

熱陰極500MHz-CW電子銃の開発

蒲越虎¹、田中博文、中西哲也、花川和之^{A)}、金太炫、築島千尋、丸山昭彦、牧田陽
三菱電機(株)先端技術総合研究所電機部量子装置グループ

〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1

^{A)}三菱電機(株)電力・産業システム事業所磁気応用先端システム部加速器応用技術課

〒652-8555 兵庫県神戸市兵庫区和田崎町1-1-2

概要

大出力電子加速器の電子源として500MHz、CWモードの80KV電子銃を開発した。電子源としては3極管熱陰極(CPI製Y845)を用いた。電子ビーム強度変調はコンパクトな同軸伝送ラインを経て伝送した500MHzのRF信号をカソードグリッド間に印加して実現した。60WのRFアンプを用い時カソードグリッド間にピーク値で約60V以上掛けることができた。また、50GHzのオシロスコープと高速応答ファラデーカップを用いて500MHzにパルス化された電子ビームを観測した。ピーク電流は200mA以上、バンチ位相幅は60度程度が実現できた。

1. はじめに

我々は環境に優しい殺菌滅菌手段として応用が期待されている大出力電子線加速器を開発している。開発している電子線加速器はContinuous Wave Microtron加速方式[1][2][3]を用いて、80keVの入射電子ビームを500MHzのリエントラント型加速空洞を数回通過させて5MeV(最大10MeV可)まで加速する。発生した30kW以上の電子ビームは電子線照射またはX線照射のために利用される。主な応用分野は検疫照射、医療器具滅菌照射、香辛料殺菌照射などが考えられる。このような高出力の電子ビームを効率的に発生させるには、入射電子ビームを加速空洞と同じ周波数500MHzでパルス化させることが重要である。パルス化方法としては、3極管のカソードグリッド間に同周波数のRF信号を印加する方式を採用した。実際には、大電流で狭いパルス幅の電子ビームを得るためにカソードグリッド間にDCの逆バイアスを掛ける必要がある。逆バイアス電圧と印加するRF電圧両方をなるべく大きくすることが望ましい。それは同じパルス幅の電子ビームを得るには逆バイアス電圧とRFピーク電圧の比を一定に保つ必要があるが、熱陰極から引出せる電子電流の大きさは上記二つ電圧の差に比例して指数関数的に増えるからである。このタイプの電子銃のポイントは如何にハイパワーのRF信号をカソードグリッド間に伝送するかにある。そのためには、共鳴空洞方式と同軸伝送ライン方式の二つの方法があるが、比較的簡単で小型にできるという理由で、我々は同軸伝送ライン方式を選んだ。

2. 500MHz-CW電子銃構成

開発した電子銃は以下のコンポーネントから構成されている：3極管、RF信号伝送系、フィラメント電流とバイアス電圧導入系、RFアンプ、DC電源、制御装置、高圧デッキ、引出し電極とアノード、加速管、光信号伝送システム。図1には電子銃のシステム構成を示した。高圧デッキ内にはフィラメント電源、バイアス電源とRFアンプ及び制御用PLC(Programmable Logic Controller)が設置されている。用いたRFアンプの最大出力は60Wである。電子銃から発生した500MHzの電子バンチの位相を加速空洞のRF電場に同期させる必要があるため、Y845に送るRF信号は加速空洞からピックアップしたRF信号をO/E-E/O変換モジュールを使って、高圧デッキ内のRFアンプに伝送して得るようにした。電子ビーム強度変調のためのRF信号伝送系はグリッドバイアスとフィラメント電流導入部を含め加速管内(図1では加速管セラミックダクト内)に設置した。

