

Cartridge type photocathode RF gun at Univ. Tokyo.

Akira Sakumi^{1,A)}, Hironori Moritani^{A)}, Toru Ueda^{A)}, Mitsuru Uesaka^{A)}

^{A)} School of Engineering, the University of Tokyo

2-22 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1188, Japan

Abstract

We report on the development of the cartridge type cathode changing system and Cs₂Te cathode, to generate high current electron beam generation. The Cs₂Te cathode is set into the cartridge in order to protect from oxygen and water vapor. We can generate the electron bunch with the current of 7nC from RF gun and can deliver the current of 4nC after accelerator. We found that the space charge limitation on the cathode surface occurs.

カートリッジ式フォトカソードRF電子銃

1. 本研究の背景

フォトカソード高周波(RF)電子銃は、サブピコ秒からフェムト秒の超短パルスかつ低エミッタンスの電子ビーム発生が可能であり、リニアコライダーや次世代放射光源であるX線FELなどの電子源として利用されている。また、短時間現象解明のためのポンプ&プローブ実験用の電子銃としても有用である。これはポンプである電子ビーム発生用のレーザーとプローブのレーザーで同じ光源を用いることにより、高精度の同期が可能となるからである。

東京大学工学系研究科原子力専攻のライナック施設に設置されているS-bandの18MeV Linac (18L)では、サブピコ秒からフェムト秒時間領域の現象、特に放射線誘起反応初期過程の解明を目的としたポンプ&プローブ方式の高時間分解能パルスラジオリシシステムが構築されており、フォトカソードRF電子銃が使用されている[1], [2]。

フォトカソードRF電子銃は、駆動レーザーを共振空洞内のカソード面に入射して光電子を発生させ、それを高周波電場(RF)で加速して電子ビームを発生させる。18Lの電子銃では現在Mgカソードが使われている。その量子効率(QE)は10-4程度である[3]。パルスラジオリシ実験で更なる高時間分解能を実現させるためには、よりQEの高いカソードを使用しポンプである電子ビームの電荷量を増大させる必要がある。しかし、高QEカソードは大気暴露に弱く取り扱いが難しいため、通常のRF電子銃では使用できない。高QEカソードを使用するには特殊なシステムを準備する必要がある。

そこで本研究では、よりQEの高いカソードが使用できるカートリッジ式のフォトカソードRF電子銃の開発を行っている。カートリッジ式の電子銃システムの導入により、MgよりQEが一桁以上高くRF電子銃での実績があるCs₂Te (QE : > 1%) をカソードとして使用することができる。これによりレーザーに負担を掛けることなく電荷量の増大を行うことができる。

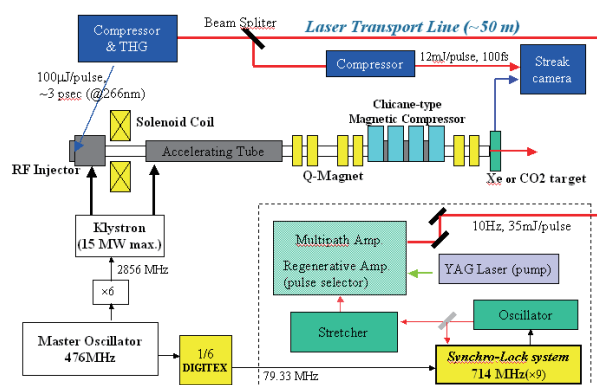


図1. パルスラジオリシ用の18L体系図

2. 18Lにおけるパルスラジオリシ

フォトカソードRF電子銃を用いたパルスラジオリシ用の18Lの体系図を図1に示す。18Lは主に、フォトカソードRF電子銃 (1.6 cell BNL-GUN -IV)、加速管、Qマグネット、シケイン型磁気パルス圧縮器からなる。また、フォトカソード励起用レーザー及びプローブ用レーザーの光源は、0.3TWのTi:Sapphireフェムト秒レーザーを使用しており、途中スプリッターで2つに分けている。RF電子銃には三倍高調波(266nm)に変換して入射している。18Lの主要パラメータを表1に示す。パルスラジオリシ実験では、超短パルス電子ビーム、高精度同期システム、大電荷量ビームの3つが高時間分解能のため要求される。現在、それぞれの課題について研究が行われている[4]。

3. カートリッジ式カソード交換システム

Cs₂Teなどの高QEカソードは、カソード生成時から電子銃へのインストール時まで一貫して超高真空に保つ必要がある。このような要求を満たすシステムとして現在ロードロックシステム(KEK他)がある。しかし、カソード製膜装置を内包するロードロック

