

平成21年 5月29日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2007 ～ 2008

課題番号：19684007

研究課題名（和文） 新型高効率電子管の開発と電子管の応用研究

研究課題名（英文） The development and application of new high efficiency electron tubes

研究代表者

吉田 光宏（YOSHIDA MITSUHIRO）

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：60391710

研究成果の概要：

電子加速器用の大電力マイクロ波源は電子管が唯一の方法である。しかし電子管は空間電荷による効率の限界があり、パービアンズと呼ばれる $I/V^{1.5}$ の量で決定されるため、低電圧化が難しい。そこで本研究では低い印加電圧でも高効率な新型電子管の研究開発を目的として、多ビーム化が容易にできる冷陰極三極管や、空間電荷を分散させるため波長に比べて広いビーム径が利用可能になるオープン空洞型の電子管等について研究を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2008年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
年度			
年度			
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器、電子管、マイクロ波

1. 研究開始当初の背景

電子陽電子リニアコライダー(LC)計画では、円形加速器の限界を超える次世代の高エネルギー物理実験のため大型の電子線形加速器が必要となり、その高周波源であるクライストロンは 10MW 出力の物を数百本必要とする。また円形加速器でもシンクロトロン放射によるエネルギーを補填するため、大電力で連続出力のクライストロンもしくは IOT が多数必要になる。

このように電子加速器においてはマイクロ波領域の高周波加速が最も大電流を高電

圧・高効率で安定に加速できる方式で、そのエネルギー源となる高周波源のほとんどはクライストロン等の電子管である。特に大電力領域ではクライストロンの代替となる良いデバイスは存在しない。しかしクライストロンの高周波変換効率は空間電荷による反発力が原因で、パービアンズ(ビーム電流/印加電圧^{1.5})に比例して低下する。結果的に大電力クライストロンではパルストランスで昇圧したとしても 50%程度と低い。

さらに近年はスイッチデバイスに半導体スイッチを使う事で電源を小型化・長寿命化

できるが、半導体スイッチは数 1000A クラスの大電流をスイッチできるが、耐圧は数 kV と電子管で効率が上げられる印加電圧である数十～数百 kV とはかけ離れている。

2. 研究の目的

従って、電子管で印加電圧を下げつつ、マイクロ波変換効率も改善する様々な研究が行われている。電子管の効率が低い原因は、空間電荷による反発であるので、これを回避する手段が、電子管の高効率化につながる。

ほとんどの試みはビームの本数を増やすマルチビーム方式(MBK)、もしくは断面積を増やすシートビーム方式等であるが、それぞれの難しさもある。以上の状況下で、印加電圧が低く、高効率の電子管の基礎研究を行った。

3. 研究の方法

クライストロン等は、通常大手会社に仕様発注で製造を依頼する事が多く、新たな方式の電子管の研究開発は難しかった。そこで近年、独自にシミュレーション、電気設計、3次元図面設計等の設計体制を整える事で、電子管を製造できるようになった。これらの体制の整備により、共通の部品を用いて効率的に試験を繰り返す事ができるように設計を行い、また電子銃カソードとしてカーボンナノチューブ等の冷陰極カソードを用いる事で、ベーキングや窓等の処理をせず、繰り返し試験を容易にした。

これらの共通の部品や装置を用いて、冷陰極による電子銃の試験を行い、それを応用して電子管の試験を行った。

4. 研究成果

(1) 19年度の研究成果

研究目的で述べた新型電子管をできる限り共通に試験できるように、電子銃やコレクター部、碍子等は共通の物を使用した。これらを組み合わせて、個別の空洞等を製造し、それぞれの新型電子管の試験を行っていく。なお特に共通の部品として、電子銃カソードにカーボンナノチューブ等の冷陰極カソードを利用する事で、従来電子管の製造で最も手間のかかっていた、ベーキング処理や、RF窓を省き、繰り返しの実証試験を大幅に容易にする。

