

DEVELOPMENT OF MINIATURE FIELD EMISSION ELECTRON SOURCES

Koichi Kanno^{1,A)}, Eiji Tanabe^{A)}

^{A)} AET Japan, Inc.

URIS Bidg.8th Floor 1-2-3 Manpukuji, Asaoku, Kawasaki-City, 215-0004

Abstract

Field emission cathodes can be very useful as for future electron sources, since they offer miniaturizing of the structure as well as elimination of the heater power. We have been developing various kinds of field emission cathodes in the past. The Micro-Miniature RF gun with field emission cathode with short accelerating gap offers a back-bombardment less compact RF gun. This structure may enable us to build a compact, low cost, tight bunched electron beam injector for the application of industrial and medical accelerators. In addition, we will describe a miniature electron sources developed for Micro-Miniature X-ray source, which can be used for replacement of medical radioisotopes. In this paper, we present the status and future of the field emission miniature electron sources that are will apply for medical and industrial uses.

小型電界放出陰極電子源の開発

1. はじめに

リニアック用電子銃はエネルギー20～500keV程度の熱陰極型DC電子銃が使用されている。最近では電子リニアックの応用がますます高度化・多様化し、電子銃に要求される性能や条件も高度かつ多様になっている。特に高輝度、つまりエミッタンスが小さく、ピーク電流が大きいビームが要求され、光陰極型RF電子銃の開発が推進され成果が得られている。しかし、光陰極のレーザーシステムは場所をとり、運転にもある程度労力を要する。また、現時点ではコストを抑えるのは難しく医療・産業応用にはあまり適していない。一方、現在ではカーボンナノチューブ(Carbon NanoTube, CNT)が良好な電界放出特性を持つことが分かっており、特にフラットパネルディスプレイ用電子源として注目を集めている。このCNT陰極は加速器用電子銃にも適用可能である。電界放出陰極であるため、電子放出のための電力も特殊な構造も必要ない。従って、小型化、低電力化が可能であり、医療・工業用電子加速器、X線源などの小型・低コストが要求される電子銃に、CNT電界放出陰極は有効であると考えられる。

そこでAETではCNT陰極を用いた電子銃やX線源の開発を進めてきた^[1-6]。これらの電子銃の直径は5mm程度で、30～100keVの電子ビーム発生する。X線源に関しては将来的には1mm以下にすることを目指している。しかしこのような小型の電子銃では絶縁破壊が問題となる。そのため、DCに比べ絶縁破壊電界が高い高電圧短パルスや高周波電場によって電子を放出させる。

2. 電界放出陰極

電界放出陰極には、金属材の先端を尖鋭化させて得るニードル陰極やシリコン、モリブデン等のコーン型微小陰極などが利用されている。電子顕微鏡のような電子ビームを細く絞る電子装置の電子源として利用されている^[7]。

加速器では熱陰極が主に使われるが、その殆どが動作温度が低い含浸型を使用している。また、LaB₆は含浸型より動作温度が高いが、電流密度が高く、残留気体の影響も受けにくいいためよく使用されている。光陰極は最近RF電子銃用陰極に非常に多く使用されている。様々な材質が検討されており、Cs-Te、等のアルカリ系金属や銅などの純金属が主に使用されている。

電界放出陰極は電流密度が高く、電子放出にヒーター電源やレーザー装置を必要としないなどの特長があるが、トータル電流を多くすることが難しいことや $\sim 10^{-9}$ Torr程度の高真空である必要なため、熱陰極ほどには広く活用されていない。電子放出材質としてのCNTが特に脚光を浴びるようになったのは真空の制約が緩く、トータル電流を増やすことが容易で丈夫であるためである。そのためCNT陰極を使用することで、電界放出の特長を加速器用電子銃に利用することが期待できる。

表1に各陰極の電流密度の比較を示す。ニードル陰極以外の電界放出陰極に関してはトータル電流に対する電流密度としてまとめた。CNTに関しては平均電界20MV/mの高電界試験で250A/cm²程度の電子放出を得ている^[5]。

AETではCNT陰極を用いた超小型RF電子銃、高圧

¹ E-mail: kanno@aetjapan.com

短パルス電子銃、および超小型X線源の開発を行っている。これらの電界放出電子銃について述べる。

表 1. 陰極の電流密度比較

放出方式	種類	最大電流密度
熱電子放出	含浸型, LaB ₆ , BaO etc.	~100A/cm ²
光電子放出	Cs-Te, GaAs, Cu, Mg, LaB ₆ etc.	~1000A/cm ²
電界放出	Wニードル	10 ⁴ ~A/cm ²
	Spindt型	1000A/cm ²
	CNT	1.2A/cm ² [8]
	CNT (@20MV/m)	250A/cm ²

