

光陰極電子銃による高輝度電子ビームの研究

— LINAC-FEL用ニードルRF電子銃の開発 —

(共同研究報告)

2000年3月

姫路工業大学
核燃料サイクル開発機構

本資料は、姫路工業大学と核燃料サイクル開発機構との共同研究の成果として、作成されたものです。

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319 - 1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute),
姫路工業大学 (Himeji Institute of Technology)
2000

光陰極電子銃による高輝度電子ビームの研究
—LINAC-FEL用ニードルRF電子銃の開発—
(共同研究報告書)

望月孝晏*、宮本修治*、天野壮*、井上隆博*、八束充保**
山崎良雄***、野村昌弘***、長谷川信***

要 旨

本報告書は、姫路工業大学と核燃料サイクル機構が、光陰極（フォトカソード）電子銃による高輝度電子ビームの研究に関して、共同で実施した研究成果をとりまとめたものである。

本研究の目的は、光電子放出（フォトエミッション）型電子銃を用いて高品質電子ビームを発生するために、電子銃の特性とダイナミクスを計算機シミュレーションおよび実験研究により調べ、フォトエミッション型電子銃の応用の可能性を評価することである。

電子ビーム品質の改善・高輝度化は、自由電子レーザー（Free Electron Laser : FEL）等の応用上、性能を決定する主要な項目で各種の方法が試みられている。レーザーフォトカソードを用いた電子銃は、短パルスレーザーによる制御性の増加も加えて、電子銃の大きな改善を可能とすると期待されている。フォトカソードを利用する電子源は、古くから利用されてきているが、近年の安定なモードロックレーザー技術の進歩により、高周波（RF）電子銃に安定に同期した発生が可能となり、新しい展開が開けている。本研究では、フォトエミッションをニードルカソード先端の高電界の元で行うことにより、フォトエミッションの量子効率の大幅な改善が行われることを、実験的に示し、それを用いたRF電子銃の計算機シミュレーションによるパラメーターサーベイを行った。

* 姫路工業大学 高度産業科学技術研究所

** 姫路工業大学 工学部

*** 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター システム技術開発部
ビーム利用技術開発グループ

Study of High Brightness Electron Beam by an Electron Gun of the Photoemission

- Development of RF Gun with Needle-Cathode for LINAC-FEL-

T. Mochizuki*, S. Miyamoto*, S. Amano*, T. Inoue*, M. Yatsuzuka**

Y. Yamazaki***, M. Nomura***, M. Hasegawa***

ABSTRACT

This report describes the results of fundamental study of high brightness electron beam by an electron gun of the photoemission, which was made under the collaboration between Himeji Institute of Technology (HIT) and JNC.

The purpose of this study is to survey the possibility of photoemission-gun, which is attractive to get high quality electron beam. To attain the objective, we investigated the characteristics of the gun and dynamics of the beam from the gun by using both computer simulation and experimental approach.

Many efforts to improve the beam quality and enhance the beam brightness have been made for main factors to influence the performance of the linac in order to establish the applications of free electron lasers. The laser-driven photocathode guns are expected to improve electron sources effectively because of progress the control technology of the short-pulse laser. Although electron sources using photoemission were applied for injectors over the past ten years, the advantage of laser-driven rf-gun is recognized recently to synchronize stable the timing of laser with the timing of the rf-cavity by mode-lock laser technology. In this study, we investigated enhancement of the photoemission quantum efficiency from needle cathode applied high electric field and could get some parameters to enhance the efficiency by using both computer simulation and experimental approach.

* Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry (LASTI), Himeji Institute of Technology (HIT)

** Faculty of Engineering, Himeji Institute of Technology (HIT)

*** Japan Nuclear Cycle Development of Institute (JNC) O-arai Engineering Center,

System Engineering Development Division, Beam Technology Development Group

目次

1. はじめに	-----	1
2. 電子線形加速器 LEENA	-----	1
3. ニードルカソードの製作	-----	5
4. 量子効率測定実験	-----	6
4.1 実験方法	-----	6
4.2 ニードル先端の電界強度	-----	8
4.3 ニードル先端半径	-----	8
4.4 光放出（フォトエミッション）電流の測定	-----	10
4.5 量子効率の電界依存性	-----	12
5. LEENA における RF 加速と電子ビームのバンチング	-----	14
6. 熱伝導計算によるニードルの条件	-----	18
7. まとめ	-----	19
8. 参考文献	-----	20

図、表

- Fig.1 小型電子線形加速器 LEENA の研究目的、概略、および基本性能
- Fig.2 FEL のディチューニング曲線
- Fig.3 電解エッチングによるタンゲステンニードルカソードの作製
- Fig.4 量子効率測定実験配置図
- Fig.5 電界放出（フィールドエミッション）電流の電圧依存性
- Fig.6 フォトエミッションとフォトフィールドエミッションの模式的説明
- Fig.7 2種のレーザー照射について、電界強度に対する量子効率の依存性
- Fig.8 LEENA の RF 電子銃加速空洞形状
- Fig.9 RF 電子銃加速空洞内の電界強度分布
- Fig.10 RF 電子銃空洞終端でのピーク電流
- Fig.11 RF 電子銃空洞終端でのエネルギー拡がり
-
- Table.1 LEENA の性能と使用する RF 電子銃の運転モード
- Table.2 実験に使用したレーザーのパラメーター

1. はじめに

広範囲な発振波長の可変性は、自由電子レーザー (Free-electron laser: FEL) の特性であり、これまで高出力レーザー光源には無かった遠赤外領域において、FEL の応用は新しい知見を生むものと期待されている。現在近赤外 FEL は、半導体の分野においては不純物順位の精密測定、医療分野においては生体組織の選択的振動励起を利用した治療方法の確立など、様々な利用研究が進められており、将来的には高出力かつ高品質な近赤外から遠赤外 FEL が必要となると考えられる。

FEL の高出力化のためには、エネルギー拡がりの小さい高輝度電子ビームを準備する必要がある、本研究ではそのための一方法として、高電界光放出 (フォトフィールドエミッション) 電子銃を利用することを検討し、実験的に調べ、その機構モデルの検討を行った。これは、従来光放出 (フォトエミッション) 電流の増加を、(1) 照射レーザー強度を増加する、(2) 放出面積を大きくする、あるいは (3) 量子効率の高い物質を探すことで解決することが調べられてきた。(1) に関しては、物質のレーザー耐力の上限、(2) はエミッタンス増大による制限、また、(3) では、取り扱いやすく、長寿命の物質が見つからないため、(4) 番目の方法として、レーザー耐力が強く、取扱易いが容易であるが、量子効率が低い ($\eta < 10^{-4}$) タングステンを用い、高電界で光放出させることで量子効率を改善させ、高輝度化の可能性を調べた。高電界による量子効率上昇を示唆する実験がいくつかあるが[1,2]、GV/mの領域での明確な実験が存在しないため、基礎データの取得から行った。

