

京都大学中赤外自由電子レーザーの長マクロパルス光陰極運転に向けた 光陰極励起用レーザーシステムのアップグレード

UPGRADE OF PHOTOCATHODE DRIVE LASER SYSTEM FOR LONG MACRO-PULSE PHOTOCATHODE OPERATION OF KU-FEL

全炳俊^{#, A)}, 大垣英明^{A)}

Heishun Zen^{#, A)}, Hideaki Ohgaki^{A)}

^{A)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Abstract

The joint research project of QST, Kyoto University, Nihon University, and KEK aiming at demonstrating the High Harmonic Generation (HHG) driven by Mid-Infrared Free Electron Laser (MIR-FEL) has been started since 2018. Kyoto University group is responsible for generating an intense few-cycle mid-infrared light which has enough high power to drive HHG by upgrading the existing MIR-FEL facility, KU-FEL. The electron bunch charge used for driving the FEL should be increased to achieve this goal. Our group has already achieved the operation of the existing RF gun in photocathode mode. The bunch charge of the photocathode operation is three times as high as that of thermionic operation of the cathode. The increase of bunch charge resulted in an increase of FEL peak power by 6.5 times. Due to the limitation of the photocathode excitation laser system, the macro-pulse duration of the electron beam was limited to 4 μs , which was about half of thermionic cathode mode (7.8 μs). In this study, the photocathode excitation laser system was upgraded to increase the macro-pulse duration from 4 μs to 8 μs with keeping the electron bunch charge. As the result of the upgrade, the highest micro-pulse energy of photocathode excitation laser was increased from 12 μJ to 30.6 μJ under the condition of macro-pulse duration of 8 μs and micro-pulse repetition rate of 29.75 MHz. The highest micro-pulse energy after the upgrade was enough high to generate the electron bunch charge of 150 pC.

1. はじめに

2018 年度より、光・量子飛躍フラグシッププログラム (Q-LEAP)、基礎基盤研究課題として、中赤外自由電子レーザー (FEL) で駆動する高繰り返し高次高調波アト秒光源の実現を目指し、量研、日大、KEK、京大エネ研のチームで研究開発を開始した。本プロジェクトでは、共振器型中赤外自由電子レーザーで発生させた高強度数サイクル中赤外光を希ガスに集光し、高次高調波発生 (High Harmonic Generation: HHG) を行い、アト秒 X 線発生を行う予定である。研究プロジェクトの構想や概要については、プロジェクトリーダーの羽島氏の発表を参照された [1]。

我々、京都大学エネルギー理工学研究所グループのミッションは、既設の小型中赤外自由電子レーザー (KU-FEL) の性能を向上させ、HHG 駆動に必要な高強度数サイクル中赤外光を発生させる事である。共振器型中赤外自由電子レーザーの性能は駆動に用いられる電子ビームの性能に大きく左右される。KU-FEL の高周波電子銃には六硼化ランタンが陰極として使用されており、通常運転時には陰極を 1900 K 程度まで昇温し、熱電子放出により電子を供給している。この場合、KU-FEL の駆動に用いられる電子ビームのバンチ当たり電荷量は 50 pC 以下と小さく、FEL のピークパワーとしても最大 10 MW 程度と、HHG には十分とは言えない。六硼化ランタン陰極は仕事関数が約 2.5 eV と低く、外部から紫外レーザーを照射する事で光電効果により電子を発生させる事が可能である [2]。KU-FEL においてもマルチバンチピコ秒紫外

レーザーを導入し [3]、2015 年に六硼化ランタン陰極の光陰極運転により中赤外自由電子レーザーの発生に成功している [4]。この際はバンチ当たり電荷量 150 pC と熱陰極運転時と比較し、3 倍以上に増加させることに成功し、マイクロパルス当たりの FEL 光エネルギーも 6.5 倍に増大させる事ができた。ただし、電子ビームのマクロパルス幅は光陰極励起用レーザーの性能により 4 μs に制限されていた。熱陰極運転の場合の電子ビームマクロパルス幅は 7.8 μs であり、約半分ほどであった。

