

DEVELOPMENT OF FIELD-EMISSION ELECTRON GUN FROM CARBON NANOTUBES (2)

Yasufumi Hozumi[†]

School of High Energy Accelerator Science, The Graduate University for Advanced Studies (GUAS/AS),

Satoshi Ohsawa, Takashi Sugimura, Mitsuo Ikeda

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

Abstract

We have been developing a high brightness electron gun utilizing carbon nanotube (CNT) cathode since 2001. Recently we succeeded to achieve a realistic-size cold cathode which could stand comparison with current densities of dispenser cathodes conventionally used in accelerators all over the world. The anode current was obtained to 0.48 A from the CNT-cathode of 2.6 mm diameter, which current density reduced from the anode current was about 9.1 A/cm² under a condition of 128 kV-DC acceleration voltage in pulse operations of 50 pps using about 8 ns pulses. The emission current was very stable in the long-term-period operation for about 3 weeks under about 10⁻⁶ Pa vacuum pressure.

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)

1. はじめに

我々は昨年のリニアック技術研究会において、幅 65 ns、繰返し数 50 pps のグリッドパルス、及びグリッド - アノード間の加速電圧 100 kV を用いてビーム試験を行った結果、スクリーン印刷法によって成膜された 6 mmφ の CNT カソードの電流密度を 0.4 A/cm² と報告した^[1]。

今回、新たに (株) JFE エンジニアリング社からアーク放電法による 2.6 mmφ 高結晶 CNT カソードのご提供を受け、加速電圧 128 kV の下、8 ns の実用的なパルス幅にてビーム試験を行い、カソードの電流密度が 9.1 A/cm² に達した。この成果により、従来までの含浸型熱陰極に代わる、CNT 冷陰極を持つ高輝度電子銃の実用化が見えてきた。

2. CNT カソードの電界放出試験

2.1 CNT エミッタからの電界電子放出

CNT は 1991 年に日本で発見され、その電子エミッタとしての高いポテンシャルについては早くに指摘され、1995 年には最初の電界電子放出特性の報告がなされた^[2]。この電子放出のメカニズムについては、CNT Tip へ高電界が集中することにより、CNT 表面の電子を拘束しているポテンシャル障壁が歪曲して浅く且つ薄くなり、拘束されていた電子がトンネル効果によって真空中に引き出されるといふ説明がなされている。1998 年には、CNT を電子源とした光源管デバイスの試作が行われ^[3]、その長寿命と高輝度、そして安定した電子放出特性が確認

された。また、電界放出顕微鏡法 (FEM) や電界イオン顕微鏡法 (FIM) を用いた CNT Tip 構造と電子放出特性とに関する調査も精力的に行われてきており、CNT エミッタに関して理解が進んできた。

こうした背景があり、我々はヒータが不要で且つカソードの小面積化が図れる CNT 冷陰極を用いた加速器用グリッドドライブ電子銃の試作を 2001 年度より開始し、本研究会等において報告してきた^[1,4]。今回、CNT 陰極を高純度で高結晶性のものに代え、パルス幅も実用レベルにまで縮めて試験を行ったので以下に報告する。尚、電子銃テストスタンドの構成や測定系については昨年度の報告を参照されたい^[1]。

2.2 I-E 特性

図 1 に本カソード (陰極面の直径 2.6 mmφ, 電子放出面積 5.3 mm²) の電子放出特性を示す。縦軸はビームキャッチャで捉えた、加速されたアノードのビーム電流から換算したカソードの電流密度、横軸はグリッド - カソード間に印加された電界強度である。青の菱形のラインがグリッド - アノード間の加速電圧が 100 kV のときのプロットであり、グラフ上方に一点だけ飛んで見える黒い縁取りのポイントが、グリッド - カソード間の電界強度を最大に保ったまま加速電圧を 100 kV から 128 kV に上昇させたときの値である。その推移の様子を図 1 中に矢印で示した。

加速電圧を上げることでカソードの電流密度が増加するということは、この電子銃内のビームがラングミュアの式で表記されるところの空間電荷制限領域に入っていることを示しているから、より高いカソード電流密度を得るためにはグリッド - アノード間の加速電圧を上げてビームの引き出しを行わなけ