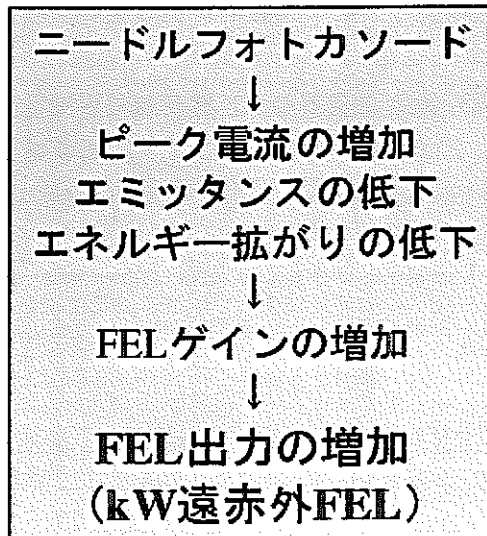
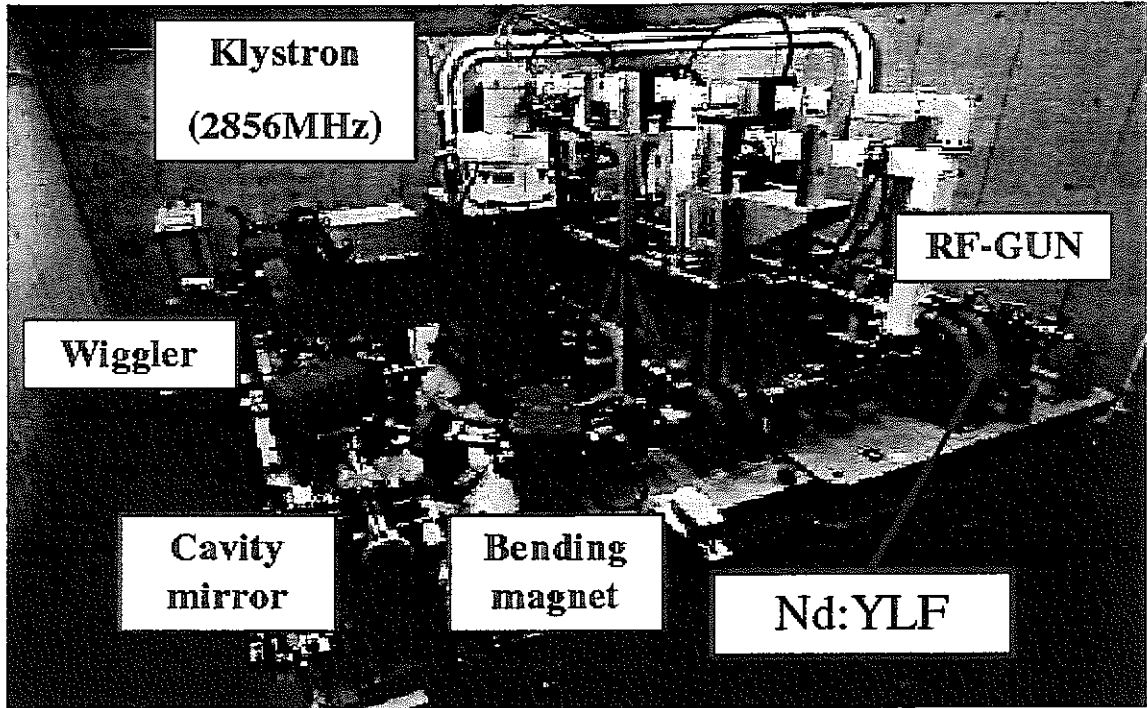
電子銃としては、現有電子線形加速器の RF 電子銃 (平均電界強度 ~ 40 MV/m) を想定し、RF 電子銃内で半径 10 ミクロン程度のエミッション面積を考えて、外部での予備実験には、先端半径 $0.1\sim 0.5 \mu\text{m}$ のニードルカソードに平均電界 2MV/m を印加し光励起高輝度電子線源の試験を行った。

2. 電子線形加速器 LEENA

小型電子線形加速器 LEENA (Laser emitted electron accelerator、RF=2856MHz) の研究目的、概略、および基本性能を Fig.1 に示す。熱電子モードでは、RF 電子銃に LaB₆[100] 平面カソード用い、カーボンヒータで 1400° 程度に加熱し、マクロパルス (パルス幅 $4 \mu\text{s}$ 、繰り返し 1-10Hz) 平均で 100mA の電子ビームを発生できる。17 段の追加速段の RF パワーを調整することにより、4~15MeV 範囲でエネルギー可変である。熱電子では、ピーク電流 (<1A) はあまり取れず、エミッタンス ($10 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ (@5.4 MeV))、エネルギー拡がり (1.8%) は大きいため、FEL 運転にはフォトカソードを用いた (Table.1)。

研究目的：FEL高出力化

電子線形加速器 (LEENA) を用いた遠赤外自由電子レーザー (10~100 μm) の高出力化のための高輝度電子線源の開発



$$I_{\text{peak}}=3\text{A}, \Delta E/E<1.3\%, \tau=14\text{psec}$$

$$\varepsilon_x=4.6, \varepsilon_y=2.1 \pi \text{ mm mrad}$$

$$\longrightarrow G \sim 1\%, P_{\text{FEL}} < 1\text{mW}$$

Fig.1 小型電子線形加速器 LEENA の研究目的、概略、および基本性能

RF電子銃	Photo & Thermal cathode
加速エネルギー	4~15 MeV
RF周波数	2856 MHz
モードロックレーザー	Nd:YLF 89.25 MHz (32分周)
	マイクロパルス幅 10~15 psec (5~10 μ J)
ウィグラ	ハルバッハ型 (Nd-Fe-B)
	16 mmピッチ / 50極
	2~6.6 KG (K = 0.31~0.98 : 可変)
キャビティ	金コート凹面鏡 (共振器長L = 3359 mm)

