

## Experimental Study of a Photocathode Driven RF Gun for Free-Electron Lasers

M. Asakawa, K. Okubo\*, N. Nakao\*\*, M. Fujita, J. Z. Chen,  
H. Furukawa, K. Imasaki, K. Mima\*, S. Nakai\*, and C. Yamanaka

Institute for Laser Technology (ILT)

2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565 JAPAN

\* Institute of Laser Engineering (ILE), Osaka University

\*\* Faculty of Engineering, Kansai University

自由電子レーザー用フォトカソード高周波電子銃の研究

### Abstract

A photocathode driven RF-gun is being developed for a compact FEL system with a 9 MeV RF linac at ILT/ILE. We developed metallic photocathodes (LaB<sub>6</sub>, tungsten) irradiated by a mode-locked Nd:YAG laser. These cathodes generate the electron beam of more than  $10^{11}$  A/m<sup>2</sup>/rad<sup>2</sup> at a operation temperature of 1000°C. Using these photocathodes, we studied the beam qualities from an S-band RF-gun. The photocathode can generate the electron beam in the narrow RF phase. Thus the energy spread and the emittance could be reduced. Further, this phase selection suppressed the back-bombardment, which changes the beam loading during the macro-pulse.

### 1. はじめに

当研究所では比較的小型の高周波線形加速器(電子エネルギー9MeV)を用いた広帯域(10 μm~数mm)の自由電子レーザーの開発研究を行っている。このようなコンパクトな自由電子レーザーの開発あるいは自由電子レーザーの短波長化に対して最も重要な課題は規格化輝度  $10^{11}$  A/m<sup>2</sup>/rad<sup>2</sup>以上の高輝度電子ビーム源の開発である。このような電子ビーム源としてフォトカソード高周波電子銃の開発を行った。

高周波電子銃からエネルギーの揃った高輝度の電子ビームを得るには短時間内に電子を発生させなければならない。このために当研究所ではLaB<sub>6</sub>とタングステンのフォトカソードを開発した。これらのカソードは従来の半導体化合物フォトカソードより高い電流密度での動作が可能であり、高周波電子銃用の陰極として優れた特性を有している。今回はこれらのフォトカソードを導入した高周波電子銃の動特性に関する研究について報告する。

## 2. フォトカソード駆動高周波線形加速器の概要

本研究に用いたSバンド高周波線形加速器の主要構成を図1に示す。本装置は高周波電子銃、 $\alpha$ マグネット及び主加速管から構成される。電子銃の最大加速電界は60MV/mに達し、加速長4cmで電子ビームを1MeVまで加速する。電子銃出力後、電子ビームは $\alpha$ マグネットに入射され、そのパルス幅は3psにまで圧縮される。その後電子ビームは主加速管に入射され9MeVにまで加速される。電子ビームのマクロパルス幅は3.5 $\mu$ sで繰り返しは10Hzである。装置全体の大きさは1m $\times$ 2m程度で、在来の加速器と比較するとコンパクトなものである。

フォトカソード駆動用レーザーにはモード同期Nd:YAGレーザーを使用した。モード同期周波数は加速器の周波数の32分の1(89.25 MHz)であり、11ns毎にレーザーはフォトカソードに照射される。レーザーのマイクロパルス幅は20psであり、これは加速電界位相20 $^\circ$ に対応する。モードロックレーザーと加速器とのジッターは高周波源を共有させることにより測定限界である2ps以下に抑制した。この同期システ

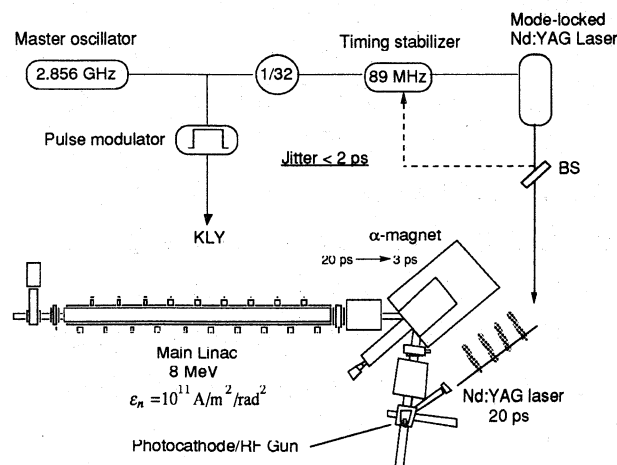


図1.高周波線形加速器システ

ムでは加速器に送る2.856GHzの高周波を1/32にまで分周し、これをレーザーのモードロッカーに入力する。

フォトカソードとしては六ホウ化ランタン(LaB<sub>6</sub>)にNd:YAGレーザーの3倍高調波を照射するものと、タングステンに2倍高調波を照射し2光子吸収過程を利用するものとの2種類を開発した。当研究所ではこれらのカソードを熱電子放出が無視できる程度の温度(~1000 $^\circ$ C)に加熱し、そこへレーザーを照射することで電子ビームの高輝度化が可能であることを明らかにした。それぞれのカソードの特徴としては、LaB<sub>6</sub>では量子効率が比較的高いこと、タングステンでは最大動作電流密度が高いことが挙げられる。これらのカソードの特性を表1に示す。各パラメータはフォトカソード自体の特性を調査するためにDC50 kVを印加した静電電子銃を用いて測定したものである。