[†] hozumiy@post.kek.jp

ればならない。今後、加速電圧を 200 kV 程度まで上げる予定で、その準備を進めているところである。

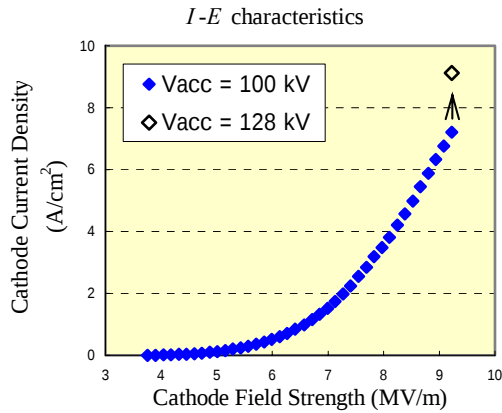


図1．電流密度 - 電界強度特性

2.3 Fowler-Nordheim プロット

図 2 は、図 1 のデータを Fowler-Nordheim (F-N) プロットで表したものである。よく知られているように、このプロットの傾きが直線であるならば、この電子放出は量子力学で理解されるトンネル効果に起因していることの証拠となる。本試験での電子放出機構も、図 2 によりトンネル効果によるものと確認された。このプロットの傾きから電界増倍係数 β を求めることができるが、F-N の式は次の (1) 式で表される。

$$\ln(I/E^2) = \ln(a) + b(\phi^{3/2}/E) \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} a &= 1.54 \times 10^{-6} A \beta^2 / \phi, \\ b &= -6.83 \times 10^7 / \beta \end{aligned} \quad (2)$$

となる。

グラフの横軸を $1/E$ にとると、傾きは仕事関数 ϕ と電界増倍係数 β の関数となる。図 2 での E の次元は MV/m である。CNT の仕事関数は種々の値が報告されてきており、 β 因子の算出に 5 eV を採用している報告も多いのだが、概ねグラファイトのそれと変わらないことを勘案して、今回の計算では高配向性グラファイト (HOPG) の仕事関数 4.4 eV を用いることとする。以上を考慮して、F-N プロットの傾き ζ から β 因子は、

$$\beta = -6.3 \times 10^4 / \zeta \quad (3)$$

と求めることができる。

図 2 の F-N プロットの傾きの直線部分の付近から算出される β 因子の値 (図2参照) は、CNT 1本に対して十分に電界が印加されているときの β 因子の値^[5]と一致することが判明した。これは本カソード上の CNT 密度が適当な量であるため、カソード上の個々の CNT に十分な電界集中が引き起こされたことを示すものであり^[6]、理想的な条件下で電子放出がなされたと見なすことができるのであり、カソード全面に亘る β 因子の平均値が CNT 1

本に理想的に電界集中している時の値と等しいという別の表現も可能である。本カソードと電界集中に関する、より詳しい議論は 3 章で展開する。

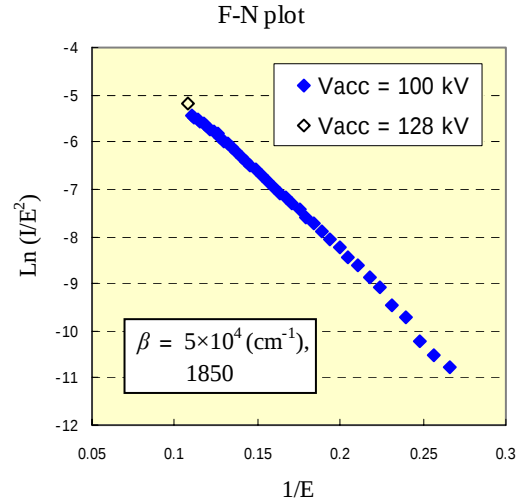


図2．Fowler-Nordheim プロット

2.4 CNTカソードの寿命試験

図 3 に 24 日間に及び CNTカソードの寿命試験の結果を示す。初めの3日間と、ランニングの途中で電流値がゼロ付近に落ちているのは、それぞれ測定系の調節とテストスタンド内に立ち入る必要があったために一旦ビーム加速をストップしたからであり、その間もグリッド - カソード間での電子放出は行われていた。測定条件は、加速電圧 100 kV、パルス幅 8 ns、繰返し数 50 pps であり、グリッド - カソード間の電界強度はおよそ 9.1 MV/m、ビームの加速スペースであるグリッド - アノード間の電界強度は 3.2 MV/m 程となっている。

2.3 節で述べたように、このときの加速電圧、つまりグリッド - アノード間の電界強度を上げるとアノード電流が増えるので、実際は CNT からより多くの電流が得られているはずである。今回のランニングはカソードの電流密度が 7.2 A/cm² 付近で行っているが、本来、実電流を算出する際には、グリッドに流れ込む電流の分も勘案すべきであって、この値よりも 30 % 程は上乘せして計算すべきである。よって、実質 9.4 A/cm² 付近でのランニングを行ったことになる訳である。加えて、2.2 節で議論したように今回は空間電荷領域でランニングを行ったのであるから、ビームが十分に引き出されてビームキャッチャで捕らえられておれば、10 A/cm² 以上は裕に超えた領域でビーム試験が行えたはずである、とこの結果は示唆しているのである。

