

# LEENA-FELの現状とニードルRF光陰極の研究

井上 隆博<sup>1</sup>、宮本 修治、天野 壯、望月 孝晏  
姫路工業大学 高度産業科学技術研究所 (LASTI)  
〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-1-2

## 概要

電子線形加速器 LEENA を用いて、遠赤外自由電子レーザーの発生およびその利用研究を行っている。昨年度に中型放射光施設 NewSUBARU サイトに移転し、最大電子エネルギー16.5 MeV までの運転が可能になった。電子ビームおよび FEL のパラメータサーベイを行った。また、FEL の高出力化を目的としたニードル RF 光陰極の研究も行っている。2 GV/m 程度の高電界領域で量子効率の急激な増加を観測し、2.6 GV/m で 10 % を超える高い量子効率を測定した。

## 1. 研究目的

自由電子レーザー (free electron laser : FEL) は、遠赤外領域において唯一の波長可変光源である。遠赤外領域には多数の分子振動との共鳴周波数が含まれており、医療・バイオメディカル・半導体工業といった分野で様々な利用研究が検討・実行されている。遠赤外 FEL の特徴として、単色性・指向性・高出力・高繰返し等が挙げられる。従って、特定の分子振動を選択的に励起させ (多光子吸収も可能)、照射によるターゲットの変化を高時間分解計測することができる。

高度産業科学技術研究所 (高度研) では、Fig. 1 に示す小型の電子線形加速器 LEENA (Laser Emitted ElectroN Accelerator) を用いて、遠赤外 FEL 光源開発およびその利用研究を行っている。利用研究として次のようなことを予定している。

- (1) 遠赤外領域における各種物質のスペクトル吸収係数測定；大気、水、タンパク質。

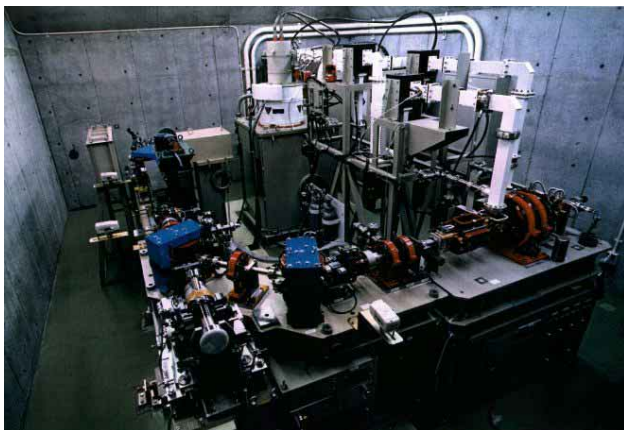


Fig. 1. LEENA : Laser Emitted ElectroN Accelerator

- (2) 特定分子の吸収を利用した 2 次元 THz イメージング；ターゲットの吸収分布計測。
- (3) タンパク質への照射実験；励起のメカニズム解明および照射による構造・物性の変化を観測。

(2) に関しては、SPring-8 の古代文化研究グループとの共同研究として古文書文字の解析を予定している。このような利用研究を行うために、高出力・高品質な遠赤外 FEL の発振を目標として、FEL の光源開発および高輝度 RF 光陰極の研究を行っている。

## 2. LEENA 運転とパラメータサーベイ

### 2.1 LEENA パラメータ

Table 1 に LEENA のパラメータを示す。

カソードには LaB<sub>6</sub> 単結晶 (100) を使い、熱陰極あるいは光陰極モードで LEENA を運転する。RF 周波数は 2856 MHz であり、RF を 1/32 分周した信号をマイクロパルストリガとして光陰極励起用モードロック Nd:YLF レーザーを駆動する。電子ビームの加速エネルギーは 4 ~ 15 MeV の範囲で可変である。ウィグギャップの調整により K 値を 0.31 ~ 0.98 の範囲で変化できる。Fig. 2 に示すように FEL 発振波長は 10 ~ 100 μm の遠赤外領域になる。

Table 1. LEENA parameters

Cathode type	RF-gun
Mode	Thermionic- or Photo-cathode
Material	LaB <sub>6</sub> (100)
Beam energy	4 ~ 15 MeV
RF frequency	2856 MHz ± 15 MHz
FEL wavelength	10 ~ 100 μm
Modelock laser	Nd:YLF laser (351 nm, 263 nm)
Repetition	89.25 MHz (= 2856 MHz / 32)
Energy	10 μJ
Jitter	< 1 ps
Wiggler	Halbach type (Nd-Fe-B)
Pitch / Pole	16 mm / 50
Magnetic field	2 ~ 6.6 kG
K parameter	0.31 ~ 0.98 (controllable)
Optical resonator	Gold coated mirror
Curvature	1850 mm
Length	3359 mm