① 電子管用冷陰極の開発

冷陰極の放出電流等の測定を行うため、高圧パルス電源及び、カソード試験装置の製作を行った(図1)。

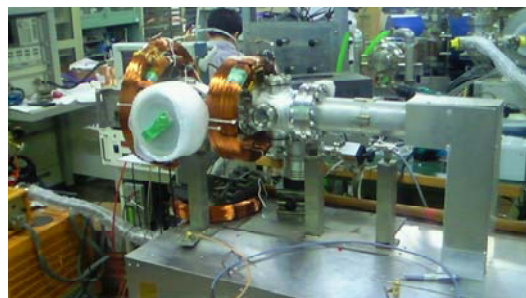


図1：カソード試験装置

冷陰極としてはカーボンナノチューブ(CNT)と Field Emitter Array(FEA)の両方について、このカソード試験装置を用いて放出電流の測定を行った。高圧パルス電源は十分に高い電圧のグリッド電圧と、引き出し電極を印加できるようにし、冷陰極の放出電流を十分に高い電界強度まで試験できるようにした。また、冷陰極からの電子ビームは先端からのビームの広がりがあり、広がった電子ビームを集束させつつ蛍光版で焦点を合わせる事で陰極からの放出電流密度のイメージが見られるような磁気回路を用いる事で、冷陰極の放出電流密度の位置依存を調べられるようにした。図2左はこのカソード試験装置でのビーム軌道のシミュレーションによる計算結果であり、右は蛍光版での電子ビームのイメージである。

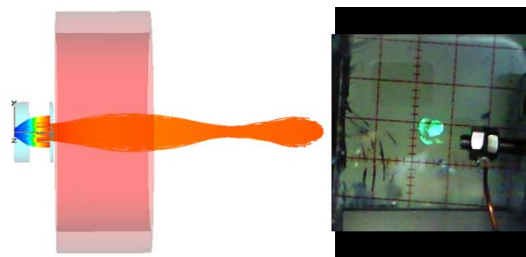


図2：ビーム軌道のシミュレーション(左)と蛍光版で確認した電流密度(右)

同電界強度で比較するとカーボンナノチューブが FEA の一桁程度高い電流得られる。しかし CNT は表面の高さの不均一さと、CNT 自体のばらつきもあり、放出電流が局所的になり、大面積にしても、全電流量が増えないという問題が分った。ただし局所的な電流密度では圧倒的に CNT が高い電流密度が得られたため、CNT 陰極を大面積・大電流化するための様々な試験を行った。

大面積で CNT の放出電流が取れない問題を解決するため、カーボンナノチューブ陰極を高抵抗の抵抗体により、不均一な大電流を電圧降下により抑制して、均一な電界強度が得られるような抵抗値を計算した結果、数 $100\text{k}\Omega \cdot \text{mm}^2$ 程度の面抵抗値が適切である

事が分った。この方法は連続電流では発熱量が大きくなり使えないが、今回はパルス電子管をターゲットとしているため問題無い。この抵抗率をカーボンナノチューブの根元に取り付けるため、チップ抵抗をアレー化、抵抗体の上に根付けしたチップを取り付けブロッキング、抵抗体の上に直接 CNT を圧着するなどの様々な方法で放出電流の測定を行った結果、抵抗体の上に直接 CNT を圧着する方法が大面積化に有効である事が分った。図 3 は CNT 陰極で総電流 1A を得た際の電界強度に対する総電流のプロットである。従来大面積にしても数 10mA 程度だった総電流が、CNT の根元の抵抗による電圧降下により電界放出の指数関数的な特性が消え単純なオームの法則になり、総電流が 1A 以上と飛躍的に増えた。これにより抵抗による電圧降下が大面積化に有効である事が示された。

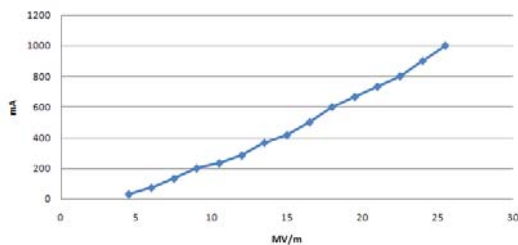


図 3 : 大面積 CNT からの放出電流

以上のような陰極及びカソード試験装置の開発と並行して、いくつかの電子管についてシミュレーションによる検討を行った。

② DC エネルギー回収型クライストロン
通常のクライストロンでは出力空洞において、走行時間の中に、高周波の位相の変化があるため、減速した電子の速度を 0 に近づける事が難しく、また遅い電子に対してより走行時間がかかるため、高率が上がらない。従って DC 電圧でエネルギー回収を行い、出力空洞で通過する際の電子の速度を速くすれば、均一に減速が可能になり、効率の向上が期待できる。ディプレストコレクターはこの一種だが、印加電圧が相対的に高くなり、さらにコレクターで回収する電圧をどこに戻すのが問題である。それに比べて中間空洞を高圧にする DC エネルギー回収型であれば、外部に取り付けるのは、ほとんど電流を消費しない DC 高圧電源のみで済む。