いずれにしても約 3 週間に渡って安定したビームが得られたことは特筆すべきことである。24 日間のランニングで、放出電流は約 1.3 % の減少に留まった。

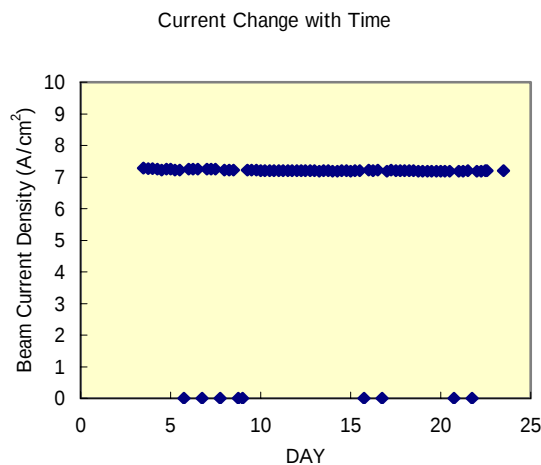


図3．CNTカソードの寿命試験

3．CNTカソードの表面観察

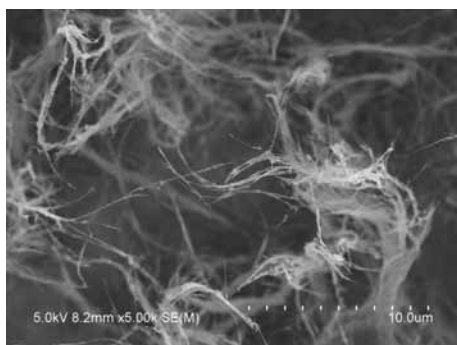


図4．ビーム試験前

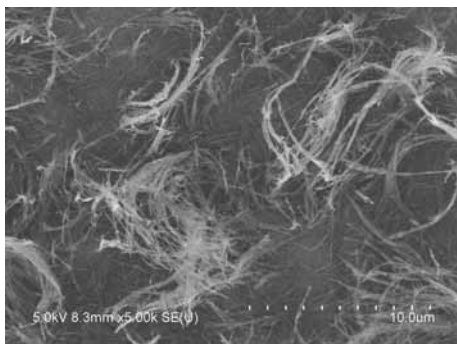


図5．ビーム試験後

図4は、FE-SEMによる高電界印加前のカソード表面の像であり、図5は、ビーム試験後のカソード表面の写真である。両写真ともカソードの中心付近の様子を撮影したものである。それに先立ち、カソードの全面に亘って観察を行っており、場所による形状の違いがないことを確認している。

図4と図5を比較すれば明らかで、高電圧印加後のCNT密度は印加する前のそれと比べて、低くなっている。本カソードのCNTエミッタ群はファ

ン・デル・ワールス結合でバンドル構造を成しており、基板に対して浮いている弱い結合を持つCNTも多いために、カソード基板にしっかりと根を下ろしている強い結合を持つCNT以外は、印加電界を強めるに従い、破壊・飛散が進み、結果として2.2節で述べたように電子放出サイトが減少してCNT密度が最適化されてカソードのコンディショニングが進む。その結果、電子放出特性の安定化も進んでゆくのである。

4．結論

高純度CNT陰極を用いて、8 nsの実用的なパルス幅にてビーム試験を行った結果、9.1 A/cm²ものカソード電流密度が得られた。この値は一般的な熱陰極である含浸型カソードの放出電流密度に迫るものであり、CNT冷陰極を持つ高輝度電子銃の実用化が見えてきた。また、CNTと基板とのオーミック接触抵抗による、エミッション電流の抑制が報告されている^[7]ので、今後加速電圧を上げてよりカソード電流密度が増して行く問題になってくるものと思われる。この対策も講じてゆきたい。

謝辞

(株)JFEエンジニアリングには高純度CNTカソードを提供していただいた。また、文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクト(NPPP)のご協力により、産業技術総合研究所ナノプロセッシング施設において高分解能電界放出走査型電子顕微鏡を使用することができ、本稿にその観察像を登載することができた。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- [1] 穂積康文ら, “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”, 第29回リニアック技術研究会プロシーディングス, pp. 350-352 (2004).
- [2] J. M. Bonard et al., “Field emission from carbon nanotubes: the first five years”, Solid State Electronics, vol. 45, pp. 893-914 (2001).
- [3] Y. Saito et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39, p. 346 (1998).
- [4] 大沢哲ら, “カーボンナノチューブ冷陰極の特性測定”, 第28回リニアック技術研究会プロシーディングス, pp. 120-122 (2003).
- [5] 森久祐司ら, “カーボンナノチューブ1本による微小電界放射電子源の作成と評価”, 島津レビュー, vol. 60, No. 1.2, pp. 25-33 (2003).
- [6] L. Nilsson et al., “Scanning field emission from patterned carbon nanotube films”, Appl. Phys. Lett., vol. 76, No. 15, pp. 2071-2073 (2000).
- [7] J. B. Cui et al., “Control of field emission current of individual sites by a local resistor”, J. Vac. Sci. Technol. B vol. 20(1), pp. 19-24 (2002).