3. 超小型RF電子銃

3.1 超小型RF電子銃の概要

高電界加速が可能なRF電子銃は良質の電子ビームを得るためには有効である。そして、光陰極ではバックボンバードメントはなく、得られる電流密度も高い。しかし、必要となるシステムは価格も規模も非常に大きく、医療用・産業用への適用にはあまり向いていない。また、高周波周期ごとにバンチを生成させることは今のところ難しい。そのため、光陰極を使用せずにバックボンバードメントを減らす、または完全に無くす方法も検討されている。現在では、偏向磁場を印加する方法^[9]や電子放出と加速に異なる空洞を使う方法（三極管型RF電子銃）が考えられている。AETでは三極管型RF電子銃の開発を進めているが、電子放出用空洞にギャップが1mmのλ/4同軸共振器を用いた超小型RF電子銃を使用することを検討している^[1-4]。形状と電場分布を図1に示す。シャントインピーダンスは23MΩ/m、Q値は1000である。この電子銃は単体でも利用可能である。さらに、電界放出陰極を使う利点があり、これに関しては次節で述べる。

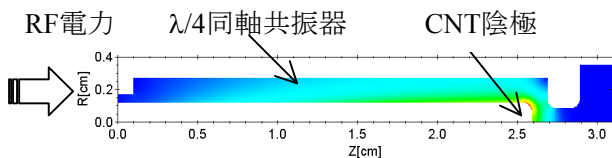


図 1. 超小型RF電子銃空洞の形状と電界分布。高周波ケーブルによって伝送された電力をλ/4同軸共振器に図の左側から供給する。共振器の内部導体の先端にはCNT陰極が取り付けられ、短い加速ギャップにかけられた高電界により、電子が引き出され、加速される。

3.2 電界放出の特長

電界放出では印加電界E[V/cm]と放出電流密度J[A/cm²]の関係はFowler-Nordheimの式

$$J = AE^2 e^{-B/E} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、

$$A = \frac{1.54 \times 10^{-6}}{\phi}, \quad B = 6.83 \times 10^7 \phi^{1.5} \quad (2)$$

であり、φは仕事関数を示す。この式はEが小さいとe^{-B/E}の項が支配的で、Eが大きいとE²が支配的となる。従って電界放出では、電界が小さいところでは放出電流がほぼ0で、大きくなるにつれより大電流密度になる。これより陰極に印加される電場が正弦波適に変化するRF電子銃ではゼロクロスの位相付近ではほとんど電子は放出されず、ピーク付近で電子が放出されると推定できる。従って、加速電場の半周期より短いパッチ幅を持つ電子ビームを発生できると考えられる。

3.2 電界放出RF電子銃の電子放出の検討

S-band(2856MHz)RF電子銃に電界放出陰極を採用した場合の電子放出に関して検討する。ここではAETで行った超小型X線源のためのCNT電界放出実験^[6]より得られた電流密度-印加電界特性を用いる。図2に電流密度Jと陰極表面平均電界Eの特性曲線とFowler-Nordheimプロットを示す。図にはフィッティング曲線も示している。この関係より、RF電子銃の高周波電場によって引き出し可能な電流密度を推定した結果を図3に示す。

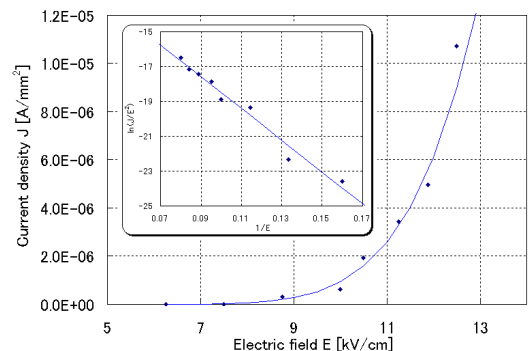


図 2. CNT電界放出特性試験結果。図中にはFowler-Nordheimプロットを挿入した。曲線はフィッティングの結果を示す。陰極-陽極間距離4mm。実験時の真空度10⁻⁶~10⁻⁷Torrであった。

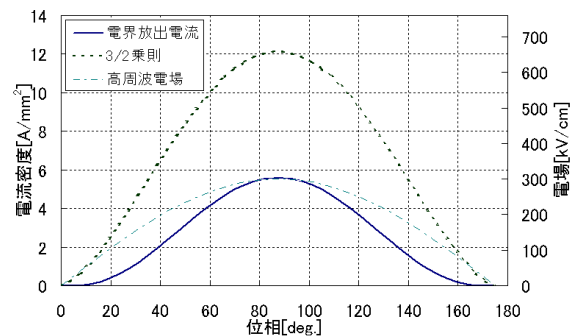


図 3. 陰極表面平均電場が30MV/mのRF電子銃に関して推定される電界放出電流密度分布。図2で得られたフィッティングの結果をRF電場の値に当てはめた。また図中にはRF電場と3/2乗則も示す。

この結果を用いて電界放出RF電子銃から得られる電荷量を推定する。ピーク電流密度が $5\text{A}/\text{mm}^2$ ($500\text{A}/\text{cm}^2$)と推定されているので、陰極直径が 1mm ではピーク電流は約 4A と見積もる事ができる。バンチ幅を半値幅で考え約 80ps とすると、このCNT陰極を使用した場合のバンチ内の電荷は 320pC と得られる。

