

マイクロミニチュア RF 電子銃の開発

菅野 浩一、田辺英二

株式会社エー・イー・ティー・ジャパン

〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-2-3 アーシスビル 9 階

概要

熱陰極 RF 電子銃を使用する場合、バックボンバードメントによって陰極温度が上昇し安定に電子を供給することが難しくなる。そこで、バックボンバードメントを抑えると期待される三極管型 RF 電子銃の入力用に使用できる S-band マイクロミニチュア RF 電子銃の設計開発を行った。この RF 電子銃空洞構造を 1/4 波長同軸共振器にし、さらに、電子源にはカーボンナノチューブ (CNT) 冷陰極を採用したため、外径が 7mm 以下という超小型 RF 電子銃の実現が可能となった。マイクロミニチュア RF 電子銃の短い加速ギャップに発生する高電界で電子の引出し・加速・集群 (バンチング) を行ない、その電子をメインの加速空洞で相対論領域まで加速する三極管型 RF 電子銃はマイクロミニチュア RF 電子銃がグリッドの役割を果たしバックボンバードメントを防ぐことが出来る。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、マイクロミニチュア RF 電子銃を用いた三極管型 RF 電子銃はバックボンバードメントの影響を抑え、エミッタンスを小さくすることが出来ると示唆された。

1 はじめに

RF 電場は DC 電場に比べ絶縁破壊強度が大きいので、高電界加速が出来る。従って RF 電子銃を用いれば、比較的短い距離で相対論的領域まで電子を加速できるので空間電荷の影響が小さく、エミッタンス増大を防ぐことが可能となる。しかし、安価で長い歴史と実績がある熱陰極を RF 電子銃に使用するとバックボンバードメントと呼ばれる高周波電場によってある位相の電子は逆流して陰極に衝突し、電子放出が不安定になる現象が起こる。このため、マクロパルス幅と繰り返しが制限されてしまう [1]。この現象を回避するため、高出力短パルスレーザーを陰極に照射し、あらかじめバンチした電子を励起する光陰極が研究されているが、システムが高価で規模も大きくなる。特に、Cs₂Te などの高量子効率材料は、寿命が短く、取扱いが難しい。このように光陰極はバックボンバードメントを防ぐことが出来るが、コンパクトで低コストかつ取扱いが容易なシステムを要求する医療・産業利用には向いていないと考えられる。そこで、光陰極を用いず、1mm 程度の狭い加速ギャップを持った RF 加速空洞で電子を放出・前段加速をし、更にメインの RF 空洞で加速することでバックボンバードメントを抑える三極管型 RF 電子銃の開発を行っている。図 1 に従来型熱陰極 RF 電子銃と三極管型 RF 電子銃の概念図を示す。電子放出・前段加速用の RF 空洞には 1/4 波長型ミニチュア同軸共振器を使うこととした。

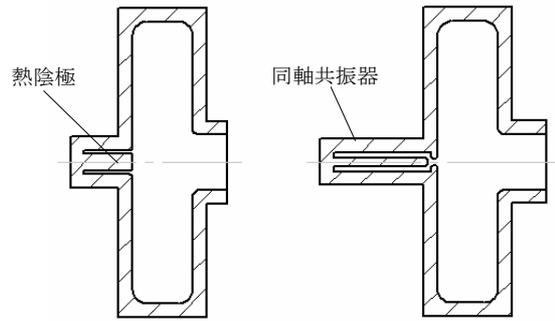


図 1：熱陰極 RF 電子銃。左が二極管型 RF 電子銃、右が 1/4 波長同軸共振器を取り付けた三極管型 RF 電子銃。

2 マイクロミニチュア RF 電子銃

図 2 に S-band マイクロミニチュア RF 電子銃の概念図を示す。この RF 電子銃空洞は 1/4 波長同軸共振器開口端側の内部導体先端に陰極を取り付けた構造を持っており、図のように RF ケーブルによって伝送された RF パワーを N 型コネクタで接続して空洞内に RF パワーを供給し、内部導体と外部導体間のギャップに生じる電場により電子引出し・加速を行う。三極管型 RF 電子銃の前段加速用としてはリエントラント型の共振器でも可能であるが、より小型にするため 1/4 波長同軸共振器とした。これにより空洞直径は 7mm 以下の超小型 RF 電子銃が実現する。実際に製作された電子銃の写真を図 3 に示す。表 1 にはその特性を上げた。