この DC エネルギー回収型クライストロンについては、1次元の計算で十分な評価ができるが、従来のクライストロン用の1次元のコードには中間空洞の変わりに DC 電圧を与える事ができるような物は存在しないため、1次元のコードを開発し、DC エネルギー回収型クライストロンの検討を行った。図 4 はこ

のエネルギー回収型クライストロンを検討した1次元シミュレーションの結果である。1次元シミュレーションでは $2\mu\text{P}$ のビームに対して、60%以上の効率と通常のクライストロンに比べて高い効率が予想された。

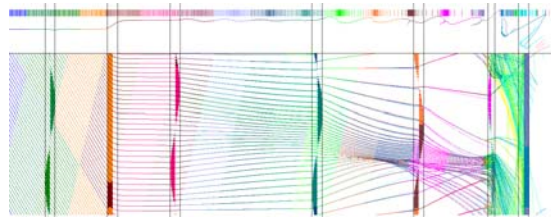


図 4 : 1次元シミュレーション

DC エネルギー回収型クライストロンは図 5 のように構造設計まで行ったが、シミュレーションの結果、冷陰極からの放出電流を多空洞の中を通す程、ソレノイド磁石では集束できない事がかった。熱陰極で電子管を製造した場合は陰極の活性化などに多大な費用がかかり、また効率も従来の電子管よりは向上できる事は示されたが、次に述べる三極管の方が効率も高く、冷陰極の特性も活かせるため、冷陰極三極管に注力する事とした。

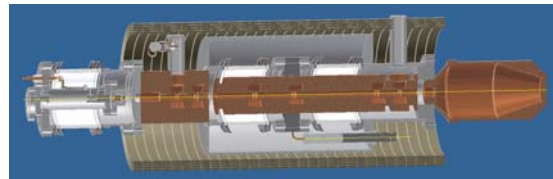


図 5 : DC エネルギー回収型クライストロンの構造設計

(2) 20年度の研究成果

① 冷陰極三極管

電子管の低電圧化のためにマルチビーム化するには、従来は以下のような問題点を抱えている。

- ・ 大電流化、つまりカソードの大面積化が必要となるが、それによる熱カソードのヒーター電力が膨大になる
- ・ 中間空洞・入出力空洞の全てに対して、多ビームに対応した複雑な高次モードの空洞が必要になる。
- ・ 集束磁石が非常に大きくなる。
- ・ パルス運転の場合、電源において大電流のスイッチング素子が必要になる。

ここで19年度に試験を行った冷陰極カソードは実証試験を容易にするだけでなく、上記のようなマルチビーム電子管の問題を解決できる突破口となり得る。冷陰極カソードを使用した場合の利点は以下の通りである。

- ・ 陰極でのヒーター電力消費が無い。
- ・ 従来の熱陰極でグリッド陰極を利用する場合、熱膨張によりグリッドの位置決めが難しく、また高温での蒸発による寿命

の低減を抑えるため、低熱膨張・高融点なパイロリティックグラファイトのような特殊な材料を用いる必要がある。さらにグリッドをあまりカソードに近づける事ができないため、グリッド電圧もあまり低くできずゲインが取れなかった。しかし冷陰極であれば、非常に薄いワイヤーグリッドや金属メッシュのグリッドを使用しても、長寿命が期待できる。またこのような金属メッシュは製造も容易である。

- 冷陰極では、陰極を含めた空洞を形成した場合に陰極の熱膨張によるグリッド間隔の変更による共振周波数のずれが無い。
- グリッド間隔を近づけ、電界も上がる事で陰極-グリッド間の走行時間が減り、高周波化が可能になる。
- 図6、図7のように冷陰極のE-Iカーブから熱陰極に比べると短いバンチが得られ、電子管の効率の上昇や、周波数通倍器としての応用が可能となる。