	熱陰極運転	光陰極運転
ピーク電流	(~2 A)	(>10 A)
マイクロパルス幅	(~20 ps)	(~15 ps)
エミタンス ϵ_x	10.2 π mm \cdot mrad	4.6 π mm \cdot mrad
ϵ_y	7.8 π mm \cdot mrad	2.1 π mm \cdot mrad
エネルギー拡がり	1.8 %	<1.3 %
繰り返し周波数	1 Hz	10 Hz

Table.1 LEENA の性能と使用する RF 電子銃の運転モード

LaB6 平面フォトカソードに RF 周波数の 1/32 分周 (89.25MHz) にモードロックした Nd:YLF レーザーの 3 倍高調波 (波長 351nm、マイクロパルス幅 16psec、マイクロパルスエネルギー数 μJ) を照射し、 $4.6\pi\text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (@5.4 MeV) のエミッタンスで、ピーク電流 2.6A、エネルギー拡がりは 1.3%以下を得ている。この電子ビームを追加速空洞で 5.4MeV まで加速し、 45° 偏向磁石×2 台のあとに、波長 16mm、周期数 50 のハルバッハ型ウイグラーに通し、3.36m 間隔に設置した光共振器により、 $65\text{-}75\mu\text{ m}$ の遠赤外 FEL を実現している[3,4]。Fig.2 に FEL のディチューニング曲線を示す。現在の所、FEL 出力は mW のオーダーで、電子ビーム性能に制限されている。高出力化には、電子ビームのピーク電流増加とエミッタンスの改善 (高輝度化) に加え、エネルギー拡がりを押さえることも必要である。

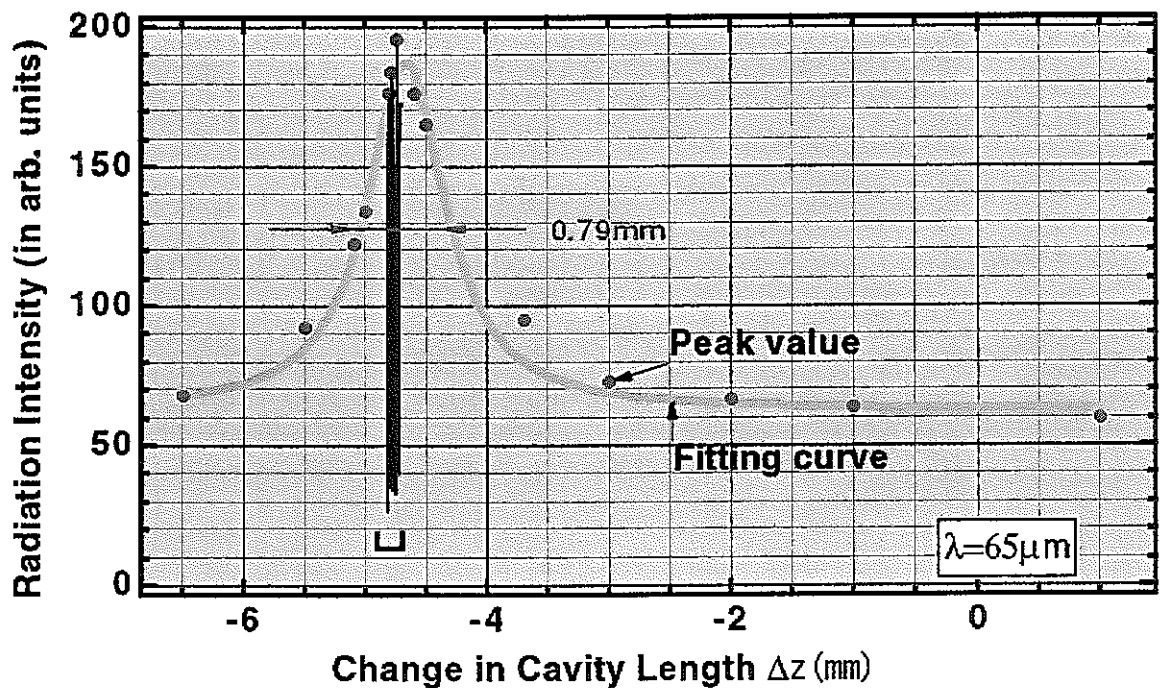


Fig.2 FEL のディチューニング曲線

3. ニードルカソードの製作

カソード材料としては高融点・高強度のタングステンを選択した。直径 $100\mu\text{m}$ のタングステン線を、1~2 規定の水酸化ナトリウム水溶液 (NaOHaq) 中で電解エッチングを行い、先端半径 $0.1\sim 0.5\mu\text{m}$ 程度のニードルカソードを製作した(Fig.3)。実験では先端半径の異なるいくつかのニードルカソードを用いた。

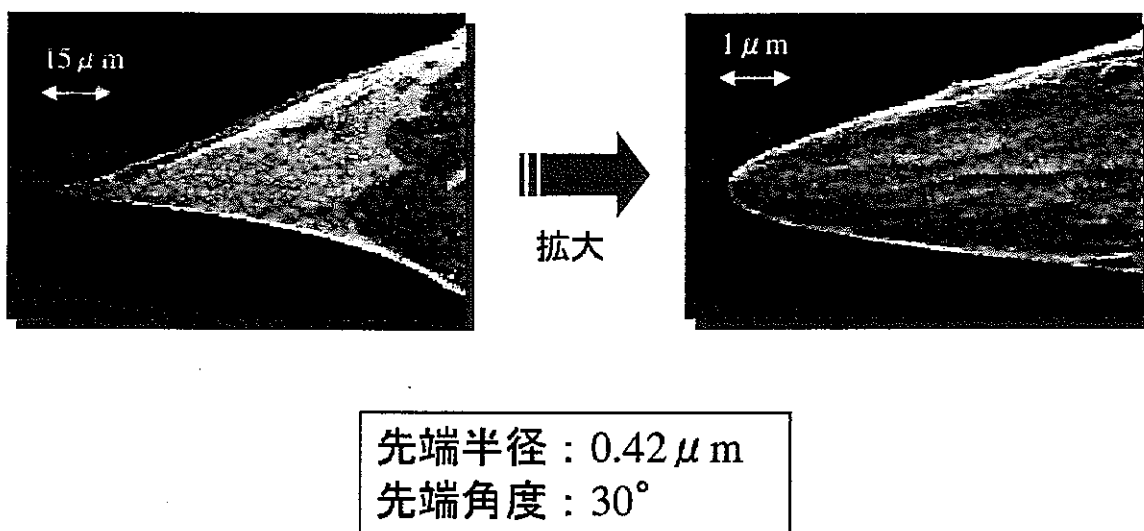


Fig.3 電解エッチングによるタングステンニードルカソードの作製

4. 量子効率測定実験

4.1. 実験方法

実験配置図を Fig.4 に示す。 10^{-9} Torr 以下の超高真空中において、ニードルカソードとアノードとの間に DC 電圧（最大 3kV）を印加し、ニードル正面からパルスレーザーを照射する。放出電流はピコアンメータで測定する。