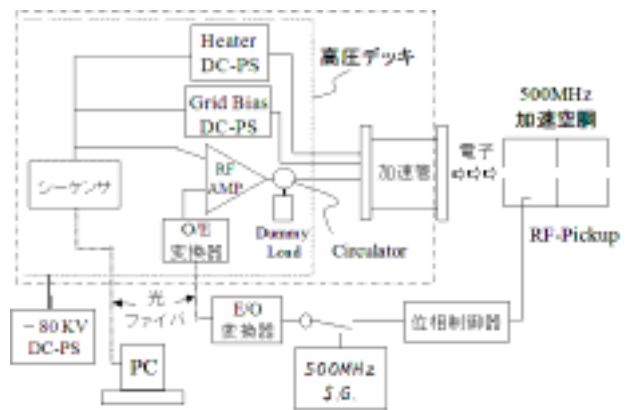


図1：500MHz-CW電子銃システム構成

3. RF信号伝送系

必要なRF電力を最小に抑えるために、注意を払って設計したのはRF信号伝送系である。RFアンプの出力端からY845後部の3重同軸コネクタまではインピーダンスがほぼ50Ωである同軸伝送系を構築した。また、バイアス電圧とフィラメント電

¹ E-mail: pu.yuehu@wrc.melco.co.jp

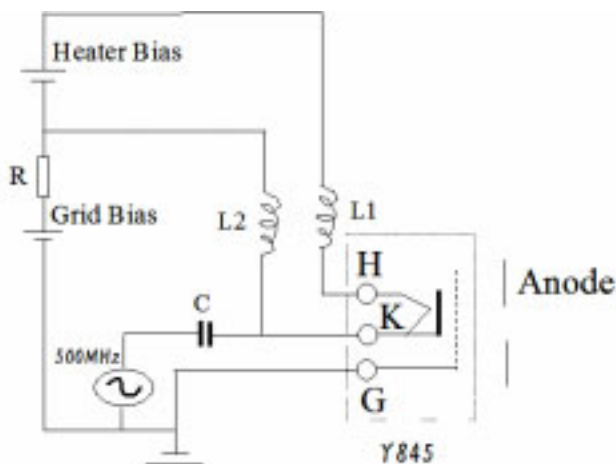


図2：RF信号伝送系と電子銃回路図

流導入部もなるべくコンパクトに設計し、加速管内部に収納できるようにした。図2には伝送系とY845を含む電気回路図を示した。この回路構成は典型的なものであるが、RF伝送構造そのものは低反射低損失であるように注意深く設計しなければならない。RFアンプとバイアスDC電源等の間はDC絶縁用のコンデンサを入れる必要がある。また、DC電源と同軸伝送系の間はインダクタンスを設けて同軸伝送系からのRF漏れを防ぐようにする必要がある。同時に、RF信号の反射とロスを最小に抑える必要がある。図3にはこれらを考慮して設計した電子銃RF伝送系構造を示した。

この構造では、バイアスとフィラメント電流導入リード線部を除けば、すべて50Ωの同軸構造になっている。RFアンプとDC電源間の絶縁コンデンサ容量約200pFのセラミックコンデンサを10個程度使ってRF同軸伝送路の内導体の表面に沿って円周状に配置させ、500MHzのRF信号に対してほぼ同軸構造になるようにした。この絶縁コンデンサ部によるRF反射は無視できるほど小さいことが試験で確かめられている。

図3に示す同軸伝送系はY845に近い側では、3重同軸になっており、Y845の後部3重軸コネクタにフィットするようにした。同軸伝送路の中間部には、上記絶縁コンデンサ部と、バイアス電圧とフィラメント電流導入端子を設ける必要があるため、同中間部を両端に比較してインピーダンスを50Ωに保ったまま大きくした。その結果、RF伝送系はインピーダンスが50Ωのテーパ同軸管になっている。バイアス導入端子はテーパ同軸の中間導体に接続し、内導体と外導体間に数十ボルト以上の逆バイアスを掛けられる構造になっている。実際、この電圧はY845の後部コネクタを經由してカソードグリッド間に掛かる。尚、内導体に接続しているバイアス導入リード線は中空パイプとなっている。フィラメント電流導入リード線はこの中空パイプを通して、伝送路末端部3重軸構造の一

