

Development of field-emission electron guns from carbon nanotubes

Y. Hozumi^{1,A)}, S. Ohsawa^{B)}, T. Sugimura^{B)}, M. Ikeda^{B)}

A) School of high energy accelerator science, The graduate university for advanced studies (SOKENDAI)

B) Accelerator facility, High energy accelerator research organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

A pulsed electron gun with a field emission (FE) cathode using the carbon nanotubes (CNTs) has tested. Anode current of $3.0\text{A}/\text{cm}^2$ CNT-FE gun was achieved with 8kV acceleration voltage by applying short grid pulses between cathode-grid electrodes in the last year^[1]. The heater-free guns are desired for various user because of which emits the low emittance, high brightness electron beams. In order to develop such reasonable FE-guns, 100-kV test stand was structured and the anode currents were obtained the value of 100mA. This is equivalent to about $400\text{mA}/\text{cm}^2$ of electron beam was emitted from the CNT cathode. With some improvements anode currents of Ampere order is expected.

カーボンナノチューブ冷陰極を用いた電界放出電子銃の開発

1. はじめに

今日、熱源が不要で且つエミッタンスの小さなビームを取り出すことのできる、扱いやすい電子銃の実現が望まれている。我々は昨年度、実用機に搭載できるレベルの放射電流密度と寿命性とを兼ね備えた、FE(フィールドエミッション)用CNT(カーボンナノチューブ)カソードを複数の企業の協力によって実現することができた^[1]。今回はこれを受けて加速電圧100kV、EIMAC-Y796規格に合う実用的なFE電子銃を開発し、ビーム試験を行った。

2. 電子銃本体の構成

2.1 測定および系の回路構成

G-C(グリッド - カソード)間にはBNCコネクタを介し、カソード側に幅50~100nsec、繰り返し数7~10Hz、0.1~3.4kVのパルス電圧が加えられる。

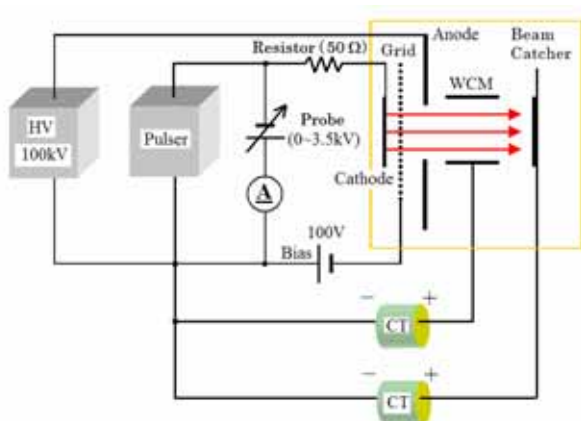


図1：系全体の概略

図1に系の概略を示す。パルサーに50Ω抵抗が直列に接続されているのは、波形のマッチングのためと、G-C間で放電があった場合に備えて、カソードへの放電のダメージを軽減する保護抵抗の役割を持たせるためである。放出された電子は、グリッドを出たあとアノード - グリッド間の直流100kVで加速され、電子銃から引き出される。加速されたビームは、磁場レンズによってソレノイド磁場中にあるBC(ビームキャッチャ)上に像を結ぶように調節される。ビーム電流は、WCM(ウォールカレントモニター)とBC、及びCT(電流モニター)で測定される。なお、ビームキャッチャの所に蛍光スクリーンを挿入し、ビーム形状も観察できるようにしてある。

2.2 電子銃の構成

図2に電子銃をグリッド側から見た写真を示す。

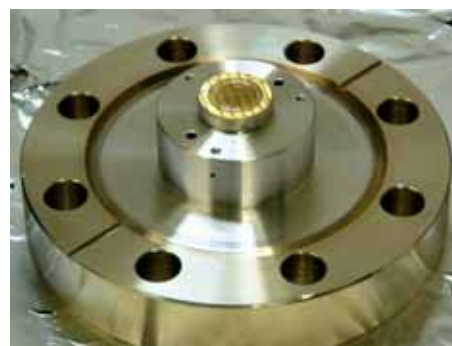


図2：電子銃の外形

真空フランジの規格(ICF88)と陰極面位置等を、よく使用されている陰極であるEIMAC-Y796に合わせて設計したので、同じ陰極を採用している電子銃のステムへの取付けが可能である。G-C間の距離は10μm単位の精度が出るように、写真床面側からネ

ジで締め付けを行う構造とした。図3にウェネルト電極の構造を示す。勾配はピアースの理論から導かれる平行ビームを得るため、 22.5° に加工してあり、鏡面仕上げとした。尚、実際の測定の際にはウェネルトとグリッドの間ができないようにSUSのカバーを装着する。図4にアノード電極を示す。アノードは平板構造とし、ビームの入り口側の孔($\phi 10$)には $2R$ の丸みをつけ、同様に表面を鏡面仕上げとした。

