

マイクロミニチュア RF 電子銃

田辺 英二^{1,A)}、菅野 浩一^{A)}

^{A)} AET Japan, Inc.

〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-2-3 アーシスビル 9 階

概要

コンパクトでかつ経済的な、低エミッタンス電子ビームを発生できる電子源として熱陰極 RF 電子銃は広く活用されている。しかし、逆加速された電子ビームが陰極にあたることによるバックボンバードメント現象によって $2\mu\text{sec}$ 以上のパルス幅の電流は不安定になる。そこで、電子ビームの引出しと速度変調を超小型の RF 電子銃で行ない、バックボンバードメントをなくす三極管型 RF 電子銃の開発を行っている。これによりエミッタンスとエネルギー幅も同時に小さく出来ることが、3次元電磁界解析コード MW - Studio、及び 2.5次元電子軌道解析コード GPT によるシミュレーションから示唆された。現在、AET の RF 電子銃の熱陰極と置換可能な小型 RF 電子銃の開発を進めている。また、この技術を用いて、人体内部に挿入可能な超小型 X 線源用のマイクロミニチュア RF 電子銃の開発も行っている。

1. はじめに

RF 電子銃は DC 電子銃に比べ、比較的高い電界をかけることができ、装置の小型化や電子ビームの低エミッタンス化に有効である。また、熱陰極は安価でマイクロ波電子管などに広く応用されており、長い歴史と実績がある。しかし、RF 電子銃に熱陰極を使うとバックボンバードメントが起こる事やパルス幅の制御が出来ないなどの欠点があった。そこで、バックボンバードメントをなくし、得られる電子ビームのエミッタンスを小さくし、同時にパルス幅をコントロールするため、三極管型 RF 電子銃の開発を行っている。この三極管型 RF 電子銃の入力用のマイクロミニチュア RF 電子銃は医療用・工業用の新しい電子源や X 線源として利用できる可能性がある。

2. 三極管型 RF 電子銃

図 1 に一般に使われている熱陰極を使った二極管型 RF 電子銃と現在開発を行っている三極管型 RF 電子銃との比較を示す。二極管型熱陰極 RF 電子銃では、ある位相で加速された電子はカソードに戻ってくるバックボンバードメント現象が起こる事が良く知られている^[1]。また、加速される電子ビームのパルス幅は、RF 空胴の加速電界のパルス時間で決められ、コントロールするのは不可能である。これら避けるため、レーザーによる光励起型のフォトカソードが使われるが、システムが高価で複雑となり一般的な

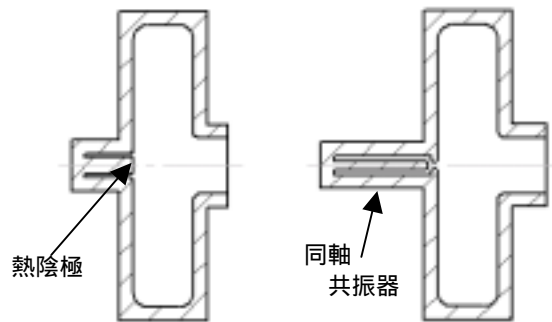


図 1：熱陰極 RF 電子銃。左が二極管型 RF 電子銃、右が $\lambda/4$ 同軸共振器を取り付けた三極管型 RF 電子銃。

応用には向いていない。

一方、この二極管型 RF 電子銃にもうひとつの小型共振器を設け、メインの加速空胴の加速電界に使われるマイクロ波電力のほんの一部を供給することでビームを取り出し、同時にバンチングさせて電子をメインの加速空胴に供給することによりビームをコントロールすることのできる三極管構造が考えられる。この小型共振器はリエントラント構造でも可能であるが、共振器の外径を現在使われている RF 電子銃の熱陰極と同じ程度（約 5mm）にするために $\lambda/4$ 型ミニチュア同軸共振器を使うこととした（図 2）