本研究では電子ビームのバンチ当たり電荷量を 150 pC に保ったまま、マクロパルス長を 8 μs まで伸ばせるように光陰極励起用レーザーシステムのアップグレードを行ったので、ここに報告する。尚、既設の高周波電子銃では、陰極径や空洞間アイリスが小さい事が原因で、バンチ当たり電荷量 150 pC 以上を持つ電子ビームを発生させる事が困難である事が分かっている。更に大電荷量の電子ビームを KU-FEL の駆動に用いるためには、新しい電子銃の導入が不可欠である。

2. 既設光陰極励起レーザーシステム

Figure 1 にアップグレード前の光陰極励起レーザーシステムの概略図を示す。繰り返し周波数 89.25 MHz のモードロック Nd:YVO₄ 発振器で発生した近赤外 (1064 nm) レーザパルス列は内蔵の AOM (Acousto-Optic Modulator) にて繰り返し周波数を三分の一 (29.75 MHz) に間引かれると共に、マクロパルス長分の切り出し、マクロパルス中での振幅変調が導入される。レーザーの位置・角度を自動調整するアライナを経由した後、二つの 2 パス増幅器により光強度が増幅される。その後、波長変換

[#] zen@iae.kyoto-u.ac.jp

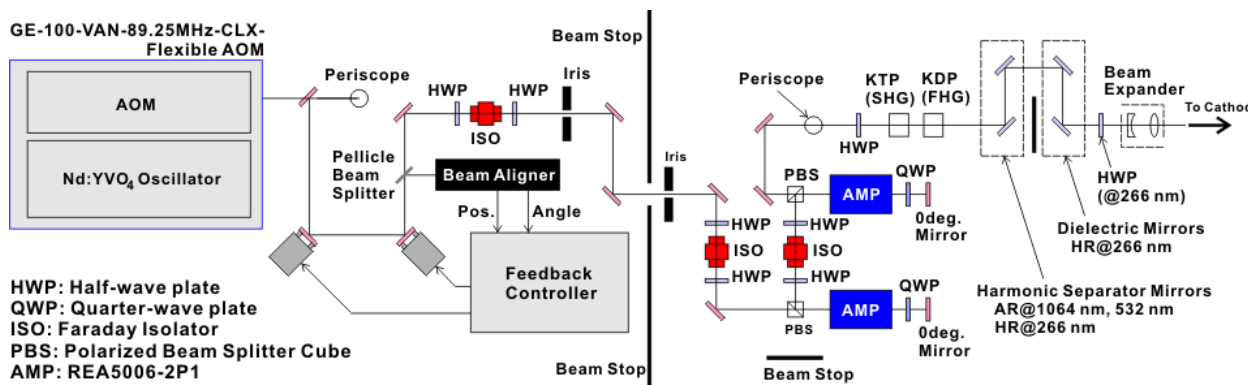


Figure 1: Layout of the photocathode excitation laser system before the upgrade.

結晶(SHG、FHG)へ入射され、光陰極運転に必要な波長 266 nm の深紫外ピコ秒レーザーパルス列を得る。最後にビームエクスペンダーを通して陰極へと輸送される。

本光陰極励起用レーザーシステムでは、光強度を強くしていくと、後段の2パス増幅器の内部蓄積エネルギーがマクロパルス中の最初の数パルスを増幅しただけで大きく減少し、マクロパルス後半の増幅率が低くなる現象が発生していた。このため、矩形のマクロパルスが発生させるために、オシレータに内蔵されているAOMにより二つの2パス増幅器に入射前のレーザーのマクロパルス前半の強度を下げ、マクロパルス後半の強度を上げるという変調を掛ける必要が生じていた。Figure 2 にアップグレード前に測定した深紫外ピコ秒レーザーの測定結果を示す。黒線がマクロパルス長を 4 μs に設定した場合、赤線がマクロパルス長を 8 μs に設定した場合の結果である。どちらも AOM の変調パターンを調整する事で、矩形マクロパルスを実現しつつ、マイクロパルス当たりの光エネルギーを最大化した結果である。過去の実験から、電子ビームのバンチ当たり電荷 150 pC を発生させる為には、マイクロパルス当たりの光エネルギーが 26 μJ を超える深紫外レーザーを供給する必要がある事が分かっている[4]。アップグレード前はマクロパルス幅 4 μs であれば、39 μJ と十分に 26 μJ を超えるマイクロパルスエネルギーを得られているが、マクロパルス幅 8 μs では 12 μJ と半分以下のマイクロパルスエネルギーしか得られていないことが分かる。