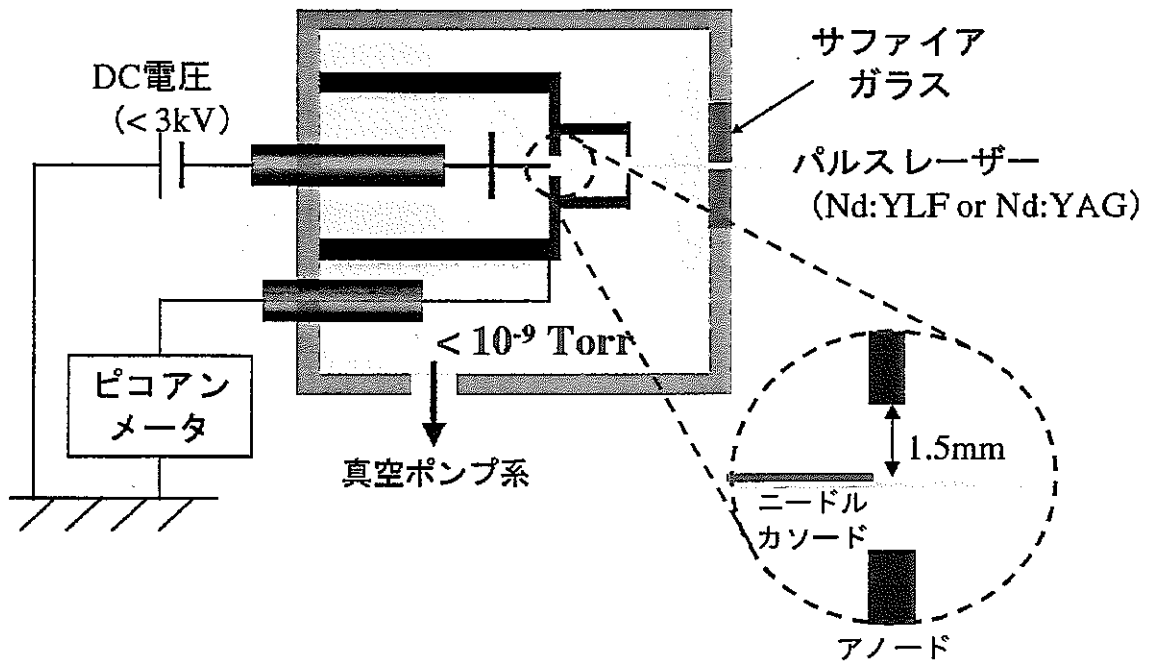


Fig.4 量子効率測定実験配置図

照射するレーザーは Nd:YLF レーザーの 3 倍高調波 (351nm) と Nd:YAG レーザーの 3 倍高調波 (355nm) のパワーレベルの異なる 2 つのレーザーを用いた。Nd:YLF レーザーは、マイクロパルス幅 10psec、パルス間隔 11.2nsec、マクロパルス幅 10 μ sec、繰り返し周波数 10Hz のパルス構造をしており、平均パワーとしては数 mW である。Nd:YAG レーザーは、パルス幅 30nsec、繰り返し周波数 15kHz の連続パルスレーザーで、平均パワーは 2W 程度 (ピーク強度としては約 22.6kW/cm²) である。Table.2 にレーザーのパラメーターをまとめる。

1) Nd:YAG レーザー

波長	355	nm
レーザー径	220	μ m ϕ (アパーチャー径)
ピーク強度	23	kW/cm ²
時間平均強度	10	W/cm ²
パルス幅	30	nsec
duty比	4.5×10^{-4}	

2) Nd:YLF レーザー

波長	351	nm
レーザー径	140	μ m ϕ (フォーカスポイント)
ピーク強度	660	MW/cm ²
時間平均強度	59	W/cm ²
パルス幅	10	psec
duty比	$\sim 10^{-7}$	

Table.2 実験に使用したレーザーのパラメーター

4.2. ニードル先端の電界強度

量子効率の電界強度を調べるに当たり、まずはニードル先端の電界強度の評価を行う必要がある。ニードル先端における電界の増強の度合いを表す指標として、電界集中係数 (Field enhancement factor) β がある。同心球電極を考えた場合、 β は次式で表せる。

$$\beta = \frac{r_a}{r_0}$$

ここで、 r_a はアノード開口半径 ($r_a=1.5\text{mm}$)、 r_0 はニードル先端半径である。

4.3. ニードル先端半径

DC 電圧を増加させると、通常の電界放出電流 (Field emission current) I_e が増加する。ニードルカソードあるいはスピントカソードのような、マイクロエミッタからの電界放出電流は、Fowler-Nordheim 理論によって以下の様な理論式が示されている [5]。

$$J_{FN} = \frac{e^3 E_0^2}{8\pi h \phi t^2} \cdot \exp\left[\frac{-8\pi\sqrt{2m_e}\phi^{1.5}}{3heE_0} v\right]$$

ここで、 e は電子電荷、 h はプランク定数、 ϕ は仕事関数、 E_0 はニードル先端の電界強度である、 $E_0 = \beta [V_0 / (r_a - r_0)] \approx V_0 / r_0$ 。また t および v は仕事関数に対するポテンシャル障壁低下の比 y の関数である。

$$y = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0}} \cdot \frac{\sqrt{e^3 E_0}}{\phi}$$

Fig.5 の実曲線に電界放出電流の電圧依存性を F-N プロットで示す。電子放出面積としては πr_0^2 として、先端半径を変化させて、光照射無しの場合 (■データ) にフィッティングを行った結果、この場合のカソードの先端半径は、 $0.185\ \mu\text{m}$ と求まる。