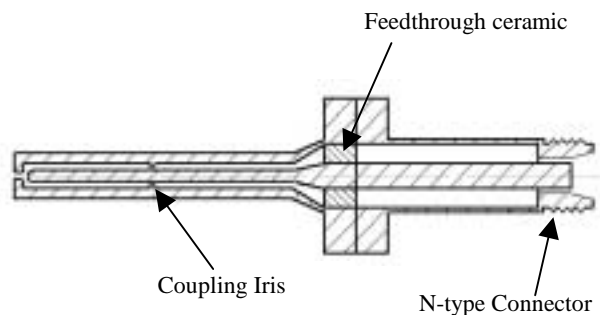


図 2：ミニチュア RF 電子銃の断面図

実際に三極管構造にする事による効果を調べるため、一般的に使われている BNL 型 RF 電子銃で比較検討を行った。すなわち、1.6cell S-band RF 電子銃空胴に上記のミニチュア RF 電子銃を取り付けた図 3 のような熱陰極 RF 電子銃を仮定しシミュレーションを行った。図 4、5 にそれぞれの RF 電子銃に関する電子軌道シミュレーションによって得られた電子

¹ E-mail: etanabe@aetjapan.com

ビームの時間に対する位置の変化を示す。図 4 ではまず二極管型 BNL RF 電子銃においてメインの加速空洞内に入った電子の一部が逆加速されてカソードに戻ってくる状態が示されている。一方、図 5 においてはこれを三極管型にすることで、まず電子ビームの引出しとパンチングが行われる。この時、熱陰極にかかる平均加速電界は十分に高い(45MV/m)が、ギャップ長が1mm程度であり40keV程度に加速される。この加速電界の位相、電圧とドリフト長を選ぶことで、メイン加速電界の最適の位相条件でビームを入力する事が出来る。図 5-b) にはミニチュア RF 電子銃近辺のビームの位置を拡大して示す。ある位相のビームはやはりカソードに逆加速されてはいるが、この逆加速されたビームエネルギーは二極管の RF 電子銃で逆加速されたビームのエネルギーよりはるかに低いものであり、カソードに対するバックボンバードメントの影響には殆ど寄与しない。図 6 にはビームのエミッタンスの変化を示す。これよりビーム入力加速電界の位相に対して最適化されることでエミッタンスを大幅に低くすることが示されている。

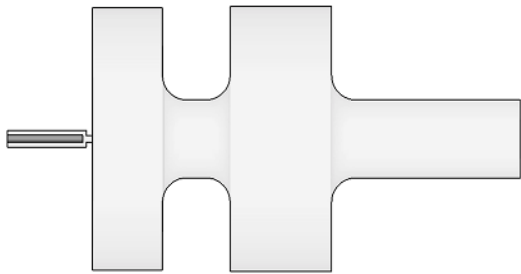


図 3 : 三極管型 1.6cell S-band RF 電子銃。λ/4 型同軸共振器とBNL型RF電子銃空洞を組み合わせる事により三極管型RF電子銃空洞を構成する。

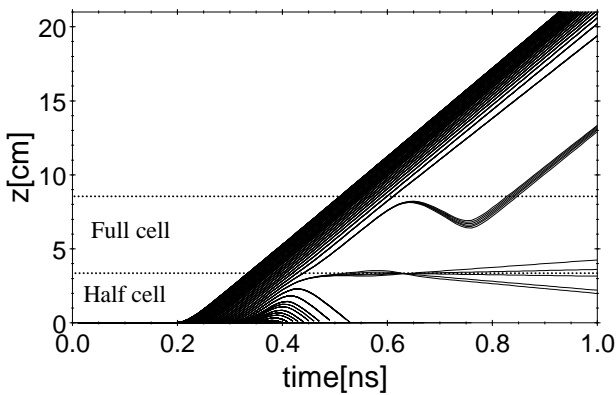


図 4 : 二極管型 RF 電子銃のビーム位置と時間変化に関する計算結果。Z=0 をカソード面としている。加速空洞内に入った電子が逆加速されカソードに戻る現象が見られる。

