

Development of a field-emission electron gun using carbon-nanotube cathode (3)

Y.Hozumi[†], S.Ohsawa, T.Sugimura, M.Ikeda
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, JAPAN

Abstract

Development of an efficient pulsed electron gun utilizing cold cathode, which based on well-crystallized carbon-nanotube (CNT) has been proceeded. At this conference in 2005, we reported the CNT-gun would achieved a high-density current as we had intended. But later, the Fowler-Nordheim(F-N) plot and high resolution microscope observation made clear a large number of decreases CNTs from its substrate when high electric field was applied. For achieving highly-density current, such as 100 A/cm², rising up acceleration voltage and narrowing down distance between grid and anode electrodes are necessary. This report describes a method to evaluate a number of field emission sites on the cathode surface and future arrangements for CNT-gun toward high-density current.

カーボンナノチューブ冷陰極を持つ電界放出電子銃の開発 (3)

1. はじめに

次世代加速器における高輝度大電流ビーム生成の重要性に鑑み、カーボンナノチューブ(CNT)冷陰極を用いた数 ns パルス電子銃の開発を進め、100 kV ビーム加速試験で大電流密度と長寿命性を実証してきた^[1-2]。しかしながら、この電子銃を用いて100 A/cm² 領域の試験をするには、加速電圧を100 kV から 190 kV に上げ、グリッド・アノード電極間の距離を 34.5 mm から15 mm に縮小させること、さらにCNTと基板との結合を強化することが不可欠であることが分かった。これらを実施すれば、カソード面からのCNT消失が抑制され、カソード特性が顕著に改善されるだけでなく、グリッド・アノード間の空間電荷が除去され、CNT電子銃の大幅な性能向上が期待できる。

2. CNT電子銃試験

2.1 CNT冷陰極の特性変化に関する考察^[3]

CNTカソードの電子放出サイトはすべてCNTであると考えるので、実際の系では、電流密度*i*は、カソードから放出される全電流 *I* をCNTの占める総面積 *S* (= *Nσ*) で割ったものとなる。*N* はCNTの本数で、*σ* はCNTの断面積である。いま、F-Nの式に *i* = *I*/*Nσ* を代入し、式を変形すると次式を得る。

$$\ln\left(\frac{I}{E^2}\right) = -\left(\frac{C_2}{\beta}\right)\frac{1}{E} + (2\ln\beta + \ln C_1 N \sigma)$$

E (MV/m)は電界強度、*β* は電界増倍係数、*C*₁および*C*₂は *φ* (eV)を仕事関数として、以下のようになる。電子放出中も*φ* が変わらないものとして取り扱えばこれらは定数となる。以下の計算では*φ* = 4.5 eV を用いる。

$$C_1 = 1.54 \times 10^2 / \phi, C_2 = 6.83 \times 10^3 \phi^{3/2}$$

ここで、F-N式の右辺の定数を*a*, *b*とすると *β* と*N* は次のように表せる。

$$\beta = \frac{C_2}{a}, \quad C_1 N \sigma = \left(\frac{a}{C_2}\right)^2 \exp(b)$$

F-N plot上の *y*₁=*a*₁*x*+*b*₁ と *y*₂=*a*₂*x*+*b*₂ の2本の特性を比較する際、*β* と*N* の比を取れば

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{a_1}{a_2}, \quad \frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 \frac{\exp(b_2)}{\exp(b_1)}$$

となり、F-N plotから得られる1次式の傾きとその切片から、電界増倍係数の変化と電子放出サイト数の議論が可能となる。

図1に成膜面積2.6mm^φのCNT冷陰極を用いた電子銃試験で得られたF-N plotを示す。横軸は 1/*E*、縦軸は ln(*I*/*E*²) である。試験を進めて行く内に、特性が(1) (2) (3)と変化した。(1) (2)では、電子放出サイトが(1)と比べて15% まで減少したが、(2) (3)では25% まで回復した。(1) (2)および(1)

(3)で見られる電子放出サイトの減少は、文献[2]で確かめたように、強電界印加によってCNTが基板から飛散したことを表しており、特性が左下方向にシフトしているのは、(1) (2) (3)と試験を進めるにつれて電界強度を上げたからである。