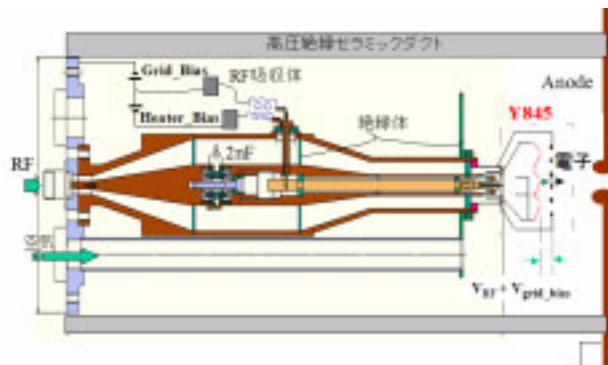


図3：500MHz-CW電子銃RF伝送系構造

番内側の導体に接続している。フィラメント電流は中間導体と内側導体を経てY845のフィラメントに供給される。図2の回路図で示したRF漏れを低減させるためのインダクタンスL1とL2は同軸伝送路のすぐ近くにコイル及び高周波特性良好な磁性体を設置して構成した。図4に製作した電子銃とビーム収束用ソレノイドの外観写真を示した。

4．RF伝送特性試験

試験はそれぞれローパワーとハイパワーで行った。ローパワー試験は500MHz信号発生器とオシロスコープを用いて行った。その結果、伝送系入力RF信号に対する終端まで伝送したRF信号の電圧比は86%であることが分かった。尚、RFパワー比では73%となる。この結果はオシロスコープ入力インピーダンスを50Ωにして得られたので、終端での反射がない場合の結果である。実際伝送系をY845に接続した場合、カソードグリッド間の静電容量(10pF程度)とビームローディングによる等価抵抗が負荷インピーダンスを決める。

ハイパワー試験は、60W - 500MHzアンプと通過型パワーメータ(Bird社製)を用いて行った。アンプと伝送系間にサーキュレータを設けた。測定は、伝送系終端にはY845を模擬した静電容量を付けて行った。このセットアップでは、RF信号は終端で全反射を起こす。61.5Wの入力RF信号がある時、入力端からみた反射は約34.5Wである。パワーロスは27Wである。このロスは全部バイアスリード線から伝送路外へ漏れたと考えられる。また、漏れたRFの殆どはリード線近くに設けた磁性体に吸収されたと考えられる。実際、磁性体コアの温度を測定した。温度上昇は30度以下であった。伝送系をY845に接続して、ビームが出た状態では、ここで述べた反射及びロスの量は共に減少すると考えられる。

更に、製作した伝送系の周波数特性について、スペクトルアナライザを用いて測定した。その結果、製作した伝送系のRF透過特性は500MHz～2GHz

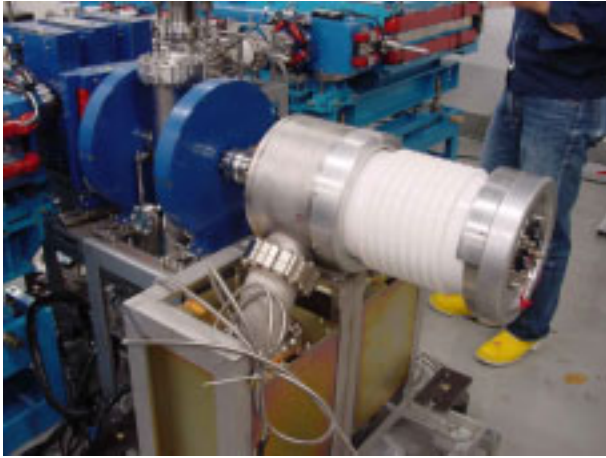


図4：500MHz-CW電子銃と収束ソレノイド

の間ではほぼ同じであることが分かった。この結果は500MHzより高い周波数領域でも今回製作した伝送系は十分よい性能を発揮できる可能性があることを示唆していると思われる。