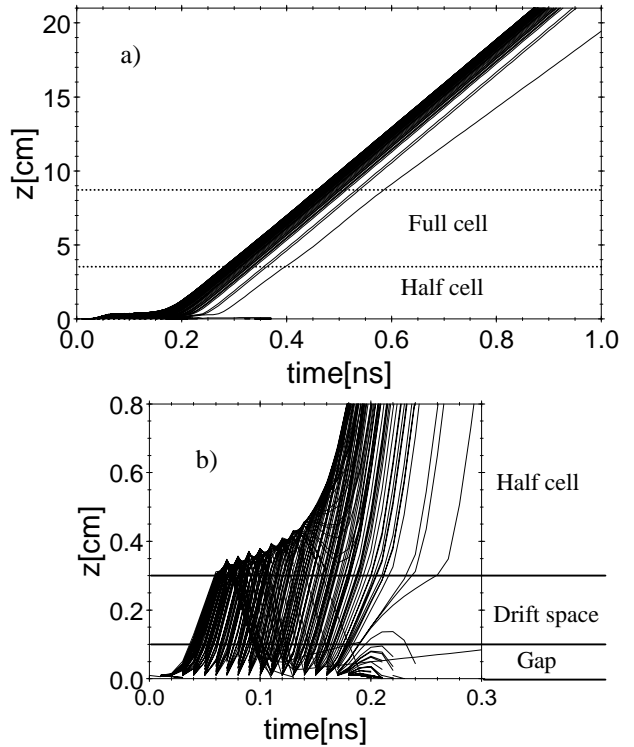


図 5 : 三極管型 RF 電子銃のビーム位置と時間変化に関する計算結果。Z=0 をカソード面としている。a)三極管全体のビーム位置、b)ミニチュア RF 電子銃近辺のビーム位置を示す。

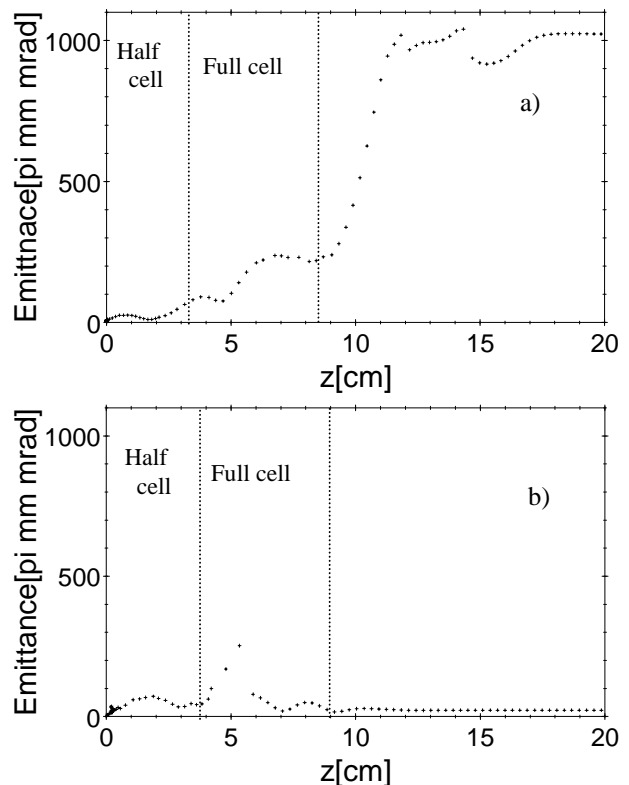


図 6 : RF 電子銃のエミッタンス変化。a)二極管型、b)三極管型に関する計算結果

3. マイクロミニチュア RF 電子銃

直径 5 mm 以下の電子源は RF 電子銃のみならず様々な用途が考えられる。図 7 にフレキシブルな同軸線を使い、その先に $\lambda/4$ 型同軸共振器を付けたマイクロミニチュア RF 電子銃の基本構造を示す。また、表 1 に S-band で設計したマイクロミニチュア RF 電子銃の設計パラメータを示す。

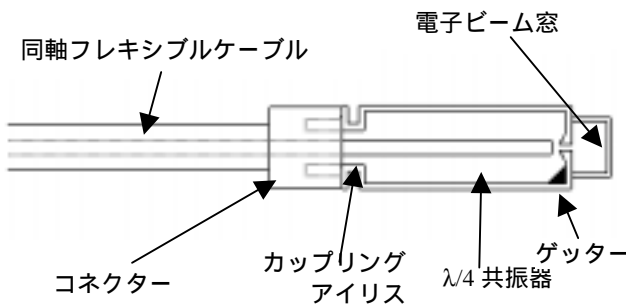


図 7: マイクロミニチュア RF 電子銃

表 1 . S-band マイクロミニチュア RF 電子銃

| | | |
|----------|------|------|
| 周波数 | 2856 | MHz |
| 共振器長 | 2.67 | cm |
| 同軸外形 | 5.42 | mm |
| 同軸内径 | 2.36 | mm |
| Q 値 | 1016 | |
| 入力電力 | 74 | kW |
| 加速電界 | ~45 | MV/m |
| ビームエネルギー | 40 | keV |

