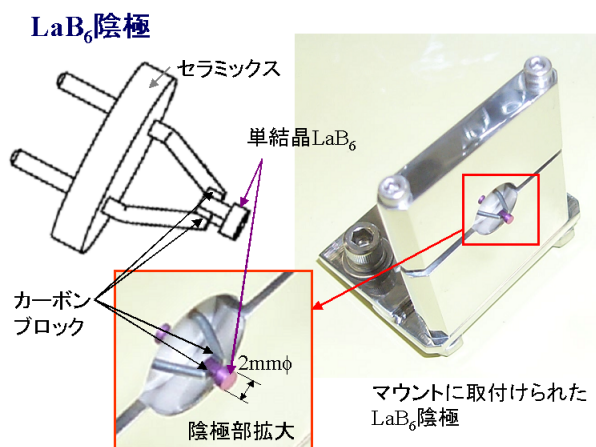


図2. 単結晶LaB₆光陰極。直熱型LaB₆陰極を光陰極として使用した。そのためヒーター電力を供給するフィードスルーのあるアッセンブリとなっている。

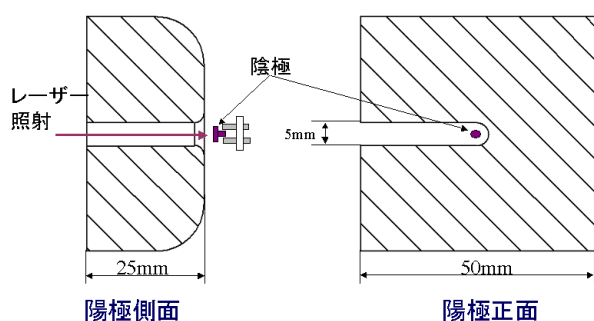


図3. 陽極形状と陽極の陰極に対する配置。陰極に対して正面入射のみならず、光電子励起レーザーの照射角度を変えることが可能な形状になっている。

5. マルチバンチ光電子ビーム発生試験

図1の装置構成で得られた光電子電流波形を図4に示す。現在のところ光軸が完全にあっておらず、レーザーの位置不安定性が顕著に表れる状態にある。そのため観測される光電子電流波形も不安定である。光電子電流波形のマクロパルス先頭部で光電子が観

測されていない原因はレーザーの不安定性のためであると考えられる。マイクロパルス構造はレーザーと同じ周期で現われている。パルス幅が広がり、アンダーシュートが観測されているが、50psと非常に高速の現象であるため、リード線のインダクタンスなどの影響が出ていると考えられる。

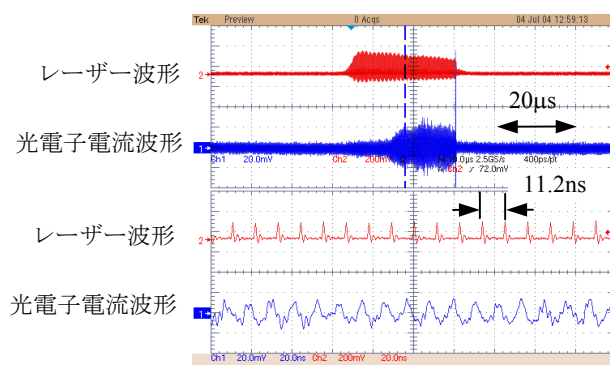


図4. 光電子電流測定結果。上段がマクロパルス波形、下段が上段点線部の拡大図を示す。

6. まとめと今後の課題

Nd:YAGレーザーの第三高調波を単結晶LaB₆陰極に、陰極表面に対して垂直に入射し、長パルスマルチバンチ発生試験を行った。今後、光電子放出の角度依存性を調査する。また、同じホウ化物であるCeB₆陰極に関しても同様の実験を実施しLaB₆と比較検討をする。

参考文献

- [1] Y.Hayakawa, et al., "First Lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5 μm", Proceedings of the 23rd International Free Electron Laser Conference and 8th FEL User's Workshop (Darmstadt, Germany 2001.8), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A483(2002) 29-33.
- [2] P.G.O'Shea, et al., "Single bunch injection system for an electron storage ring an RF photoinjector", Appl. Phys. Lett. 73, 411(1998)