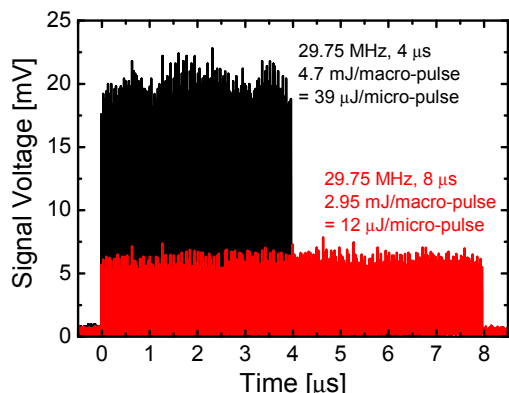


Figure 2: Measured performance of the photocathode drive laser system before the upgrade.

3. 長マクロパルス化に向けたアップグレード

既設の光陰極励起レーザーシステムでは、後段の2パス増幅器の蓄積エネルギーがマクロパルス中で減少し、レーザー増幅率が低下している事が分かっている。この後段の2パス増幅器を直線状に配置された2台の増幅器に変更し、蓄積エネルギーを二倍に増やす事で、マイクロパルスエネルギーを 26 μJ 以上に保ちながら、マクロパルス長を 8 μs まで伸ばす事が可能になるのではないかと考えた。Figure 3 にアップグレード後の光陰極励起レーザーシステムの概略図(後段のみ)を示す。波長変換結晶やビームエクスペンダー等の系は動かさず、後段の2パス増幅器とその入出射系のみを改造して、直列2段増幅器に変更した。新規に追加した増幅器(REA5006-2P200H, Northrop Grumman CEO 社)は既設の物とほぼ同仕様の物である。

Figure 4 にアップグレード前後の増幅器部の写真を示す。偏光制御を利用したコンパクトな2パス増幅器から2台の増幅器が直列に並んだ直列2段増幅器に変わっている事が見てとれる。本アップグレードにより装置全体の光路長が少し伸びている。

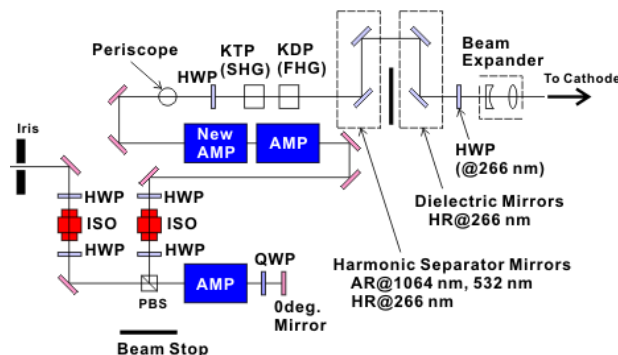


Figure 3: Layout of the amplifier section of the photocathode excitation laser system after the upgrade.

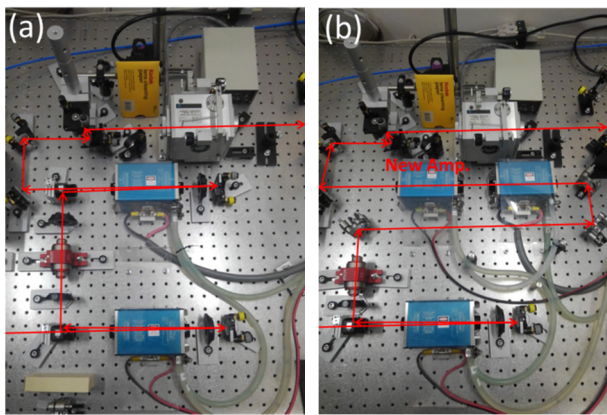


Figure 4: Photographs of the amplifier section of the photocathode excitation laser system. (a) Before the upgrade. (b) After the upgrade.