マイクロミニチュア電子銃を超小型にする為、カソード材としてカーボンナノチューブ (CNT) を使った設計を進めている。CNT は一本のナノチューブ当たり $1\mu\text{A}$ までの電子の放出が得られるとされており、ナノチューブの平均密度が $10^9/\text{cm}^2$ 程度とすると 1mm^2 では 10A 程度までは得られると予想される。炭素の結合が共有結合であることや電子流が広い面積に分散することから熱やイオンの衝突に対しても強く、低い真空度 (10^{-8}Torr 以下) でも長寿命 (直流 12kV で 1 万時間以上) で使用できる^[2]。図 8 に電流電圧特性を、図 9 に Fowler-Nordheim (F-N) プロットを示す。直流の場合もパルスの場合もほぼ同じ F-N の式の直線状にのっており、予想通り 1mm^2 当たり 1A から 10A 以上の電子電流が得られている。低い電圧での電流値の変動はコンディショニングの効果である。コンディショニングの過程でアーク放電が何度か起きたが、一度でも放電が起きれば壊れてしまうニードル電極と異なり CNT 陰極ではその後も安定して電子の放出が得られた。電子放出の安定性、及び十分な電流値が得られることから CNT 陰極は超小型加速器に適しているとの結論に至った。

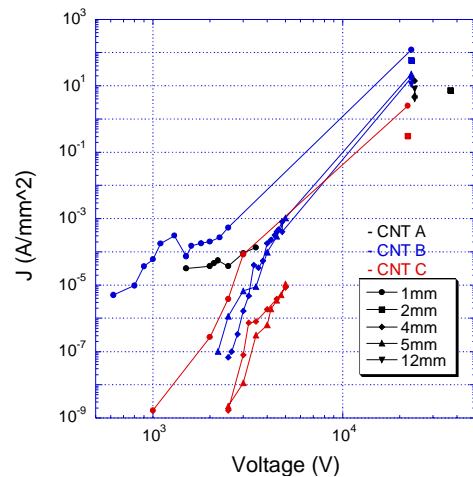


図 8: 電流 - 電圧特性。

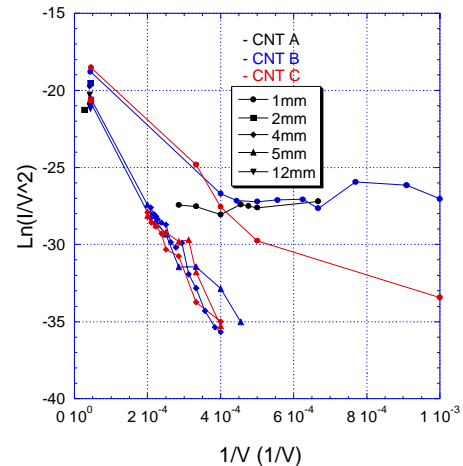


図 9: Fowler-Nordheim プロット

4. まとめ

熱陰極を使った二極管型 RF 電子銃に同軸共振器を使った超小型の RF 電子銃を付け加え、三極管構造にすることによりバックボンバードメントを殆どなくすることが出来る。また、この構造においてはビームエミッタンスを下げ、エネルギー Spektrum 幅を大幅に改善できる事が分かった。この小型同軸共振器の直径を更に数 mm 以下に下げ、カソードにカーボンナノチューブを使うことでマイクロミニチュア RF 電子銃を作ることができる。このマイクロミニチュア RF 電子銃は将来の医療・工業・研究の分野において様々な応用が考えられる。

参考文献

- [1] F.Oda, et al., “赤外自由電子レーザー用熱陰極 RF 電子銃の性能評価”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001
- [2] Y. Saito and S. Uemura, Carbon 38 (2000) 169-182