ちなみに電子放出サイトの総面積は、CNTの断

[†]e-mail : yasufumi.hozumi@aist.go.jp

現所属：産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門
レーザー微細加工研究グループ

面積 σ とCNTの数 N の積であり次の通りである。

$$N\sigma = \frac{1}{C_1} \left(\frac{a}{C_2} \right)^2 \exp(b) = \frac{1}{C_1 \beta^2} \exp(b)$$

この値をカソード面積で除する事で、カソード面積に占める電子放出面積が求められる。図1の直線(1)から得られる $a = -27.9$, $b = 2.9$ およびCNTの半径 r (このカソード上のCNTの平均半径を10 nmと仮定)、カソード面積 $A (= \pi R^2)$ から、(1)の状態では $N\sigma = 9.74 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ が求められる。カソード面積は $5.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ であるから、 $N\sigma/A = 1/55$ となり、全カソード面積に占めるCNTの電子放出面積は1.8 %程度であることが分かる。CNTカソード上のCNT数をさらに増やすと電流特性が改善しそだが、文献[4]によればCNT数の過多により個々のCNTへの電界集中が弱まるという、隣接遮蔽効果が現れるため、その最適値 10^7 CNTs/cm² 付近での使用が望まれるとしている。これは、計算機によるシミュレーションと実験結果の両方からの結論である。図1の直線(1)の状態でのCNT数は 3.1×10^8 本であるが、直線(3)の状態では(1)の状態の25%であるから、その数は 7.75×10^7 本となる。CNT数は最適値に近いようであるが、CNT間隔とCNT高さを最適化し、基板との密着性を高める努力によって更にカソード性能が改善される可能性がある。また、カソード上の電子放出器を等間隔にパターン化して作製した試料の評価では、次のCNT間の平均距離の式がCNT間隔値のクロスチェックとして使用できるだろう。

$$\bar{d} = \sqrt{\frac{A}{N}} = \sqrt{\frac{C_1}{\exp(b)}} \beta \pi r R = \sqrt{\frac{C_1}{\exp(b)}} \frac{a \pi r R}{C_2}$$

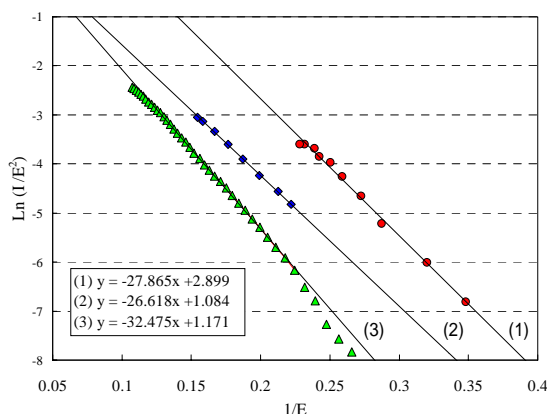


図1: CNT電子銃試験で得られたF-N plot。試験を進めていくうちに、特性は(1) (2) (3)と変化した。グラフの枠中には、それぞれの近似式を示した。近似式のx, yは、それぞれ、 $x = 1/E$, $y = \ln(I/E^2)$ である。尚、成膜面積の違うカソード同士の特性を同一グラフ上に載せる場合は、縦軸の I を単位面積当りの電流密度に換算しなければならないことに注意する。

2.1 CNT電子銃特性

CNT電子銃の加速電圧と放出電流密度の関係を図2に示す。グリッド電位 2.3, 2.6, 2.7 keV における電流密度は、加速電圧を90 kVから120 kV に上げると、それぞれ 0.8, 2.5, 4.2 A/cm² で飽和した。このときのグリッド・カソード間の空間電荷制限電流は、グリッド・カソード間距離 360 μm を用いてChild-Langmuir式から、それぞれ 198, 238, 252 A/cm² である。これらは、各電界強度におけるCNTカソードの電子放出能力に依ることがわかる。無限遠平行平板構造の電子の初速度を考慮した空間電荷制限電流 J (A/cm²) に関するChild-Langmuirの一般式^[3]は以下の通りである。

$$J \approx 2.33 \times 10^{-6} \frac{V_a^{3/2}}{d^2} (1 + \phi_0 / V_a)^{3/2} [1 + 2(\phi_0 / V_a)^{3/4}]$$

d : グリッド・陽極間距離 (cm)

