

STUDY OF HIGH-BRIGHT NEEDLE PHOTOCATHODE FOR FEL

T. Inoue^{*)}, S. Miyamoto, H. Higashiuchi, M. Yatsuzuka^{A)}, and T. Mochizuki

Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry (LASTI)
Koto 3-1-2, Kamigori-cho, Ako-gun, 678-1205 JAPAN

^{A)} Himeji Institute of Technology (HIT) Faculty of Electric Engineering
Shosha 2167, Himeji-shi, Hyogo, 671-2201 JAPAN

Abstract

In order to increase FEL power, we study to intensify electron beams using tungsten needle photocathodes that have high electric field (>1 GV/m). It is expected that photoelectrons will be mainly emitted from tip of needle, because quantum efficiency (QE) of tip is increased by such high electric field. QE was measured with different 2 pulse laser; Nd:YAG laser at 355 nm, and Nd:YLF laser at 351 nm which intensity was 825 MW/cm². For Nd:YAG QE exceeded 10 % at about 2.6 GV/m, and for Nd:YLF current density amounted to 24 MA/cm². And the optimum conditions to use these needle cathodes in lineac LEENA could be found by consideration dependence of QE on field in RF-GUN cavity, the properties of acceleration of electron beams, and thermal limitation on tip of needle.

自由電子レーザー用高輝度ニードル光陰極に関する研究

1. はじめに

自由電子レーザー (FEL) は遠赤外領域において唯一の波長可変光源であり、現在、遠赤外 FEL を用いた利用研究が考えられている; 半導体工業では半導体中の不純物準位の測定、バイオメディカルでは原子・分子の選択的振動励起を利用した治療方法の開拓、産業応用では分子励起を利用した新素材の開発。上記のような利用研究を目的として、姫路工大高度研では図 1 に示す電子線形加速器 LEENA を

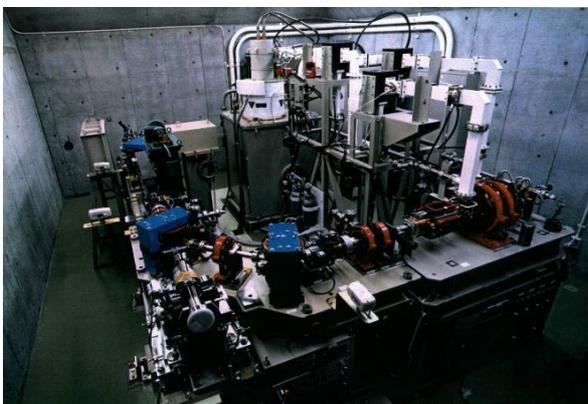


図 1 電子線形加速器 LEENA の全体図

用いた遠赤外 FEL の研究を行っている。本研究では、LEENA における FEL の高出力化を目的として、高輝度ニードル光陰極の研究を行っている。

2. 研究目的

LEENA は光陰極から放出される電子ビームを 4 15 MeV の範囲で加速し、波長 10 100 μ m の遠赤外 FEL を 100 kW 10 MW のピークパワーで発生できる。しかし現時点では、 65 75 μ m の遠赤外 FEL の発振が確認されたが、そのピークパワーとしては 1 mW 以下であった。FEL の高出力化には、電流を上げるとともに、ビーム品質を向上し、FEL ゲインを上昇させることが必要である。電界集中の大きい、タングステンニードルカソードを用いて、電子ビームの高輝度化と大電流化を図る研究を行っている。

ピーク電流を増加させるためには、先端の量子効率を増加させる必要がある。高電界ではショットキー効果によってポテンシャル障壁が低下し、量子効率が増加すると予想される[1]。そこで GV/m 程度の高電界強度における量子効率の電界強度依存性を測定した。またニードルカソードを実際の加速器

^{*)} T. Inoue, 0791-58-0249, inoue@lasti.himeji-tech.ac.jp

に用いる場合に問題となる可能性のある、電子ビームの加速特性およびニードル先端の熱解析を行い、ニードルカソードおよびレーザー照射位相の動作条件を求めた。

3. 量子効率の電界強度依存性の測定

量子効率は照射光子数に対する放出電子数と定義され、両者を正確に測定する必要がある。次のような方法で両者の評価を行った。

3.1 実験装置と電流測定方法

電子放出を安定させるために 10^{-9} Torr 以下の超高真空を維持した真空チャンパー内に、ニードルカソード(図2参照)等の電極を配置し、アノードとカソードとの間(間隔 1.5mm)に 3kV 以下の DC 電圧を可変的に印加する。ニードルカソードの正面から、各種パルスレーザー(Nd:YAG (355nm)および Nd:YLF (351nm))を照射し、電界放出電流および光電界放出電流をピコアンメータで時間平均計測する。