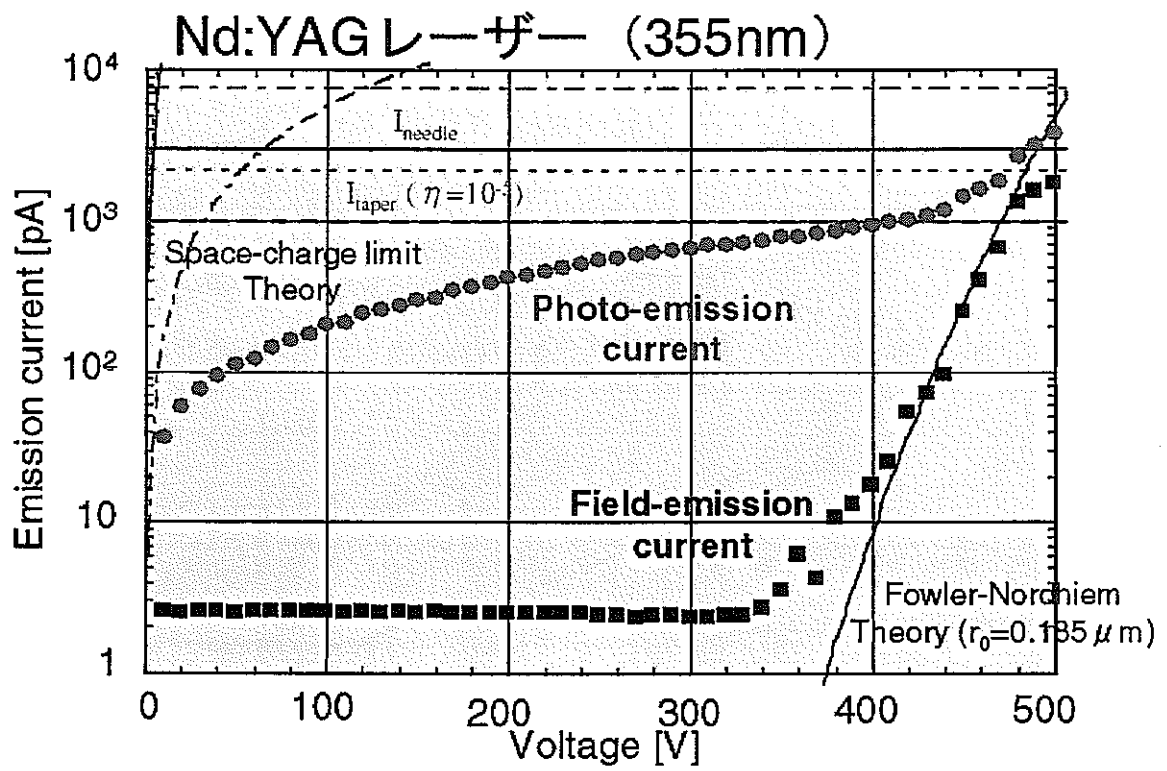


Fig.5 電界放出（フィールドエミッション）電流の電圧依存性

4.4. 光放出（フォトエミッション）電流の測定

Fig.6 に光放出（フォトエミッション）と光電界放出（フォトフィールドエミッション）の模式的説明を、カソード表面近傍のポテンシャル分布として示す。ニードル先端は電界が集中しており、カソード表面近傍のポテンシャル障壁が低下し（ ΔW ）、実効的工作関数が減少する。光子エネルギー $h\nu$ を吸収して励起された電子は、ポテンシャル障壁を乗り越えて、あるいはポテンシャル障壁を透過して真空中に放出される。前者は古典的な光放出電流（Photo emission current：PE）であり、後者は高電界によるトンネル効果であるので仮に光電界放出電流（Photo-field emission current：PFE）と呼ぶ。実験でのフォトエミッション電流は両者の和を意味しており、レーザー照射による放出電流の増分である。

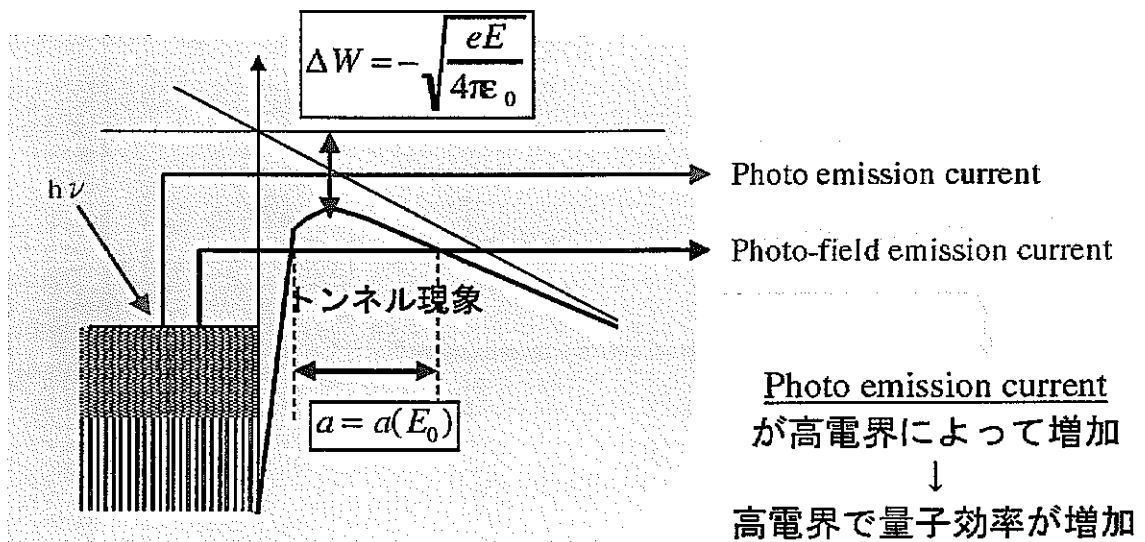


Fig.6 フォトエミッションとフォトフィールドエミッションの模式的説明

Fig.5 に、レーザー照射前後で測定された放出電流の電圧依存性を示す。Nd:YAG レーザーを直径 $220\mu\text{m}$ のアパーチャーで切り出して照射した。印加電圧 350 ボルト付近から、電界放出電流が増加している。ここで、注意すべき点は、光照射無しで発生する電界放出は、電圧印可が直流的であるため、直流的に発生するが、PE および、PFE は照射レーザーのデューティー比で観測電流は低下する。従って、レーザー照射中のピーク電流は、グラフの電流値の $1/(4.5\times 10^{-4})$ 倍となる。

Nd:YAG レーザーのピーク強度は低いですが平均パワーが高いので、このレーザーによる照射実験では、ニードル以外の部分からの光放出電流も観測されている。これは、低い電圧でのゆっくりした電流上昇部分である。一方、Nd:YLF レーザーの実験では、ピーク強度が Nd:YAG レーザーに比較して 4 桁以上強いため、ニードル以外からの光放出電流は、空間電荷制限電流によって制限され、ニードル先端部からの放射に比較して小さくなり観測されていない。