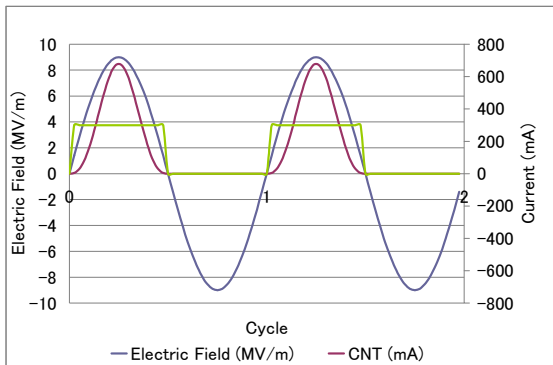


図6：冷陰極と熱陰極の高周波応答

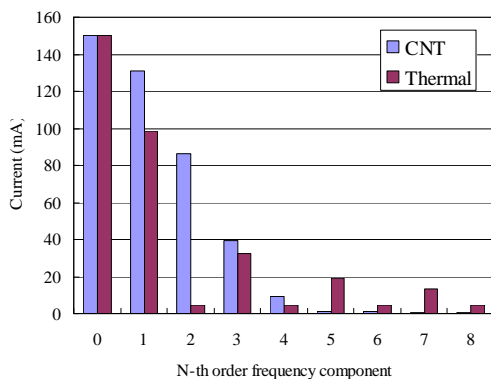


図7：熱高周波応答の周波数成分

さらにIOTのようなグリッド電子管は以下のような利点がある。

- ビームの走行距離が短いため、一度ビームを絞れば十分であり、全体に巨大なソレノイドが必要無い。
- グリッド陰極でスイッチができるため、電源側のスイッチ素子が不要になる。

- 入力空洞と出力空洞だけなので、空洞のシステムが簡略化できる。

しかし冷陰極の三極管にも以下のような問題点がある。

- 電界放出のためには熱陰極よりはるかに高い電界が必要
- 三極管はクライストロンに比べ利得が低いいためマルチステージにする必要がある。
- 冷陰極は適切なエージング処理が必要
- 従来熱陰極では空間電荷制限により均一な電流密度が得られていたが、冷陰極で単純に高電界をかけると均一な電流密度が得られない。

これらの冷陰極の問題点を克服するよう、冷陰極の入力空洞を製作すると共に、冷陰極で均一な電流密度が得られるような陰極開発を行い、冷陰極三極管の基礎開発を行った。

(a) 陰極

19年度に製作したカソード試験装置を用いて、最大の電流密度の得られたカーボンナノチューブ陰極を用いた。

(b) 入力空洞

グリッドとカソードギャップの間をCバンド(5712MHz)で共振する空洞とし、それを同軸線路から励振するように設計を行った。グリッドにはワイヤーグリッドを用いて、陰極との間隔を0.2mmに調整した。共振周波数については、電磁波シミュレーションにより、結合度を決定しているアイリスの位置を決定した。図8、はこの電磁波シミュレーションにより得られた電磁界の様子である。さらに、グリッド-陰極間の微調整をできる機構とする事で共振周波数の調整ができる構造とした(図8)。

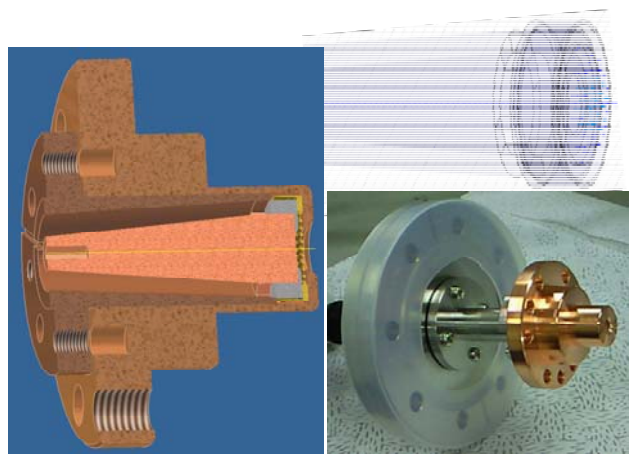


図8：入力空洞

(c) 出力空洞

出力空洞は冷陰極によるバンチ長を評価できるように、入力空洞の倍の周波数であるXバンドで設計を行った。空洞の寸法と導波管とのインピーダンス整合については電磁波シミュレーションにより決定し、製作した空洞でほぼ同等の性能が得られた。図9は出力空

洞の真空側の構造であり、図10が製作した出力空洞である。

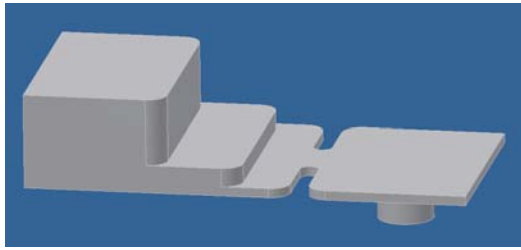


図9：出力空洞のシミュレーションモデル



図10：出力空洞

(d) 誘電体導波路

電子管では通常は陰極側を負の高圧にするが、陰極側の交換を頻繁に行い様々な性能評価を行うにはこれは不都合である。本研究ではパルス電圧で試験を行うため、コレクターの電力損失は十分に小さく、冷却水等での冷却は必要無い。従ってアノード側を正の高圧にし、陰極側をアースとした。これにより出力空洞も正の高圧側となり、ここからビーム加速用の電圧を絶縁しつつ出力電磁波を取り出すのに誘電体導波路を用いるという新しい方法を試みた。Xバンドの誘電体導波路として、十分に全反射条件に入るようにカットオフ周波数より十分に大きい、次の高次モードの混入が少ない直径10mmのアルミナの棒を用いた。図11上は誘電体導波路のシミュレーションモデルであり、図11下は実際の構造である。