¹ E-mail: asakumi@nuclear.jp

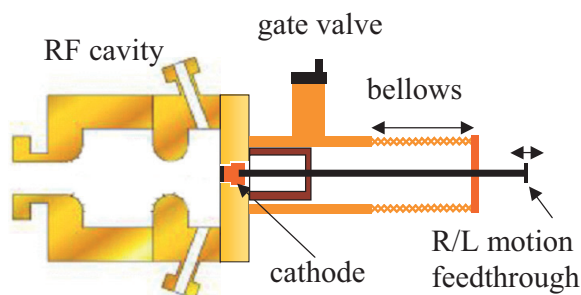


図2. カートリッジ式カソード交換システムの概略図

システムはそのサイズが大きく（数メートル）、費用の点からも導入は難しい。一方、今回18Lに導入するカートリッジ式のシステム(SPring-8、浜松ホトニクス、東大)は、工場で生産されたカートリッジ管内にカソードが真空封じされているため、製膜装置なしで高QEカソードの使用が可能であり、コンパクトである。SPring-8でこのシステムによる単セルRF電子銃でのビーム試験が行われており、Cs₂TeのQE測定が行われた [5], [6]。

今回の導入では、RF電子銃の後ろのスペースが十分ではないため、Spring-8で使用されているものよりさらに小型(50-80cm程度)のシステムが要求される。図2に今回導入するカートリッジ式カソード交換システムの概略図を示す。このシステムは、カソード交換可能なRF電子銃端板、カソード交換装置、及びカートリッジ管から成る。Spring-8との違いはカートリッジ管を保管しておくリボルバーがない点である。カソード交換可能なRF電子銃端板とは、通常の端板にプラグ挿入用の孔を開けたものである。カソード交換装置の直線導入機によってカートリッジ管を端板まで運び、カートリッジ管内のベローズを伸ばしてカソードプラグを端板の孔に挿入する。

カートリッジ式カソード交換システムは、小型で低コストである以外に、現場でのカソード製膜技術の習得が不要、カートリッジ管を交換することにより様々なカソードの試験が可能、といった特長もある。

4. テスト実験

製作したカートリッジ式交換システムを18Lに設置し[7]、実験を行った(図3)。ビーム試験の前にCuプラグでエージング試験を行った。目標である10MW、10ppsは達成されたが、真空度が以前のRFガン(<1×10⁻⁹torr)に比べて悪い(2×10⁻⁹torr)。約160時間行ったところで、エージングを終えた。エージング終了後、カソードをCs₂Teに交換し、ビーム試験を行った。FC-1(電子銃後)、FC-2(加速管後)でそれぞれ6nC、4nCの電荷量を確認した。また、FC-1ではレーザーパワーを変化させたときの電荷量を測定した(表1)。Cs₂Teカソードで、Mgカソード(100μJで3nC)に比べ100分の1以下のレーザーパワーで同等の電荷量を得ることができた。QEは

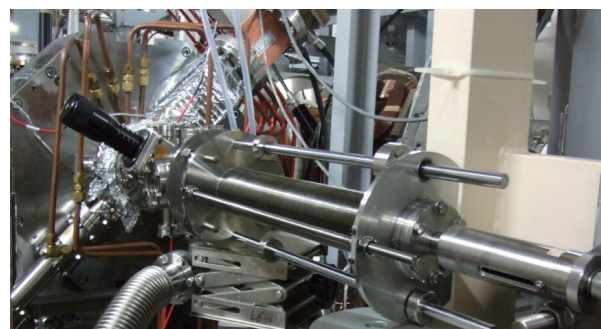


図3. 18Lに設置されたカートリッジ式カソード交換システム

表1. Cs₂Teカソードからのビームパラメータ

レーザーパワー(μJ)	電荷量(nC)	QE(%)
0.6	4.8	3.7
2.6	6.8	1.2
6	7	0.54
12	9	0.35

$$QE(\%) = \frac{1.23 \times 10^2}{W(\mu J) \lambda(nm)} Q(nC)$$

から求めた。

5. 空間電荷効果のシミュレーション

電荷量を増大させたときに生じる問題として、カソードから発生した電子自身が作る空間電荷がある。空間電荷はカソード面との鏡像電荷によって高周波による加速電場とは反対方向の減速電場を作り出す。この空間電荷によるカソードへの影響は、加速電場によるショットキー効果を打ち消す作用、カソード表面の電子が後続の電子の放出を阻害する作用の二つが考えられる[8]。ここでは、空間電荷による減速電場を計算して、二つの作用からカソードのQE減少についてシミュレーションした。

まず、空間電荷による減速電場の計算を行った。方法は、カソード面から電子が放出される様子を荷電粒子運動解析コードGPTでシミュレーションし、その電子分布から、電場の大きさを計算した。電場の計算は面電場を仮定して計算した。

この電場を用いて2つの作用がカソードのQEに与える影響を評価した。まず、加速電場によるショットキー効果を打ち消す作用について考える。これはカソードから放出された電子が作る減速電場によって加速電場が減殺され、ショットキー効果が小さくなり、QEが減少する効果であり、