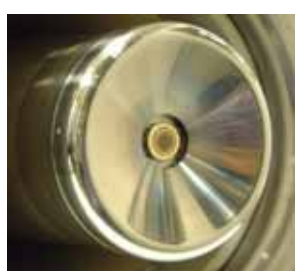


図3：ウェネルト電極



図4：アノード

2.3 ビーム軌道のシミュレーション

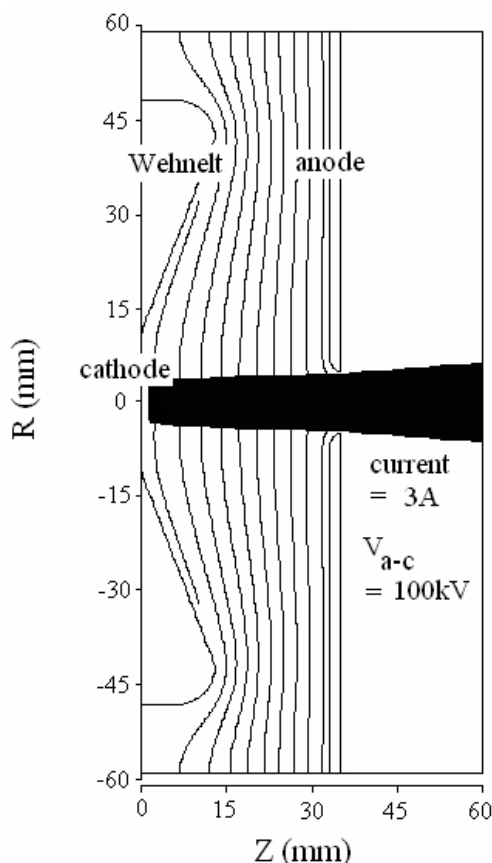


図5．EGUNによる軌道計算

ビームの軌道計算に、シミュレーションコードEGUNを用いた。計算では、常温(300K)のカソード表面から一様に電子放出がなされると仮定した上で、カソードからの放出電流を3アンペアと設定し、

ビーム引き出し電圧は100kVとした。尚、カソード径は $\phi 6\text{mm}$ として計算を実行し、問題なく引き出しが行われることを確認した。

3．ビーム試験

100kV高圧テストスタンドを昨年暮から立上げ始め、今年始めに立上げを完了した。本システムにおいて、G-C間にビーム引出し用パルス電圧をかけ、グリッド - アノード間にDC100kVの加速電圧を印加して、ビームの電流特性を調べた。試験中の真空到達度は 10^{-6}Pa オーダである。図6はBCで捕らえた電流値をプロットしたものであり、トンネル効果に起因する電子放出であることをF-Nプロットで確認している。このときのパルス幅は65nsec、繰り返し数は7Hzである。このときのビーム波形を図7に示す。図6中の、四角形のプロットが放電前のデータであり、三角形のプロットが連続して3回放電が起きた後のデータである。放電前、平方cm当り400mA超の電子放出が確認されたが、G-C間での放電が度々発生し、放出電流の減少が起こった。図6の結果から減少の割合を見積もると、1回の放電でおおよそ4~5%の減少があった。

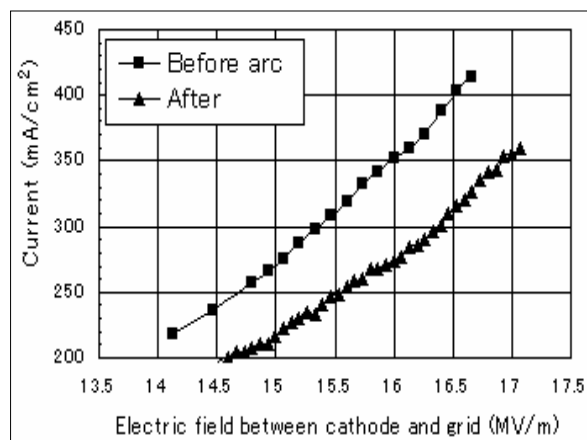


図6．カソードから放出される換算電流密度

これは、G-C間で起こる放電により、カソード表面に存在するCNTとその周辺部分が一挙に飛散し、電子放出サイトの絶対数が減ることに起因するものと考えられる。そこで、放電前と放電後の様子をBCの所で蛍光スクリーンを挿入し、ビーム形状の調査を行った(図8)。このケースはカソード交換後放電が起きていない場合のビームを撮影したものを図8(a)とし、図8(b)は放電が2度程起きた後の画像である。このことから、この蛍光スクリーン上のビームはカソードの状態をそのまま反映したものであるといえる。(a)は割合、カソード面から均一に電子放出が行われていると見ることができ、(b)はG-C間の放電により電子放出のない部分が多くなっていることが分かる。

