

Study of electron gun with small diameter electron source

Koichi Kanno¹, Eiji Tanabe
AET Inc.

2-7-6 kurigi, Asaoku, Kawasaki-City, 215-0033

Abstract

Electron gun with small diameter electron source(cathode) for compact accelerator and electron beam device is studied. In this study, thermionic cathode and field emitter are described. Additionally Micro Miniature X-ray source with carbon nanotube cold emitter is described.

小口径電子源を持つ電子銃の検討

1. はじめに

電子銃の電子源(陰極)の口径を小さくする事で、発生する電子ビームのビーム径とエミッタンスを小さくすることができる。しかし、実際には電流、電流密度、電極構造、印加電場などにもより、ビームの質を良くできる有力な方法の一つであると考え、事が正しいと考えられる。電極に印加できる電場には放電のため限界があり、電子源の特性を良くし、低電場で高い電流密度を得られる小さい電子源を検討するという議論も重要ではあるが、ここでは構造と応用について考える

2. 電子銃の現状

加速器用の実用電子銃に関しては、細かな違いはあるがその構造はほとんど変わらず、20~200kV程度の加速電場を持つDC電子銃で、グリッドによりパルスビームを発生する。また、高電場加速の必要性からRF電子銃、RF電子銃のバックボンバードメントを抑え、かつ大きなピーク電流を得られる光陰極なども実績と成果を挙げつつある。更に、フラットパネルディスプレイで期待されているカーボンナノチューブ(CNT)冷陰極を加速器用電子源に利用する研究も行われ実用に耐え得ると推測できる結果が得られ始めている^[1]。

しかし、現時点で装置として信頼性が高いのは熱陰極を用いたDC電子銃である。特に医療・産業用加速器や電子線応用装置用の部品に求められることは性能のみならず、メンテナンス性、簡易性、低コストという条件が加わり、複雑なシステムにはできない。その点では熱陰極が電子放出材として今だ有効である。CNT冷陰極もその構造の簡便さから期待が高い。以降、熱陰極と電界放出陰極に絞って小口径電子源の検討を進める。

3. 電子源の種類

電子源材料には色々あるが通常、熱電子源ではタングステンフィラメント、LaB₆、含浸型がある。電

界放出に関しては、タングステンニードル、Spindt型チップ陰極、CNT、ベルベットがある。加速器用ではほとんどが含浸型熱陰極を採用している。素粒子や原子核実験、放射光発生用加速器の電子銃は100~200kVで、500kVの電子銃も使われている^[2]。ふつうそれらは特注品である。医療用・産業用加速器の電子銃は20kV程度で小型な電子銃を使用する。このような市販で手に入れることもできる。図1にその一例を示す。



【HWEГ-101228M仕様】

加速電圧:	20 kV
グリッド電圧:	235 V
ヒーター電圧:	6.3 V
ヒーター電流:	5.6 A
ビーム電流:	5.7 A

図1. HeatWave社製^[3] グリッド付きピアス型電子銃 Model HWEГ-101228Mの外観と仕様

熱陰極電子銃では低温動作が可能な含浸型でも950~1200で運転するため、電気絶縁の他、熱絶縁が十分なされている必要がある。そのため、独自に製作をする事ができない場合は大抵EIMACや上記のHeatWaveが提供しているようなグリッドカソードアセンブリを組み込み製作する。

このためカソード径を固定とし、他のパラメータを設計することで必要とするビームを生成せざるを得ない。従って、その装置・応用に最適な使用をもっているとは限らない。例えば、C-band(5.712GHz)、X-band(9.4GHz、または11.424GHz)の加速周波数を持つ加速器開発が盛んだが、加速管が小さくなるとともにアパーチャも小さくなる。すると、加速管へ入射するビームは今までと同じ電子銃ではエミッタンス劣化やビームの加速管への衝突が多くなると考えられる。

EIMAC Y646Bは直径約8mmであるが、これはウェーネルトによってビームが絞られることを考慮しても、

¹ E-mail: kanno@aetjapan.com

X-band加速管のアパーチャーと比べ十分小さいとはいえず、S-bandに比べ加速管内の横方向電場を受けやすくなる。

産業用・医療用で使用されている加速器は20～30kV程度に設定する事が多い。一方、電子線応用装置では10～25kV程度であり電子ビームのエネルギーとしてはほぼ同じ範囲にある。そして、電子線応用装置では電流が小さいもののビーム径も小さいことが要求される。このような装置ではヘアピン型タングステン陰極が多い。電子線応用装置と加速器用の電子銃は一般には全く別の設計となるように考えられるが、小口径電子源の最適化と運転パラメータによって幅広い分野に対応可能な電子銃の可能性を検討する。