V_a : 加速電圧 (V)

ϕ_0 : 電子の初速度 (eV)

この式から算出した値とグリッド電位3.3 keV の特性を比較して見ると、3.3 keV の特性は90~128 kV の間では電流密度はまだ完全に飽和せず、過渡的な状態であると結論づけることが出来る。

将来の大電流試験のためには、200 kV レベルの加速電位を使用できる系に改造しなければならないことが分かった。

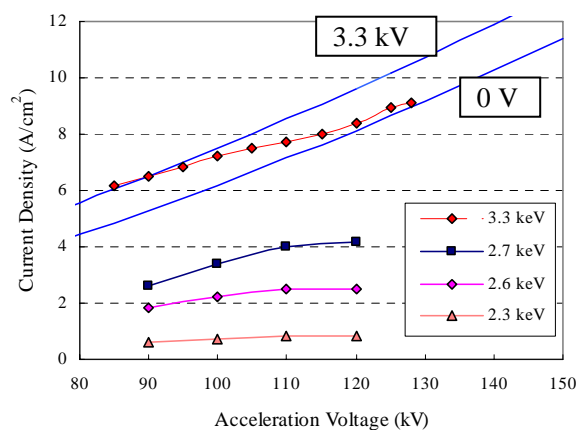


図2: CNT電子銃試験で得られた電流密度の実測値とChild-Langmuir式による計算値の比較。横軸はグリッド・アノード電極間の加速電圧である。図中上方の2本の実線はグリッド電位 3.3 kV, 0 V 時の各加速電圧における最大電流密度の計算値である。

3. 今後の予定

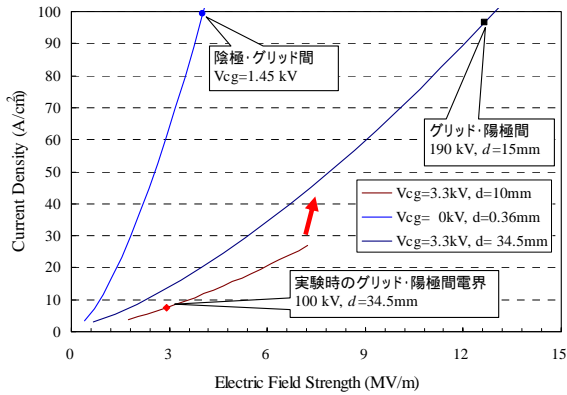


図3: 空間電荷制限電流値と電界強度の関係

図3に空間電荷制限電流値と電界強度の関係を示す。これまで使用してきた 100 kV, $d=34.5$ mm から 190 kV, $d=15$ mm に変更することで電子銃自体は 100 A/cm^2 に到達できる。この改造と同時に CNTカソードの改善も行っていかななくてはならない。グリッド・カソード間の電界強度はギャップ

が小さいので、カソードから十分にビームが得られれば 1.45 kV 印加することで、所望値を得ることができる。

謝辞

(株) JFE技研には、高純度CNTカソードを提供して頂き、我々の議論にも参加して頂きました。また、FE-SEM利用に際し、文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクト(NPPP)のご協力を頂きました。ここに記して各位に感謝致します。

参考文献

- [1] Y. Hozumi, S. Ohsawa, T. Sugimura, M. Ikeda, "DEVELOPMENT OF ELECTRON GUN OF CARBON NANOTUBE CATHODE", Proc. PAC2005, Knoxville, TN, USA (2005) pp.1392-1394.
- [2] 穂積康文, 大沢哲, 杉村高志, 池田光男, "カーボンナノチューブ冷陰極を持つ電界放出電子銃の開発(2)", Proc. 第30回リニアック技術研究会, 鳥栖市 (2005) pp.367-369.
- [3] 穂積康文, "大電流パルス電子銃用カーボンナノチューブ冷陰極に関する研究", 総合研究大学院大学博士論文 (2006年).
- [4] L. Nilsson et al.: *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) 2071.