4.5. 量子効率の電界依存性

測定された光放出電流から、ニードル先端から放出された成分 I_{pe} を取り出し、量子効率 η を次式によって求める。

$$\eta = \frac{I_{pe}}{e} \left[\frac{I_L \cdot \pi r_0^2}{hc/\lambda_L} \right]$$

ここで、 I_L は照射するレーザーの平均強度、 c は光速、 λ_L はレーザー波長である。Fig.7 に、2種のレーザー照射（先端半径の異なる）について、電界強度に対する量子効率の依存性を示す。両実験の量子効率の依存性は、多少シフトしているが、ほぼ一致していると言える。ずれは、別のニードルを用いたため、表面の不純物による仕事関数の低下の違いが影響していると考えている。

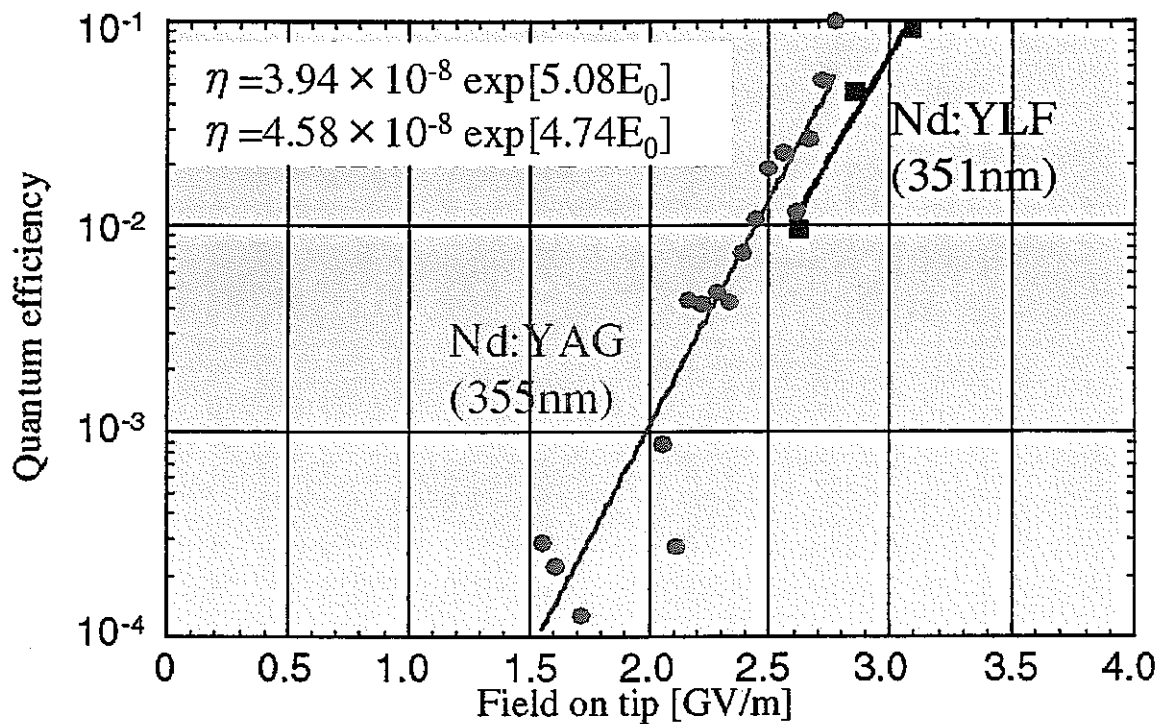


Fig.7 2種のレーザー照射について、電界強度に対する量子効率の依存性

各フィッティング曲線の傾きはほぼ同一と考えられ、電界強度に対する依存性は次式のように表せる。

$$\eta \cong 4 \cdot 10^{-8} \cdot \exp[5 \cdot E_0 [GV/m]]$$

各係数は、この実験結果から求めた値であり、Fig.6 の模式図をもとに、実験結果の量子効率の電界強度依存性を説明できる物理的モデルを現在検討中である。

5. LEENA における RF 加速と電子ビームのバンチング

RF によって加速された電子ビームは、RF 電子銃空洞で数百 keV になり、バンチングはほぼ RF 電子銃空洞において決定される。そこで、ニードルカソードをから放出される光放出電子ビームのバンチング特性を計算し、RF 電子銃空洞終端でのビームパラメータを一次元計算機シミュレーションにより調べた。Fig.8 のような RF 空洞にニードルを挿入する。RF 電界は、LEENA の RF 電子銃に対して計算されている、Fig.9 の電界分布を用いた。パラメータとして、レーザー入射タイミングの RF 位相角と、ニードル先端の半径を取った。