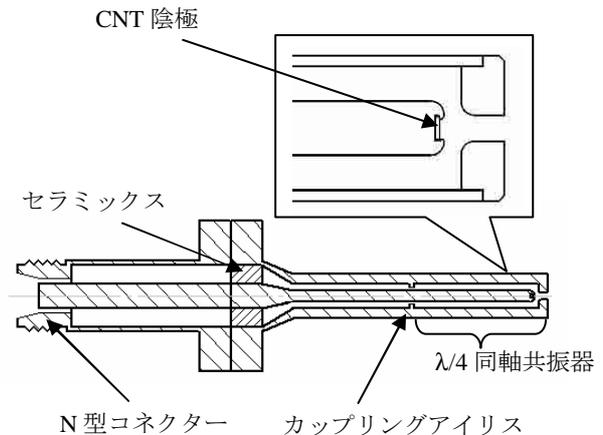


図 2：マイクロミニチュア RF 電子銃の概念図。1/4 波長同軸共振器にケーブルによって伝送されてきた RF パワーを供給し、開口端に発生する電場を利用して、内部導体先端に取り付けられた陰極から電子の引出し・加速を行う。

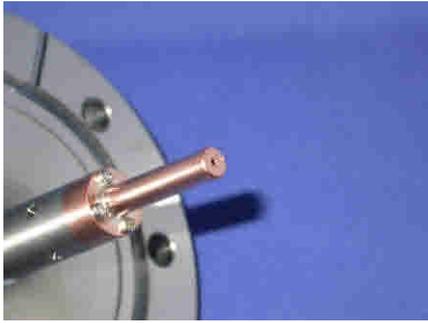


図3：マイクロミニチュア RF 電子銃概観。

表1：マイクロミニチュア RF 電子銃の特性

周波数	2856	MHz
陰極半径	0.47	mm
共振器長	25.9	mm
空洞外径	5.42	mm
内部導体径	2.36	mm
Q 値	995	
シャントインピーダンス	21.2	MΩ/m
カソード表面電場	~35	MV/m
軸上最大電場	~45	MV/m

また、マイクロミニチュア電子銃を超小型にするため、陰極材にカーボンナノチューブ (CNT) 冷陰極を用いる。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 4-A) に Fowler-Nordheim(F-N)プロットを、図 4-B)に電流電圧特性を示す。直流の場合もパルスの場合もほぼ同じ F-N の式の直線状のようになっており、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。CNT 陰極を適用することで空洞直径が 7mm 以下に収めることが現実的となった。

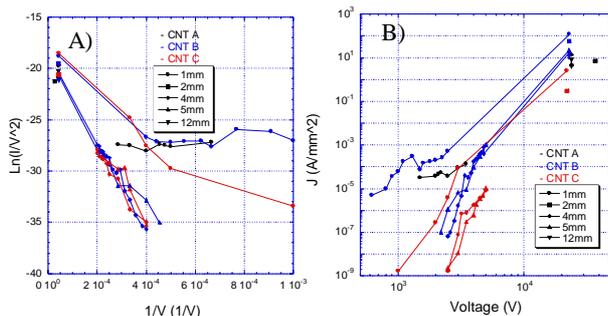


図4：カーボンナノチューブ冷陰極試験結果。A) Fowler-Nordheim(F-N)プロット、B) 電圧—電流特性。

3 三極管型 RF 電子銃

マイクロミニチュア RF 電子銃を用いた三極管型 RF 電子銃のバックボンバードメントについて、従来の RF 電子銃と比較するために、2.5 次元電子軌道解析コード GPT による解析をした。本解析では、直径 0.94mm のカーボンナノチューブ陰極面から 3A 程度の電流が 2856MHz の高周波の半周期 (175ps) にわたって放出されると仮定した。また二極管型 RF 電子銃空洞及び三極管型 RF 電子銃のメイン空洞には BNL type の 1.6cell S-band RF 電子銃空洞を仮定した。すなわち、BNL type RF 電子銃空洞にマイクロミニチュア 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。この BNL type の RF 電子銃空洞内のピーク電場はハーフセル、フルセルともに約 75MV/m 程度とした。