以上の測定から、設計した伝送系を用いた際に、Y845カソードグリッド間に印加できるRFピーク電圧は次の式で表すことができる：

$$V_{\text{負荷}} = V_{\text{RF入力}} \times V_{\text{aa}} \times \left| \left(1 + \frac{\text{負荷}}{Z_0} \right) \right|$$

$$\text{負荷} = 1 / \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{R_{\text{負荷}}}{Z_0} + j \omega C_{\text{負荷}} \right)$$

但し、 $V_{\text{aa}} = 0.856$ は測定による電圧透過係数である。 $V_{\text{RF入力}} = \sqrt{P_{\text{RF入力}} \times 50} \times 1.414$ は入力RFピーク電圧である。 $C_{\text{負荷}}$ はY845カソードグリッド間静電容量を表す。 $R_{\text{負荷}}$ はビームローディングを表す。 Z_0 は50Ωで伝送路の特性インピーダンスを表す。

5．ビーム試験

ビーム試験を行う前に、電子銃の高圧エージングとY845の活性化を実施した。ビーム試験時アノード付近真空度は 5×10^{-8} Torr位であった。電子ビームバンチの時間幅がnsec以下と短いため、ビームバンチ波形を観測するために、大きいファラデーカップを用いずに、浮遊電気容量が小さいN型端子そのものを用いた。N端子中心導体にコレクトされた電子はバンチ波形の時間構造を維持したままN型端子に接続された同軸ケーブルにバンチ波形に対応した信号を発生させる。測定には50GHzのサンプリングオシロスコープ(Agilent 86100A)を使った。電子銃高圧デッキ内RFアンプへのRF信号は500MHzの信号発生器で発生した時間幅300 μ sec、繰り返し10Hz位の500MHz信号を2分割して片方の信号を図1に示す回路で伝送した。もう片方の信号は測定用トリガとして用いた。観測した電子ビームバンチ波形の一例を図5に示した。この測定から電子ビームバンチの位相幅が60度程度であ

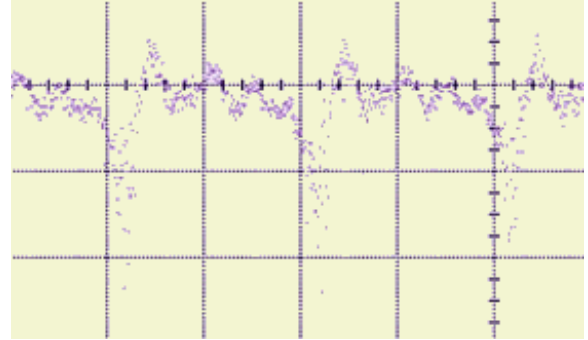


図5：50GHzデジタルオシロスコープを用いて測定した500MHzの電子ビームバンチ波形。横軸は1ns/div. 縦軸は5mA/div

ることが分かった。一方、電子銃パラメータを同様にしてビームサイズより大きいファラデーカップを用いて電子ビームバンチ電流を測定した。ピーク値として約200mAの値が観測された。その時、RFアンプの出力は約60Wで、グリッドバイアスは55Vで、フィラメント電流は1.2Aであった。上記測定結果は計算値と良く一致した。ビームバンチの位相変動は1度以下であった。

6．結論

3極管を用いた熱陰極500MHz-CW電子銃を開発しビーム試験を行った。RF伝送効率のよいコンパクトな同軸伝送系を設計し、60WのRFパワーで200mA以上のビーム電流を引出すことに成功した。ビーム電流、バンチ位相幅、位相安定度は設計仕様を満たす結果が得られた。現在加速器本体と組み合わせて、加速試験を実施中である。

参考文献

- [1] P. Lidbjork, "Microtrons", CERN 94-01, Vol. 2, (1994), 1994.
- [2] H. Tanaka, "Beam Dynamics in a CW Microtron for Industrial Applications", EPAC 2000, Vienna, (2000), 1005.
- [3] H. Tanaka, et al. "Beam Test of a CW Microtron with a 500 MHz RF Cavity for Industrial Applications", Proceedings, PAC 2003, Portland, Oregon