Fig.10 および、Fig.11 に入射位相角度に対する、ピーク電流および、発生電子ビームのエネルギー拡がりを示す。

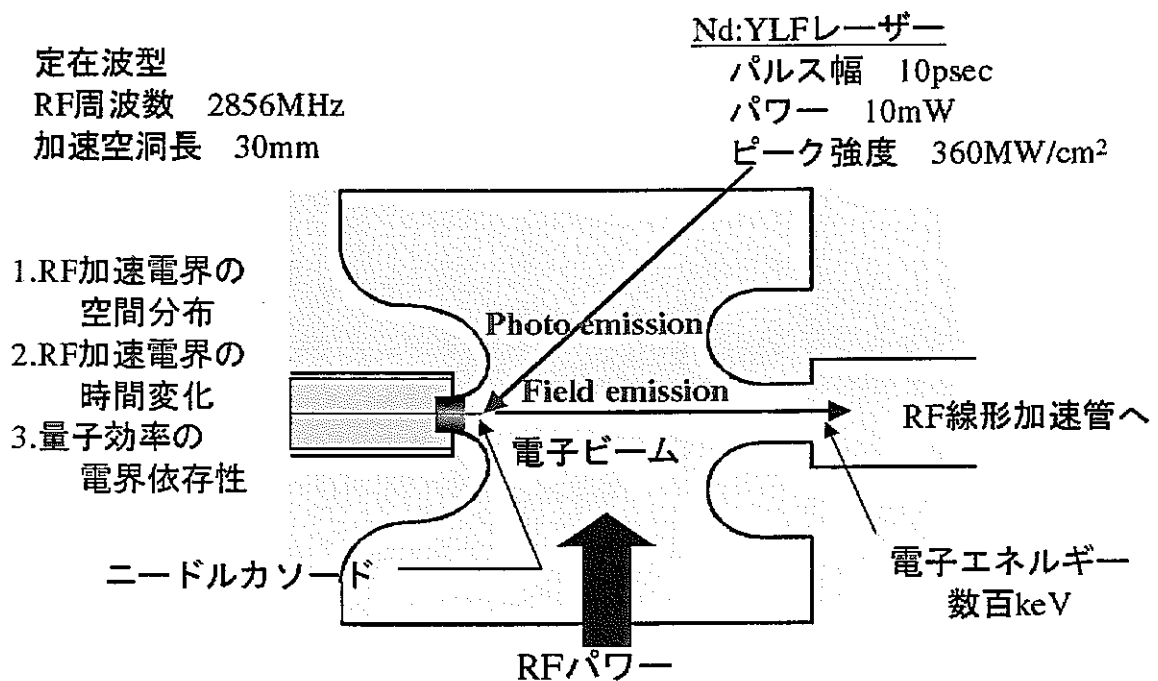


Fig.8 LEENA の RF 電子銃加速空洞形状

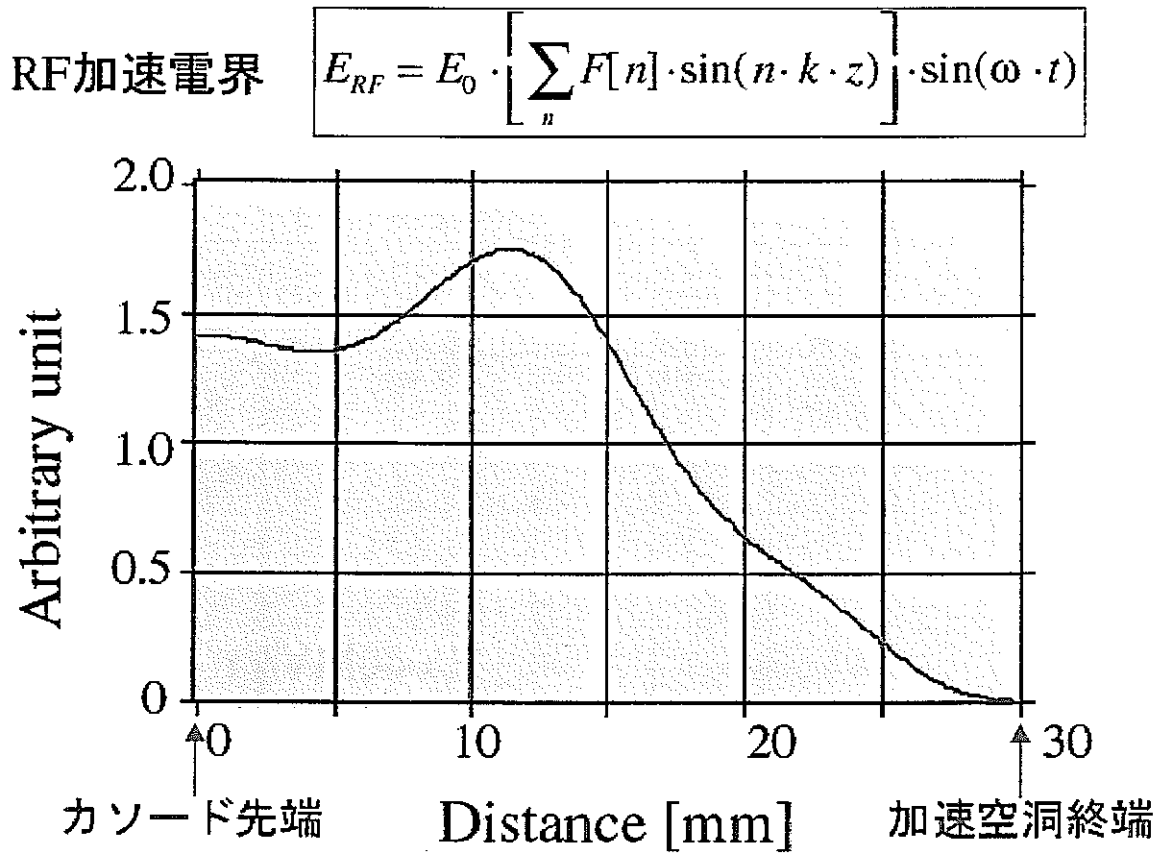


Fig.9 RF 電子銃加速空洞内の電界強度分布

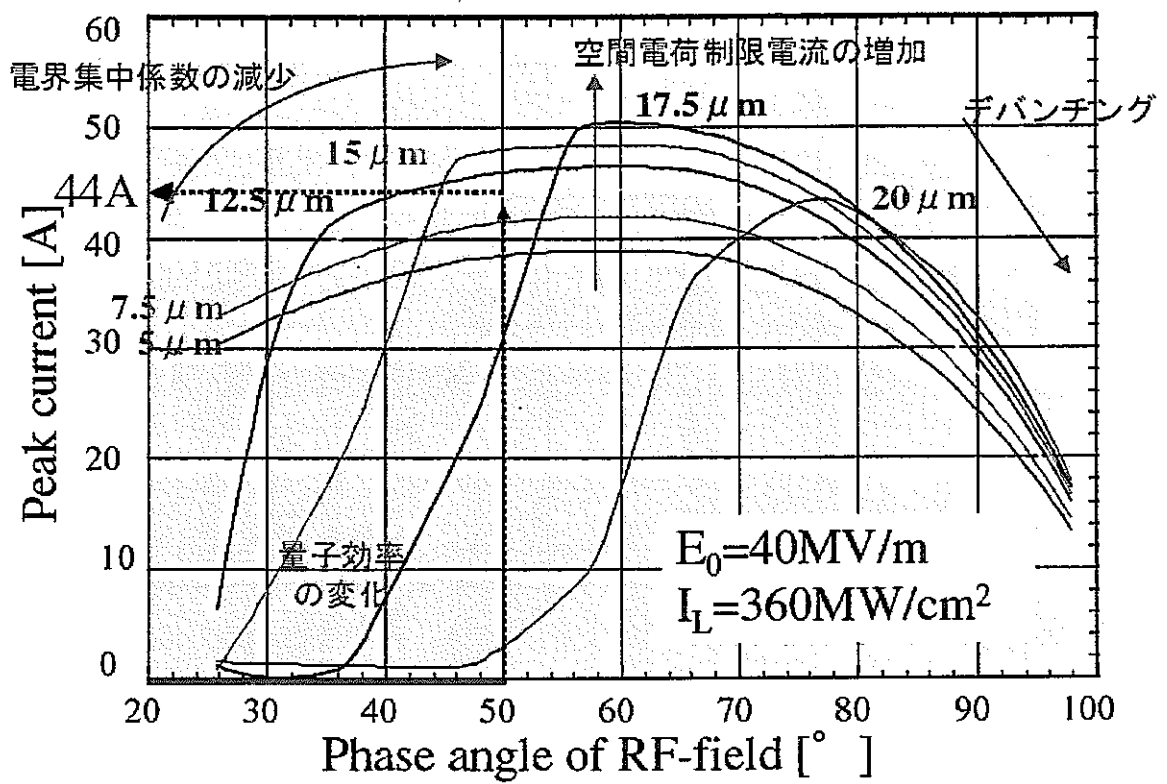


Fig.10 RF 電子銃空洞終端でのピーク電流

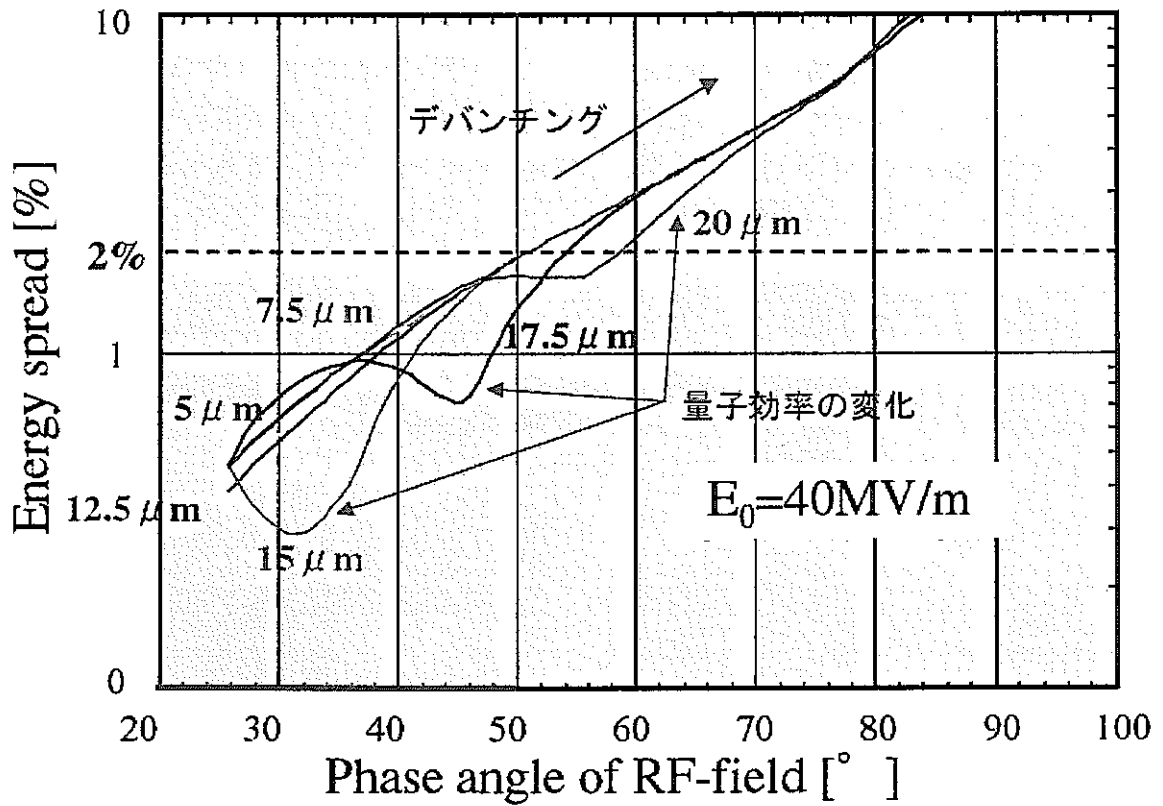


Fig.11 RF 電子銃空洞終端でのエネルギー拡がり

6. 熱伝導計算によるニードルの条件

ニードルカソード先端は電流密度が高くなり、ジュール加熱による温度上昇が顕著に現れる。従って、熱問題によるニードルカソードの利用範囲の制限を考える必要がある。ここでは、光励起フォトカソードとして利用するため、レーザーエネルギーの吸収による温度上昇も考慮に入れた。

計算のモデルとして、円筒座標系で1次元熱伝導を考え、半径方向には均一と仮定した。表面からの熱輻射による冷却効果は無視し、電流はニードル先端の半球のみから放出されるものとする。ニードルに印加される電界は、LEENAのRF加速電界と同じとし、モードロックレーザー(32分周)を照射する。ピークレーザー強度は 360 MW/cm^2 で、波長は 351 nm とする。放出電流は光放出電流とRF電界放出電流とし、空間電荷制限を受けるものとする。温度が 1000°C 以上にならない条件を用いると、ニードル先端半径の下限が $9 \mu\text{m}$ と求まる。