3．小口径電子源

小口径電子源のメリットはエミッタンスが小さくなることである。これは、ビームトランスポートの面からも、集束性の面からも好ましい。しかし、電子源が小さいという事はトータル電流が低くなる事を意味し、電子源の仕様を最大限（高温、高電場印加）で運転することになり寿命が短くなる傾向になる。この点に於いては設計の際、十分な検討が必要であるが、電子ビーム利用の高度化にともなって良質のビームの要求が期待され小口径にする方法を取る必要が出てくると考えられる。

レーザー光を絞る事で電子放出面を自由に小さくできる光陰極や数十マイクロオーダーのフィールドエミッターはあるが各々にまだ課題があり運用することは難しい。

熱陰極では電子顕微鏡で使われるようなチップ状やWフィラメントがある。含浸型陰極ではTWTなどでは1mm強程度のカソードが使われている。含浸型は加速器やクライストロンのような高パービアンスタイプなど比較的陰極径が大きい電子銃でよく使用されるが、1mm以下の電子源の製作も可能である。図2は直熱式含浸型陰極の例である。

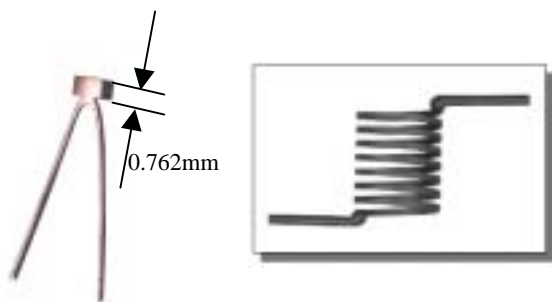


図2．直熱式含浸型陰極^[3]の例。左：ヘアピン型、右：コイル型。

加速器用電子源では直径8mm程度のEIMAC Y646Bが比較的カソード径が小さい。LaB₆やCeB₆では直径3mmの直熱式ディスク状カソードが使われている。実際にはこれより小さいカソードも可能だが、小口径のカソード グリッドアッセブリの標準品としてはあまりない。これはS-band加速器が主であったため全く問題なかったと考えられるが、C-band、X-band加速器開発が進みつつあることを考えるとこれらの加速器に適したアッセブリを検討しておくことは有意義であると考えられる。そしてこのアッセブリが加速器以外の電子線応用装置にも活用可能であれば有益であると考えられる。そこで、加速器と電子線応用装置両方を考慮した小口径電子源電子銃のシミュレーションを実施した。

4．シミュレーション

直熱型でディスク状の陰極を用いた20kV DC電子銃を想定したシミュレーションをEGUN^[4]を用いて行う。計算仕様は表1にまとめた。

表1．計算仕様

加速電圧	20kV
陰極径	1mm
電流密度	0.5A/cm ²
グリッド	アパーチャーグリッド
グリッド電圧	200V
メッシュ	12.5μm

グリッド電圧はEIMACやその他の三極管型電子銃と同程度の200Vとした。また、グリッドはアパーチャーグリッドを想定した。三極管型電子銃出使用するメッシュの孔径は約178～559μm、線幅は1.5～127μm程度である。陰極径1mmに比べるとビームの質を劣化させることが考えられるためアパーチャーグリッドを検討することにした。図3に計算結果を示す。

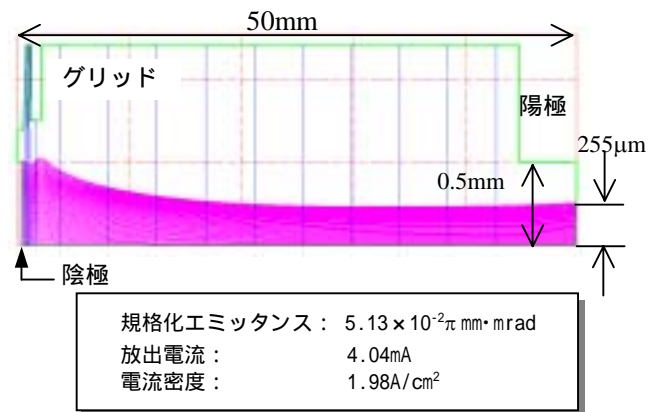


図3．EGUNによる電子銃シミュレーション結果。

カソード表面の電界が低くて放出電流は陰極仕様を活かしきってはいない(含浸型はパルスで数A/cm²は十分に可能)。チップ型にすれば電界が上がるが、中心精度が重要になる。簡易性を重視しディスク型を検討する。