<sup>1</sup> E-mail: inoue@lasti.himeji-tech.ac.jp

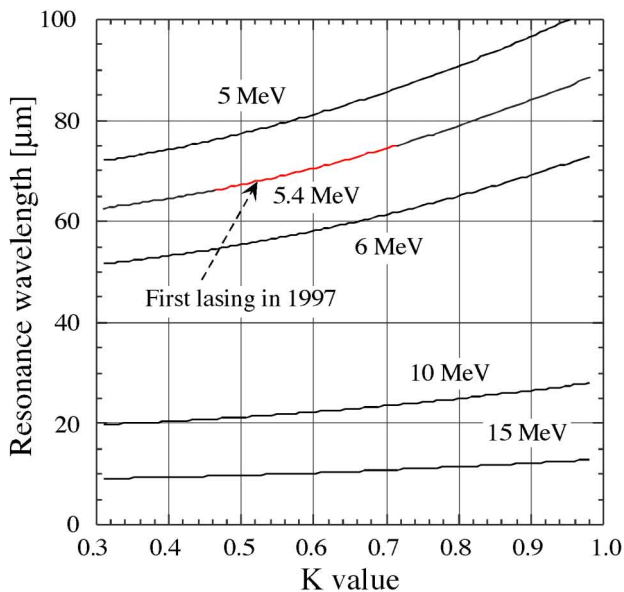


Fig. 2. Resonance wavelength of LEENA. We have observed 65 ~75  $\mu\text{m}$  FEL in 1996<sup>[1]</sup>.

## 2.2 電子ビームのパラメータサーベイ

FEL ゲインは電子ビームのピーク電流・エネルギー拡がり・エミッタンス・パルス幅の関数であるため、FEL の高出力化には高輝度電子ビームが必要である。まず電子ビームの各パラメータを測定した。

エネルギー拡がりは、偏向電磁石の偏向特性を用いて測定した。90° 偏向電磁石の励磁電流を変化させ、偏向後のスリット (1mm) を通過する電子ビーム電流値をファラデーカップ (ビームダンプ) で想定する。電子エネルギーは励磁電流に比例する。熱陰極モードにおけるエネルギー拡がりの測定結果を Fig. 3 に示す。

エミッタンスは四極電磁石の集光特性を利用して求める。四極電磁石の励磁電流を変化させて、直ぐ後のスクリーンモニタ (デマルケスト蛍光板) 上の蛍光強度のプロファイルをとる。ビームサイズはプロファイル Gauss 関数で近似して求める。

パルス幅はストリークカメラを用いて測定できるが、現在 NewSUBARU で使用中のために測定できなかった。そこで、レーザー逆コンプトン散乱を利用したパルス幅計測を検討中である。

## 3. ニードル RF 光陰極の研究<sup>[2]</sup>

### 3.1 ニードル RF 光陰極の必要性

RF 光陰極は、RF に同期して電子ビームを時間制御でき、熱陰極に比べてエネルギー拡がりが小さくなることから、RF 電子加速器において有効である。さらに RF 光陰極をニードル状にすることで、高電界下において量子効率の増加する事を積極的に利用する。またニードル先端の微小領域から電子が放出さ

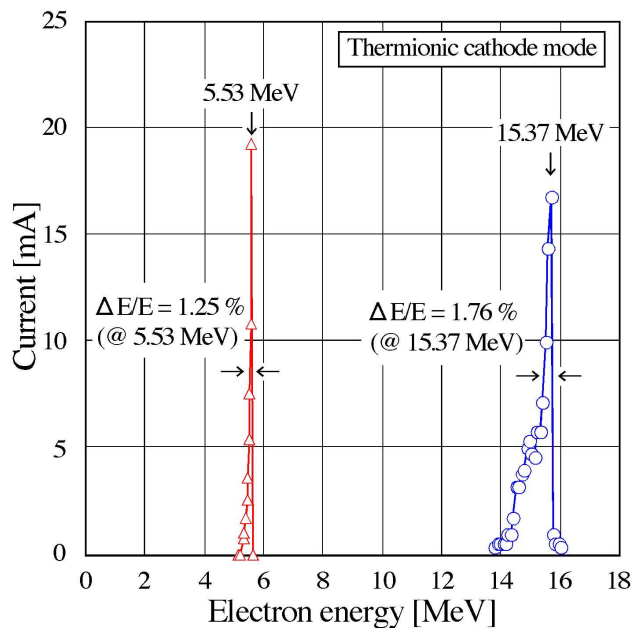


Fig. 3. Energy spread of Electron beam on thermionic cathode mode.