7. まとめ

- (1) ニードルカソードのフォトフィールドエミッションによる量子効率の電界依存性が観測できた。
- (2) この依存性を用いて、RF 電子銃の運転を評価すると、現状の平面フォトカソードと比較しても高い輝度の電子ビーム発生が可能であると見積もられた。今後、材料依存性と、照射レーザー波長に対する依存性を求め、発生モデルの定量化を行う必要がある。

参考文献

- [1] M. Boussoukaya, H. Bergeret, R. Chehab, B. Leblond, and J. LE DUFF, Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. A 279 (1989) 405.
- [2] T. Srinivasan-Rao, J. Fischer, and T. Tsang, J. Appl. Phys. 69 (1991) 3291.
- [3] T.Mochizuki, S.Miyamoto, S.Amano, M.Niibe, "First Lasing of LEENA Free Electron Laser at LASTI", FREE ELECTRON LASER 1996, G.Dattori, A.Renieri(eds.), II-47, 1997 Elsevier Science B.V.
- [4] 姫路工大高度研における赤外線自由電子レーザー、宮本修治、望月孝晏、日本赤外線学会誌、第7巻1号、6月、pp.73-78 (1997)
- [5] E. L. Murphy, and R. H. Good, Jr, Phys. Rev. 102 (1956) 1464.