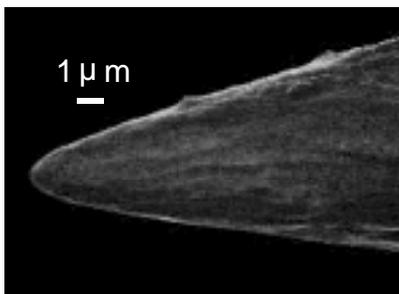


図2 ニードルカソード先端のSEM写真

3.2 F-N理論を用いた電子放出領域の評価

電界放出電流は電界が集中するニードル先端から放出されると考えられ、Fowler-Nordheim理論を用いて先端半径(電子放出領域)を評価した[2-3]。F-N理論に電界放出電流の理論式は次式のように示されている。

$$j = \frac{e^3 E^2}{8\pi h \phi_s(y)^2} \exp\left[\frac{8\pi\sqrt{2m_e}\phi^{1.5}}{3heE} v(y)\right] \quad (1)$$

e は電子電荷、 E は電界強度、 h はプランク定数、 ϕ は仕事関数、 m_e は電子質量、 $t(y)$ および $v(y)$ は y の関数である、ただし $y = [e^3 E / 4 \phi_0]^{1/2}$ 。F-N理論

のフィッティングから求めた先端半径は、SEM写真から求めた目視で推定した先端半径と比較すると、ファクター2以下で一致している。

3.3 ニードル先端の量子効率の電界強度依存性

印加電圧を増加させた場合に、ニードル先端からの光放出電流が急増した。F-N理論から求めた先端半径を用いて先端の電界強度を推定すると、ニードル先端の量子効率が電界強度依存性、電界強度の4.5乗程度に比例することが分かった(図3参照)。Nd:YAGレーザーを照射した場合、電界強度が約2.6GV/mで量子効率が10%を超えた。またNd:YLFレーザーを照射した場合、ニードル先端における電