また、電界放出陰極ではゼロクロス付近ではあまり電子放出はなく、高周波位相が電場のピーク付近になるにつれて電流密度が高くなるために、半値幅で考えた場合のバンチ幅は、高周波の半周期に比べて短くなると図3から考えられる。この効果を利用することでバックボンバードメントを抑えられる可能性がある。Fowler-Nordheimの式を直接RF電子銃の加速電場に適用した場合はより短いバンチが推測された。図4には実験値と式から推定した電流密度変化の比較を示す。この違いは陰極の表面状態や温度、使用真空度などによるものと考えられる。このように設計の際には電子放出特性を把握する必要があると考えられる。

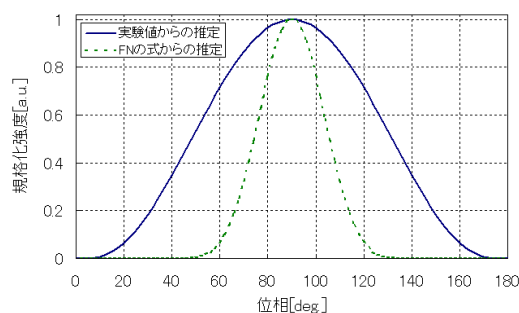


図4．測定値から推定される電流分布とFowler-Nordheimの式を直接あてはめた場合の比較。

以上の結果から、光陰極のように数psという非常に短いバンチビームを陰極から直接得る事は難しく、チョッパーなどと組み合わせる必要があると思われるが、短ギャップで電子を引き出すことでバックボンバードメントによる影響を軽減することができると考えられる。これより、長パルスマルチバンチRF電子銃など実現が期待でき、短波長FEL用加速器の電子銃にも適用可能性がある。

また、今回予測した電流密度分布とガウス分布との比較を図5に示す。

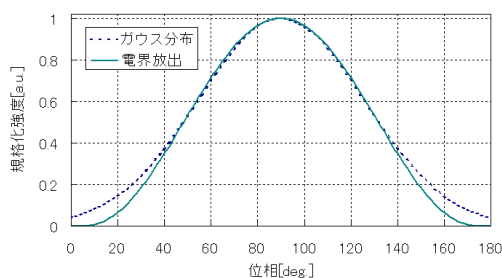


図5．電界放出電流密度分布とガウス分布。ガウス分布では裾付近の傾斜がなだらかである。

バンチの裾の部分がガウス分布ではなだらかであるがピークを同じにした場合の形状はほぼ同じになる。これより、電子軌道シミュレーションでガウス分布のバンチが陰極から放出すると仮定しても問題ないと考えられる。

4．小型パルス電子銃と超小型X線源

小型化したことで考えられる放電の問題に対して、高電圧短パルスを用いる電子銃を開発している。これは主に超小型X線源のための開発として進めている。このX線源はアイソトープに代わる小線源治療装置として東工大と共同で開発が進めている。チェンバー内でのニードル、CNT陰極試験やX線発生試験、また、高電圧短パルス発生器の開発、ケーブルの絶縁破壊特性の試験、小型管球の小型化、パルサーの改良などを行ってきた。現在、直径 6mm のフィードスルーを改良した試験用X線管、及び直径 8mm ガラス管X線管の試験を行っているところである。

5．まとめ

小型電子銃用CNT陰極に関する検討をFowler-Nordheimの式と基礎的な電界放出特性試験から得られたデータから実施した。RF電子銃にCNT陰極を適用すると、バンチの半値幅が加速高周波の周期の $1/4$ 以下にできると推定された。また、このバンチ形状はガウス分布と非常に近い形状をしており、電界放出陰極の場合でも電子軌道シミュレーションに於いてバンチ形状をガウス分布と仮定して計算する事ができると考えられる。

X線源に関しては、CNTおよびベルベット陰極の特性・耐久試験、小型管球の耐圧試験を引き続き実施するとともに線量、スペクトル測定などのX線発生に関する基礎的な実験を実施し実用化に向けた開発を行う。

参考文献

- [1] E. Tanabe and K. Kanno, "マイクロミニチュアRF電子銃" Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, 2002
- [2] K. Kanno and E. Tanabe, "Design of Back-bombardment-less Thermionic RF gun" Japanese Journal of Applied Physics Vol.41 Suppl.41-1 (2002) 62-64
- [3] 特許第3497147号, "超小形マイクロ波電子源", 2003
- [4] U.S. Patent US6,646,382 B2 "Microminiature Microwave Electron Source", 2003
- [5] 田辺英二、他、"超小型加速器の開発と応用" 超小型加速器とX線源研究会, 2000
- [6] 特許第3090910号, "超小型X線発生装置" 2000
- [7] 電気学会大学講座 電子イオンビーム工学
- [8] <http://www.nano-proprietary.com>
- [9] T. Kii, et. al., Nucl. Inst. and Meth. A483, 29-33(2002)