また、電子源直径1mmのカソード グリッドアッセンブリを検討してみる。この場合、ディスペンサーカソードで7A/cm²の電子放出の性能があると考えれば放出電流は約55mAとなる。100mA以上必要であれば12A/cm²以上は必要である。パルス運転であれば可能である^[3]がビーム軌道の最適化は必要である。

4. 超小型パルスX線源用電子源

医療用RI線源に置換え可能な超小型パルスX線源の開発を進めてきている(図4)。現在の目標は60kV:50nsの高電圧短パルスをケーブルで伝送し、6mm程度の管球へ供給することである(表2)。パルスであるため放電発生の可能性が緩和される。また、ケーブルインピーダンス50 とマッチングさせているためピーク電流は非常に大きなビームが得られる。電子源にはCNTまたはベルベットを使用する。また高電圧大電流パルサーのスイッチングにはギャップスイッチを用いX線の発生を実現した。しかし、ギャップスイッチはパルス繰り返しが高く、電圧可変幅が狭いという欠点がある。そこで平行してサイクロン方式の検討も行う。サイクロンでは繰り返し数十Hz程度は実現でき、100~200程度の低インピーダンスの負荷でも動作できる可能性がある。

表2: 超小型X線源: 現在の目標仕様

エネルギー	~ 60keV
ピーク電流	27A
カソード材質	CNT冷陰極
カソード直径	0.98mm
パルス幅	50ns
繰り返し	100Hz
X線管直径	6mm

このX線源は管球自体が小さいため必然的に電子源は小さく電流密度が高いことが要求される。ただし、陰極ターゲット間距離が1mm程度と小さいのでビームの質の条件は比較的問題とならない。また、同時にカソードを加熱する構造にすることが難しいためCNTまたはベルベット冷陰極を採用している。X線源は同軸構造を持たないため、3次元荷電粒子軌道解析ソフトウェアPARTICLE STUDIOTM^[5]を用いてシミュレーションを行った(図5)。ターゲットがアノードの役目も果たしているため、ビームが偏向することを懸念したが、ギャップが狭いためほとんど影響はみられていない。

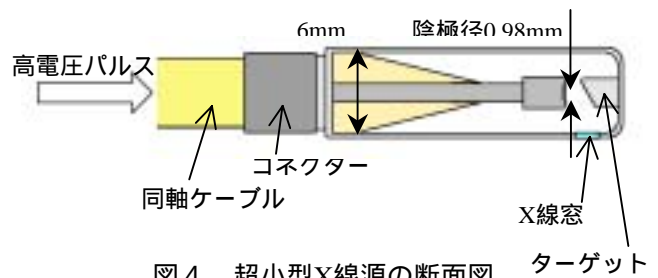


図4. 超小型X線源の断面図

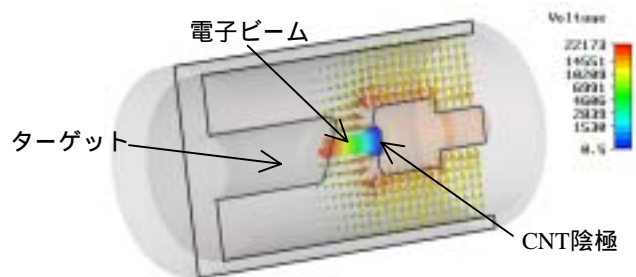


図5. 超小型X線源の3次元電子軌道解析結果

5. まとめ

加速器用電子銃では電流量のためディスク状陰極を使用し、一方、電子線応用装置ではフィラメント陰極が使われているが、いずれも小口径電子源を用いる長所があるという点では共通しており、将来X-band加速器が使用されるようになることも考慮すれば含浸型陰極を用いた電子銃の再検討も必要であり、高度化の余地はあると考えられる。また、CNT陰極など新しい電子源などを活用する事により、その可能性はますます拡がることできる。

参考文献

- [1] Yasufumi Hosumi, "Development of field-emission electron gun from carbon nanotube(2)", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear accelerator Meeting in Japan (July-20-22, 2005, Tosu Japan) pp367-369
- [2] K. Togawa, et.al., "Result of Emittance Measurement on the CeB6 Gun and Application to Xray-FEL", Proc. 1st Particle Accelerator Society of Japan
- [3] HeatWave Lab Inc. Web site, <http://cathode.com/>
- [4] W.B.Herrmannsfeldt, "EGUN-AN ELECTRON OPTICS AND GUN DESIGN PROGRAM", SLAC-Report-331
- [5] CST GmbH Web site, <http://www.cst.com/>