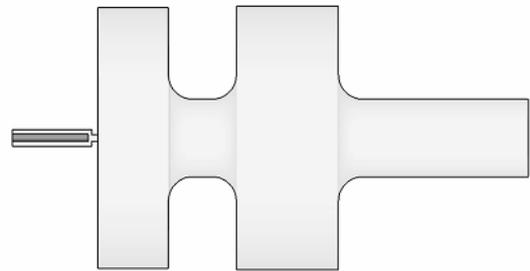


図5：三極管型 1.6cell S-band RF 電子銃。1/4 波長型同軸共振器と BNL 型 RF 電子銃空洞を組み合わせる事により三極管型 RF 電子銃空洞を構成する。

二極管型 BNL-type RF 電子銃についてシミュレーションをした結果を図 6 に示す。エネルギーは 3.5MeV まで加速されている。ここで陰極の位置は $z=0$ とした。陰極から引き出され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図 6-B)からわかる。バックボンバードメント電子の最大エネルギーは 2.6MeV であった。この時のパワーはパルスあたり 93.6kW と見積もられた。三極管型 RF 電子銃に関するシミュレーション結果は図 7 に示す。ここでは 1/4 波長同軸共振器とメイン空洞に供給する RF パワーの位相差 95 度、ドリフト空間の長さ 4mm としている。バックボンバードメント電子の最大エネルギーは 967keV であった。バックボンバードメントパワーはパルスあたり 12.9kW と見積もられた。三極管型にし上記の条件で RF 電子銃を運転すると、二極管型に比べ陰極が電子から受けるパワーが 14% 以下に出来ると推測される。これは、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ことを示している。また、マイクロミニチュア RF 電子銃を用いた三極管型 RF 電子銃から得られる電子ビームのエミッタンスは $18\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ と二極管型の $207\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ に比べ大幅に低い値が得られた。これはマイクロミニチュア RF 電子銃のアーチャーチャにより質の悪い電子が取り除かれるためと考えられる。得られる電荷量は、二極管では陰極から発生した電子の 62.3% であったのに対し、三極管型では 44.2% と二極管の 7 割程度となるが、カーボンナノチューブより十分に大きな電流を得ており、問題はないと考えられる。