れるため、低エミッタンスの電子ビームを得るのに有効であると考えられる。ピーク電流密度が必然的に高くなるため、強固な金属材料を選択すべきである。陰極材料としては、金属元素で最も融点の高いタングステン (融点 3683K) を用いる。

### 3.2 光放出電流の測定

本実験の目的は、GV/m オーダーの高電界領域における量子効率の電界強度依存性を調べることである。まず電解エッチング法を用いて、先端半径が 1  $\mu\text{m}$  以下のタングステンニードルカソードを製作した。実験装置を Fig. 4 に示す。電子放出を安定させるために、真空チャンバ内は  $6 \times 10^{-9}$  Torr 以下の超高真空が維持されている。カソードに 3 kV 以下の DC 電圧を印加し、放出電流は微小電流計 (最高分解能 10 fA、積分時間 0.1 ~ 1 s) で計測した。サファイア窓を通してカソード正面から UV パルスレーザーが照射できる。

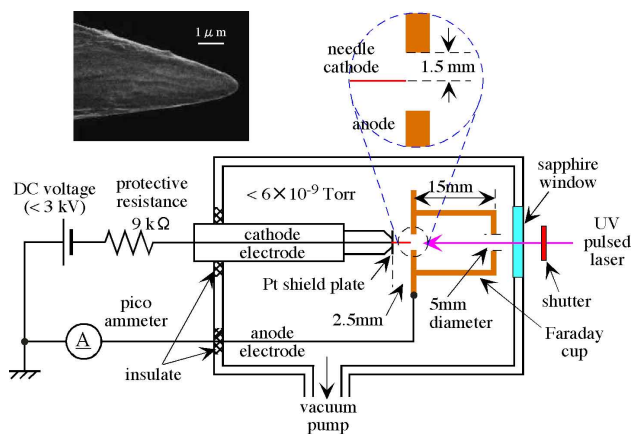


Fig. 4. Experimental setup for measurement of the quantum efficiency under high electric field.

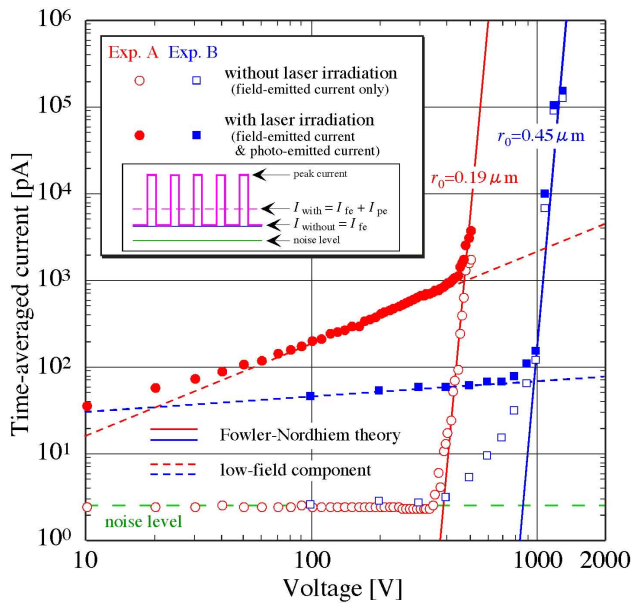


Fig. 5. Dependences of the total current measured without or with laser irradiation on the applied voltage. Peak current is the duty factor times as much as time-averaged current.