4. 性能試験

前述のアップグレード実施後にマクロパルス長 $8 \mu\text{s}$ における性能試験運転を行った。Figure 5 に測定されたマクロパルス波形を示す。結果として、マクロパルス長 $8 \mu\text{s}$ の条件において、マイクロパルスエネルギー $30.6 \mu\text{J}$ を持つマイクロパルス繰り返し周波数 29.75 MHz の深紫外レーザーパルス列の発生に成功した。本性能は既設高周波電子銃で発生可能な最大バンチ当たり電荷 150 pC を持つ電子ビームを発生するのに十分大きなマイクロパルスエネルギーを有する。また、改造前の性能と比較し、約 2.5 倍高いマイクロパルスエネルギーの発生に成功した。

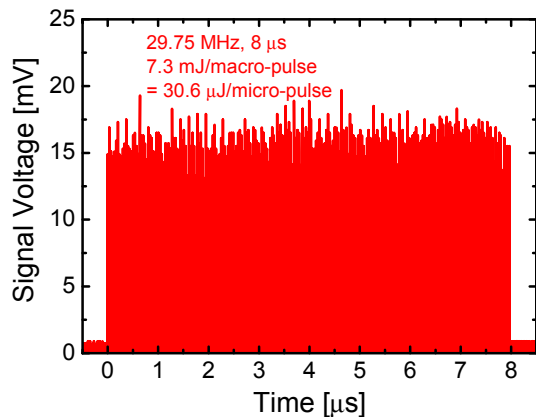


Figure 5: Measured performance of the photocathode drive laser system before the upgrade.

5. まとめ

中赤外自由電子レーザーで駆動する高次高調波アト秒 X 線光源の実現に向け、京都大学小型中赤外自由電子レーザー(KU-FEL)の性能向上が必要である。本研究では、KU-FEL を光陰極運転した際のバンチ当たり電荷量 150 pC を保ったまま、マクロパルス長を現状の $4 \mu\text{s}$ から $8 \mu\text{s}$ に伸長するため、光陰極励起レーザーシステムのアップグレードを行った。

光陰極励起レーザーシステムの増幅器部は二つの 2 パス増幅器で構成されていたが、増幅器を一台追加し、後段を 2 台の直列増幅器に変更する事で、目的の達成を図った。結果として、マイクロパルス当たりの光エネルギー $30.6 \mu\text{J}$ 、マイクロパルス繰り返し 29.75 MHz 、マクロパルス幅 $8 \mu\text{s}$ の深紫外パルス列の発生に成功した。得られたマイクロパルスエネルギーはバンチ当たり電荷量 150 pC を得るのに必要な $26 \mu\text{J}$ を十分に上回っており、当初目標の達成に成功した。

6. 今後の予定

本研究により行った光陰極励起レーザーのアップグレードにより、バンチ電荷 150 pC 、マクロパルス長 $8 \mu\text{s}$ 、バンチ繰り返し 29.75 MHz の電子ビーム発生に必要な条件が整った。2019 年度秋以降にアップグレードされた光陰極励起用レーザーシステムを用いて KU-FEL の光陰極運転を行い、中赤外自由電子レーザー発生試験を行う予定である。

謝辞

本研究は文部科学省の光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)によるものである。

参考文献

- [1] R. Hajima *et al.*, “自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒 X 線光源”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019.
- [2] M. Curtin *et al.*, “First Demonstration of a Free Electron Laser Driven by Electrons from a Laser-Irradiated Photocathode”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A296, 1990, pp.127-133; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016890029091199L>
- [3] H. Zen *et al.*, “Development of Photocathode Drive Laser System for RF Guns in KU-FEL”, Proceedings of FEL2014, Basel, Switzerland, Aug. 25-29, 2014, pp. 828-831; <http://epaper.kek.jp/FEL2014/papers/thp045.pdf>
- [4] H. Zen *et al.*, “Feasibility Study of Photocathode Operation of Thermionic RF Gun at KU-FEL”, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, May 8-13, 2016, pp. 754-756; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/mopow018.pdf>