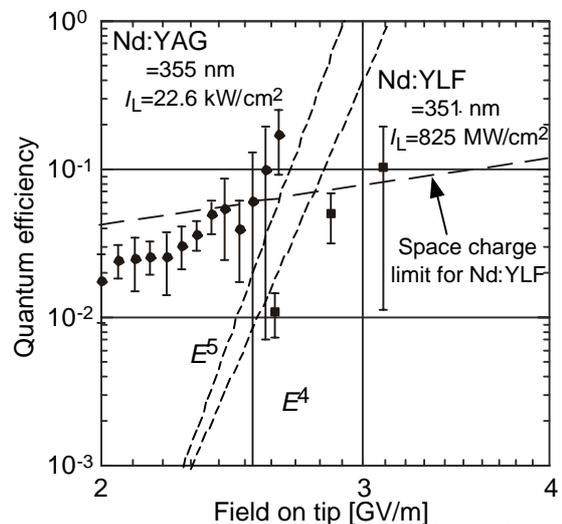


図3 量子効率の電界強度依存性

流密度は $24\text{MA}/\text{cm}^2$ に達した。

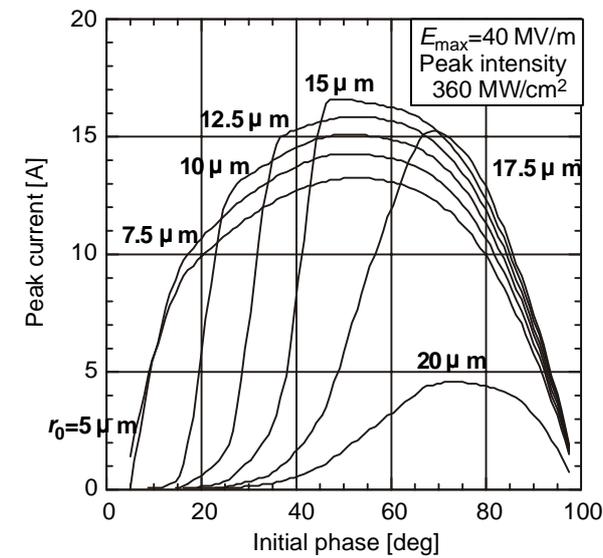
4. LEENAにおける

ニードルカソードの動作条件

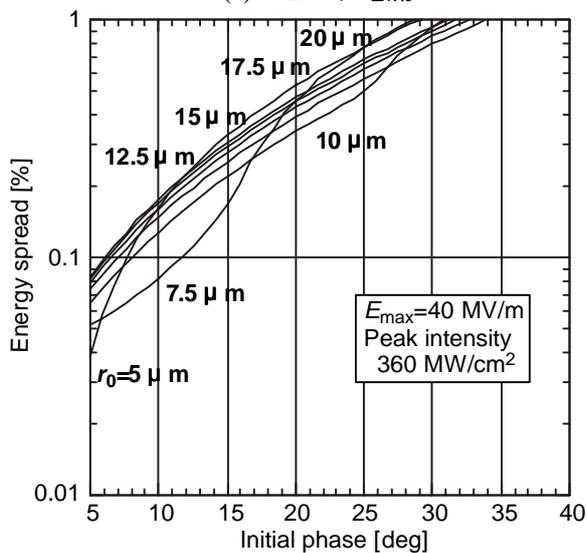
ニードルカソードをLEENAの電子源としてに用いる場合に、RFによる各パラメータの時間変化を考慮する必要があり、次のようにLEENAにおけるニードルカソードの動作条件を評価する。

4.1 電子ビームの加速特性

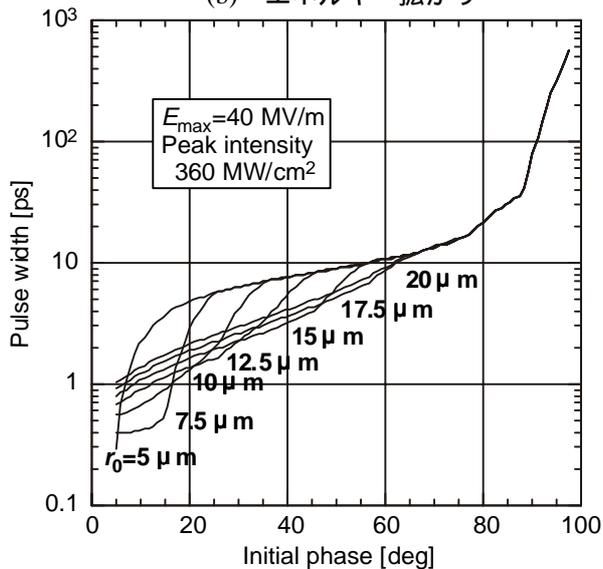
ニードル先端および加速管内では 2856 MHzのRFが定在しており、量子効率の時間変化および電子ビームの加速特性を考慮して、モードロツ



(a) ピーク電流



(b) エネルギー拡がり



(c) パルス幅

図4 電子ビームパラメータのRF加速特性

によって、ニードルカソードおよびレーザー照射位相 (initial phase) に対する、電子ビームのピーク電流・エネルギー拡がり・パルス幅の依存性を評価した。図4に各電子ビームパラメータの特性を示す。ここでの動作条件は、initial phaseは0-30 deg、先端半径は12.5 μm以下となる。

4.2 ニードル先端の熱問題

レーザー加熱およびジュール加熱によって、ニードル先端温度が変化することが予想される。これはニードルカソードを用いる上で本質的な問題であり、ニードル先端半径の下限を決める。計算結果から、先端半径が10 μm以下では先端温度上昇度が数百度に達する。

5. まとめ

姫路工大高度研では、遠赤外自由電子レーザー用の高出力化を目指して、高輝度ニードル光陰極の研究を行っている。

数GV/m程度の高電界領域において、量子効率が電界強度の4-5乗に比例する。Nd:YAG (355nm)を照射した場合、2.6GV/m程度で量子効率が10%を超えた。ピーク強度825MW/cm²のNd:YLF(351nm)を照射した場合、ニードル先端での電流密度が24MA/cm²に達した。

ニードルカソードを線形電子加速器LEENAの電子源として用いる場合の動作条件を求めた。ここでは数値計算によって、RF加速特性およびニードル先端の熱問題を考慮した。ニードル先端半径としては10-12.5 μm、またinitial phaseは0-30degと求められた。

参考文献

- [1] M. Boussoukaya, et al., "High Quantum Yield from Photofield Emitters". Nuclear Instrum. Methods A279, 405 (1989).
- [2] C. A. Spindt, et al., "Physical Properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones". J. Appl. Phys. 47, 5248 (1976).
- [3] R. D. Young, "Theoretical Total-Energy Distribution of Field-Emitted Electrons". Phys. Rev. 113, 110 (1959).

ク Nd:YLF を照射する必要がある。簡単な数値計算