Fig. 5 に、各種 UV パルスレーザーの照射前後における放出電流の電圧依存性を示す。各実験で用いた UV パルスレーザーのパラメータを Table 2 に示す。低電圧領域では光放出電流（● - ○あるいは■ - □）が電圧に比例し、電界放出電流が急増する高電圧領域において光放出電流の急増が観測された。このような急増はニードル先端からの光放出電流（あるいは量子効率）の急増が寄与している。一方、低電圧領域における光放出電流の線形的な増加は、ニードル先端以外の低電界領域が関与しており、T. Srinivasan-Rao らの論文と矛盾しない<sup>[3]</sup>。

### 3.3 量子効率の電界強度依存性

ニードル先端の電界強度は、近似的にニードル先端半径  $r_0$  とアノード開口半径  $r_a$  と印加電圧  $V$  を用いて、近似的に  $E = (V/r_a - r_0) \times (r_a/r_0) \approx V/r_0$  と表す。ニードル先端半径は、測定された電界放出電流の電圧依存性に電界放出理論 (Fowler-Nordheim 理論<sup>[4-5]</sup>) をフィッティングする事で求めた。実験 A および B において、先端半径はそれぞれ  $0.19 \mu\text{m}$  および  $0.45 \mu\text{m}$  となった。これらの値は、ニードル先端の電子顕微鏡写真から評価した値とほぼ一致する。

Table 2. Parameters of UV pulsed lasers

Exp.	Laser	Wavelength [nm]	Peak intensity [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]	Pulse width
A	Nd:YAG	355	$20 \times 10^3$	30 ns
B	Nd:YLF	351	$800 \times 10^6$	10 ps

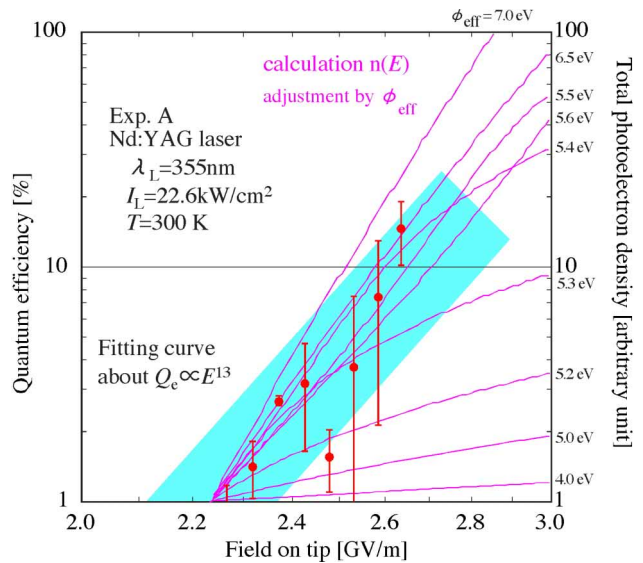


Fig. 6. Dependences of the quantum efficiency on the electric field with irradiation of 3rd harmonics Nd:YAG laser. Fitting curve (shadow line) and calculation of total photoelectron density  $n(E)$  are shown.

Fig. 6 に、実験 A において測定された、ニードル先端の量子効率の電界強度依存性を示す。縦軸は量子効率  $Q_e$  で、ニードル先端に照射された光子数  $N_p$  に対するニードル先端から放出された光電子数  $N_e$  の比と定義した； $Q_e = N_e / N_p$ 。2.2 GV/m 以上の電界強度で、量子効率が電界の 10 乗程度に比例しており、2.6 GV/m あたりで 10 % を超える量子効率が観測された。Schottky 効果、ポテンシャル障壁の透過率、および金属内部のエネルギー分布関数などを用いて光電子放出密度  $n(E)$  を計算した。実効の仕事関数  $\phi_{\text{eff}}$  を変えて測定結果にフィッティングした。 $\phi_{\text{eff}} = 5.4 \text{ eV}$  程度で依存性をよく説明できる。

## 4. まとめと今後の予定

高度研では、電子線形加速器 LEENA を用いて遠赤外 FEL (10 ~ 100  $\mu\text{m}$ ) の光源開発とその利用研究を行っている。NewSUBARU サイトにおいて最大電子エネルギー 16.5 MeV までの運転が可能となり、電子ビームおよび FEL のパラメータサーベイを行っている。またタングステンニードル RF 光陰極の研究を行っている。2 GV/m 以上の高電界で量子効率の急激な増加が観測され、2.6 GV/m 程度において 10 % を超える量子効率が得られた。

## 参考文献

- [1] 宮本修治他, 日本赤外線学会誌 第 7 巻第 1 号(1997.6) 73.
- [2] T. Inoue, et al., submitting to APL.
- [3] T. Srinivasan-Rao, et al., J. Appl. Phys. **69**, (3291 (1991)).
- [4] E.L. Murphy, et al., Phys. Rev. **102**, 1464 (1956).
- [5] R.D. Young, Phys. Rev. **113**, 110 (1959)