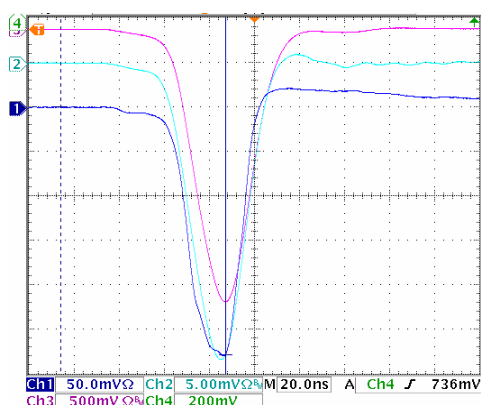


図7. ビーム波形(CH1:WCM, CH3:BC)



図8. 放電前(a:左)と放電後(b:右)のビームの様子

4. CNTカソードの表面幾何形状の調査

CNTを電子放出源に使用とする動きは、特にFED(フラットパネルディスプレイ)で顕著であって、CNT電子放出特性については、これまでいろいろ調べられてきている。斉藤らの報告^[2]によれば、CNT1本から見積もられる単位cm当りの放出電流は $1 \sim 100 \times 10^4 \text{A}$ であり、単層と多層CNT、openかcapped構造かの違いでも電子放出特性が変わる。これは、実験的には電子放出サイト数の違いや実効的な電界集中の度合により説明される。理論的な計算からは、局在状態や状態密度の観点から電子放出が論じられ、CNTが半導体的か金属的かによっても異なることとされる。また、CNT先端(aligned CNT)とCNT-body(non-aligned CNT)との電子放出量の違いに関する実験^[3]やCNT密度と電界集中の関係に関して計算した例^{[3],[4]}、電子放出とCNT自体の温度の因果関係の報告^{[5],[6]}等々がある。

以上の様な報告を参考にして、本CNTカソード最適化の方針を得ることと放電後の状態を調べるために、CNT薄膜表面のFE-SEM観察を行った(図9)。試料はSUS基板上的CNT薄膜である。図9の観察は2次電子検出モードを用い、WD 14.8mm、プローブ電流 $10.6 \mu\text{A}$ 、加速電圧10kV下で行った。写真の中央部付近に見ることができる何本かの繊維状のものがCNTである。EDS調査により、その周りの凹凸部はカーボンの球状粒子や未成長CNTなどのカーボン様物質であることを確認している。表面状態の観察から、使用した陰極はCNT密度や高さ方向のばらつきが大きいことがわかった。これらの最適化が行われることで、電子放出特性の大幅な改善が期待される。

また傾向として、放電はきわめて狭い範囲で数箇所同時に起こることも確認された。

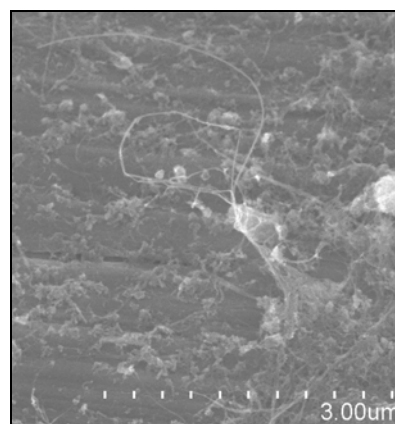


図9. CNTカソードの表面状態

5. まとめ

加速電圧100kVの実用的なFE型CNT電子銃を開発し、ビーム加速試験を行った。今回は、陰極に数10nsecのパルス電圧を印加し、100mA程度のビームを加速することができた。これは、カソードから約 400mA/cm^2 のビームが出ていることに相当している。今後は、CNT陰極の最適化と真空系の改良を進めて、アンペアオーダの電子ビーム加速をめざして実験を進めてゆきたい。

謝辞

おわりに、本稿の電子顕微鏡像は独立行政法人産業技術総合研究所ナノプロセッシング施設において得られたものである。文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクト(NPPP)の支援に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 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(‘03東海村), pp. 120-122., URL: <http://lam28.tokai.jaeri.go.jp/proceedings/FB-4.pdf>
- [2] Y. Saito et al., *Fullerene Science & Technology*, vol. 7, (1999) p. 653.
- [3] Y-T. Jang et al., *thin solid films*, vol.436 (2003) pp.298-302.
- [4] W. B. Choi et al., *Applied Physics Letters*, vol. 75 (1999) p.3129.
- [5] M-C. Kan et al, *thin solid films*, vol.447-448 (2004) pp. 187-191.
- [6] A. L. Musatov et al., *Fullerene Science & Technology*, vol. 12, (2004) pp. 111-115.