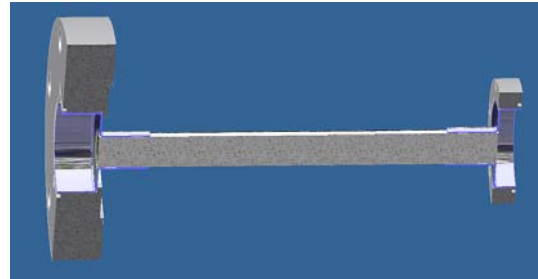
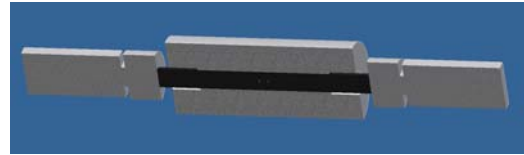


図11：誘電体導波路

(e) ビーム軌道

ビーム軌道も Particle-In-Cell のシミュレーションにより計算し、ビームが出力空洞において集束されるように陰極のビームフォーミング電極の角度などの形状を決定した。

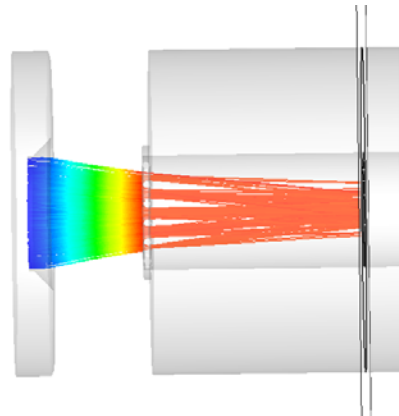


図12：ビーム軌道

(f) 機械設計

図13は冷陰極IOTの3次元CADにより設計した全体図である。Cバンド入力空洞は左側に、Xバンド出力空洞は上部の出力ポートに誘電体導波路を経由して接続され、ビーム加速用の高圧は下部から供給される構造となっている。

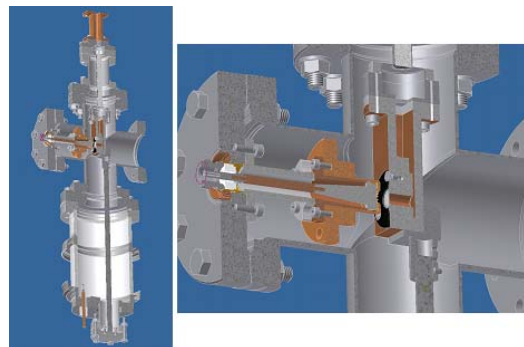


図13：冷陰極三極管の構造設計



図 1 4 : 冷陰極三極管

試験結果

この冷陰極 IOT を製作した 30kV 耐圧の電源に載せ、真空度 10^{-5} Pa において試験を行った。電源は $3\mu\text{F}$ の容量のコンデンサーを用いて、パルス大電流に対応できる構造とした。図 1 4 は試験装置の全景である。図 1 5 はこの冷陰極 IOT により得られた波形であり、C バンドの入力(上)に対して X バンド(下)の出力が得られたのが確認できた。

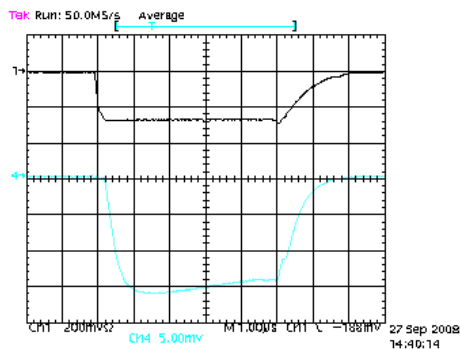


図 1 5 : 入出力波形

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 吉田 光宏、Cold Cathode Electron Tube Toward Plenty Multi Beam Tube、Linear Accelerator Conference 2008、Sep. 29 - Oct. 3, 2008、Victoria, Canada

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 光宏 (YOSHIDA MITSUHIRO)
 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教
 研究者番号：60391710