表1. フォトカソード特性

	LaB <sub>6</sub> + 355nm	W + 532nm
Operating temperature [ $^\circ$ C]	1100	1600
Max current density [A/cm <sup>2</sup> ]	480	1000
Normalized emittance [ $\mu$ mm $\cdot$ mrad]	3.1	2.8
Normalized brightness [A/m <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> ]	$2 \times 10^{11}$	$5 \times 10^{11}$

## 3. 電子銃出力ビームのビーム品質

開発したフォトカソードを高周波電子銃に導入し、電子ビーム品質を計測した。またLaB<sub>6</sub>を熱陰極として使用しフォトカソード動作時と熱陰極動作時との電子銃動特性の比較を行った。

電子銃出力ビームのエミッタンスをペーパーポット法により計測した。LaB<sub>6</sub>フォトカソードの場合の90%エミッタンスは12

$\pi$  mm · mradであり、このカソードを熱陰極として使用した場合には $42\pi$  mm · mradであった。またタングステンフォトカソードではエミッタンスは $10\pi$  mm · mradにまで改善された。

電子銃出力ビームのエネルギーを $90^\circ$ 偏向型のエネルギー分析器を用いて計測した。観測はMCPイメージインテンシファイアとCCDカメラとを組合せて行い、MCPにゲートパルス（パルス幅30ns）を印加することで、マクロパルス内でのエネルギー変動を調査した。

エネルギー拡がりには熱陰極動作時には200keV以上であったが、 $\text{LaB}_6$ フォトカソード動作時には80keV、タングステンフォトカソード動作時には20keVに改善された。

このようなエミッタンスとエネルギー拡がりの改善は電子を狭い加速位相から発生させていることによる。フォトカソード駆動用レーザーのパルス幅は20psであり、電子は電子銃内ではほぼ同じ加速電界を感じるためにエネルギー拡がり及びエミッタンスが改善される。またタングステンカソードでは2光子過程を利用しているので電子ビームのパルス幅はレーザーのパルス幅の $1/2$ になりさらにビーム品質は改善される。

図2にマクロパルス内での電子ビームの中心エネルギーの変動を示す。フォトカソード動作時ではエネルギー変動を20keV程度にまで抑さえることができた。一方、熱陰極動作時では時間経過とともにエネルギーは1.2MeVから0.7MeVにまで大きく減少する。

熱陰極で観測されたエネルギー変動はBack-bombardmentによるビーム負荷の変動によるものと考えられる。フォトカソ

ドでは電子発生位相を制限していることからBack-bombardmentを抑制できビーム負荷変動によるエネルギー変動を小さくできるものと考えられる。

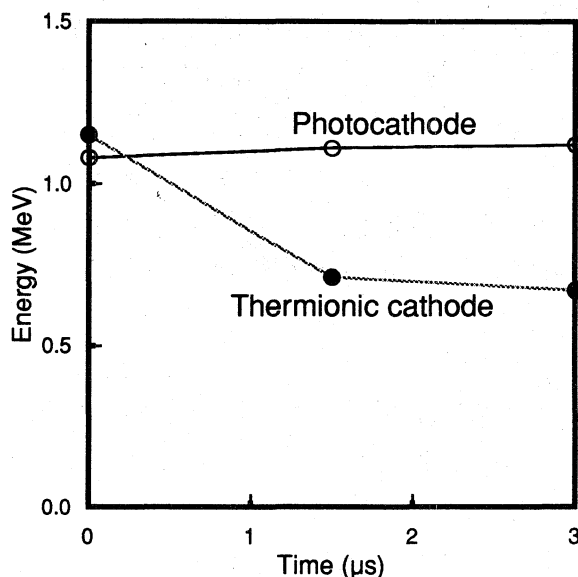


図2. エネルギー変動

#### 4. おわりに

当研究所では自由電子レーザー用の高輝度電子ビーム源としてフォトカソード駆動高周波電子銃の開発研究を行っている。現段階で $\text{LaB}_6$ フォトカソード高周波電子銃を加速器に導入し規格化輝度 $10^{11}\text{A}/\text{m}^2/\text{rad}^2$ 、エネルギー拡がり1%の高輝度、高品質電子ビーム発生に成功しており、自由電子レーザー実験において $45\mu\text{m}$ 発振コヒーレント放射光を利用したミリ波発振の高出力化等の成果を得ている。現在はVUV域自由電子レーザーで必要となる規格化輝度 $10^2\text{A}/\text{m}^2/\text{rad}^2$ の超高輝度電子ビーム発生を目指し、タングステンフォトカソードにおけるレーザースポット径の最適化、カソード加熱方式の改良等を行っている。