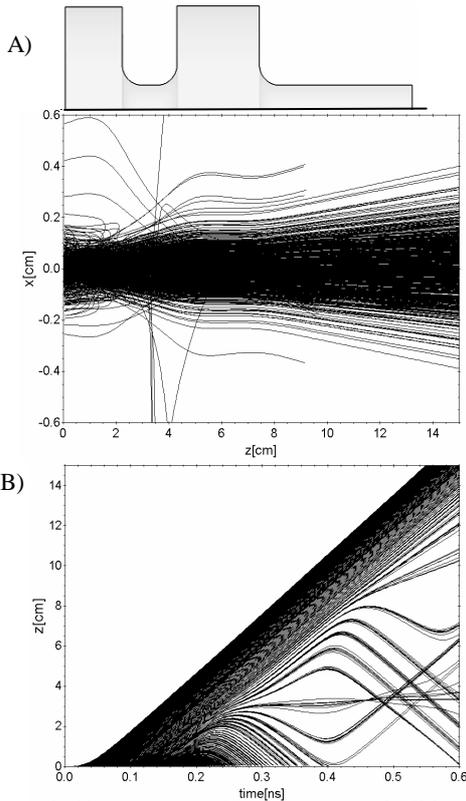


図6：二極管型 RF 電子銃に関する電子軌道解析結果。A)電子軌道、B)ビーム進行方向位置と時間の関係。電子が逆加速され陰極に戻る現象が見られる。

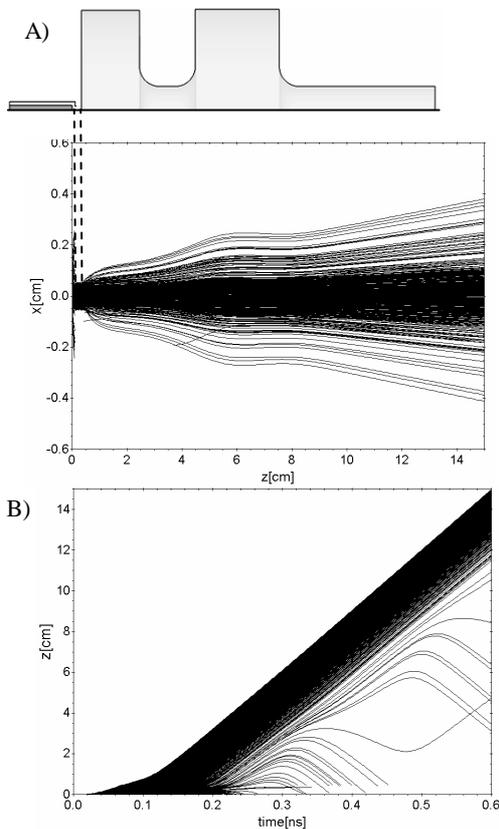


図7：三極管型 RF 電子銃に関する電子軌道解析結果。A)電子軌道、B)ビーム進行方向位置と時間の関係。

4 超小型電子線源としての利用

マイクロミニチュア RF 電子銃は、図8に示すように RF パワーを同軸フレキシブルケーブルで空洞に供給し、電子ビーム出口に電子ビーム窓を取り付け、ゲッターで空洞内部を真空に保てば、電子銃本体が小型である利点を活かした多様で柔軟な電子源として利用が可能である。また、電子ビーム窓のかわりにターゲットを置くことで超小型 X 線源としても利用できる。このように、三極管型 RF 電子銃の入力用としてだけではなく、医療用・工業用の様々な分野において、新しい電子源や X 線源として利用できる可能性がある。

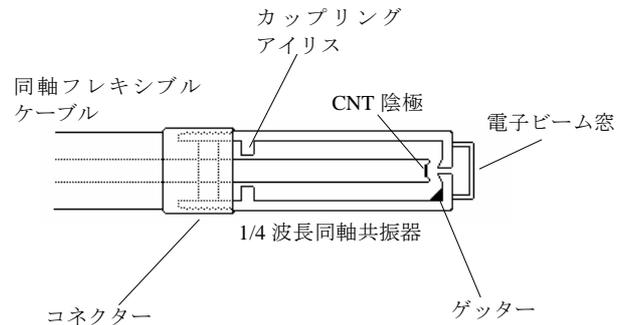


図8：単体でのマイクロミニチュア RF 電子銃使用例。電子銃出口に電子ビーム窓を置くことで超小型 X 線源に、また、ターゲットを設置して X 線源としても利用可能。

5 まとめ

マイクロミニチュア RF 電子銃の製作を行った。この電子銃空洞に 1/4 同軸共振器を用い、陰極にカーボンナノチューブを使うことで超小型 RF 電子銃となった。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。また、この電子銃を用いた三極管型 RF 電子銃に関して、GPT を用いたシミュレーションを行うことで評価した。その結果、二極管型に比べ、バックボンバードメントパワーを低くすることができ、ビームエミッタンスを下げる事ができると考えられる。

今後、マイクロミニチュア RF 電子銃ビーム試験をし、光陰極を用いずに、従来の熱陰極 RF 電子銃の熱陰極の代わりにこの電子銃を取り付けてバックボンバードメントの影響を抑える三極管型 RF 電子銃のビーム試験を行う。同時にマイクロミニチュア RF 電子銃の最適化を行っていき、コンパクトかつ低コストな電子源の実用化・高性能化に向けて研究開発を行う。

参考文献

[1] C. B. McKee and John M. J. Madey, NIMA304 (1991) 386-391
 [2] Y. Saito and S. Uemura, Carbon 38 (2000) 169-182