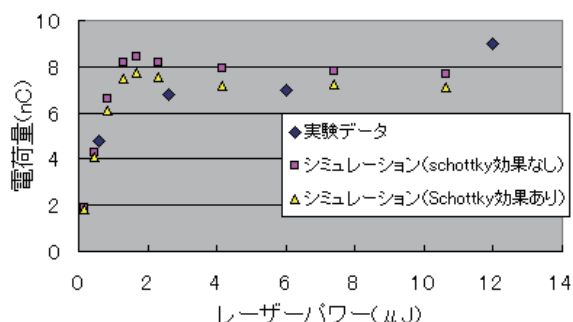


図4. レーザーパワーと電荷量の関係

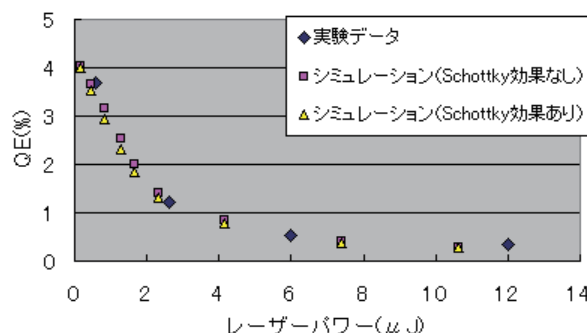


図5. レーザーパワーとQEの関係

$$QE = A \left[hv - \left(\phi - \sqrt{\frac{e(E_{acc} - E_{dec})}{4\pi\epsilon_0}} \right) \right]^2$$

A: 表面状態による定数, ϕ : 仕事関数,
 E_{acc} : 高周波の加速電場, E_{dec} : 空間電荷の減速電場
のように表すことができる。レーザーエネルギーは
4.66eV、Cs₂Teの仕事関数は3.5eV、加速電場は
100MV/mである。計算した空間電荷による減速電場
をこの式に代入すればショットキー効果によるQE
の減少量がわかる。

次に、カソード表面の電子が後続の電子の放出を
阻害する作用について考える。レーザーパワーが大き
く、電荷密度が高い状態では、空間電荷によって
カソード表面に加速電場を打ち消すほどの電場が発
生しており、後続の電子が取り出せなくなる。その
ため、カソードのQEが低下する。しかし、その物
理的なメカニズムはよくわかっていない。これは、
DC場での空間電荷制限電流と違い、フォトカソ
ードでの電子放出はピコ秒程度の短時間の現象だか
らである。今回のシミュレーションでは、取り出され
る電荷量は表面電場 $E_{acc} - E_{dec}$ に比例するとして、

$$QE = QE_0 \cdot \frac{\sum \Delta q_{(k)} (E_{acc} - E_{dec(k-1)}) / E_{acc}}{Q_{tot}}$$

によってQEを評価した。QE₀は減速電場がないと
きのQE、kは時間ステップであり、あるステップで
出てくる電荷量は一つ前のステップの表面電場の影
響を受ける。Q_{tot}は取り出されるはずだった総電
荷量 ($Q_{tot} = \sum \Delta q_{(k)}$) である。

6. 実験結果とシミュレーションの比較

レーザーパワーと電荷量の関係を図4に示す。シ
ミュレーションでは、減速電場が100MV/mを超える
電荷量で(約8nC)で飽和している。一方、実験デー
タでは一度7nCあたりで飽和したかのように見える
が、9nCまで電子を測定することができた。

次にQEとレーザーパワーの関係を図5に示す。

シミュレーションで用いたQE₀は実験データから
外挿した値(5%)である。実験データとシミュレー
ション結果はよく一致している。

また図4ではレーザーパワー2~3 μJ付近で電荷量

の飽和が起こっている。このことは、減速電場が
100MV/m程度になると、カソードからの電子放出の
状態を変える物理的な現象が生じていることを示し
ていると考える。例えば、カソード表面の電場がゼ
ロとなり、放出された電子が加速されず散逸してし
まうことや100MV/m以上になった減速電場がカソ
ード表面にマイナスの電場を作り、カソード表面のポ
テンシャルが上昇して電子が放出されなくなること
などが考えられる。

7. 結論と今後の展開

結論

- ・18Lの1.6セルRF電子銃で使用できるカートリッジ式カソード交換システムを開発・製作し、Cs₂Teカソードでのビーム試験を行った。
- ・Cs₂Teカソードによって、電子銃直後で最大7~9nCの大電荷量を測定した。
- ・空間電荷のシミュレーションと実験データを比較し、カソードからの電子放出の飽和電荷量が7~8nC程度であると予想した。

今後の展開

- ・電子ビームのエミッタンス、パルス幅、エネルギー分散などを測定し、ビームの質を検証する。
- ・カートリッジ式のシステムは、高QEであるCs₂Teを使用できるシステムの中で最もコンパクトであり、その点を活かして普及を目指していく。

参考文献

- [1] M. Uesaka et al., Radi. Phys. Chem, 60 (2001)
- [2] Y. Muroya et al., Nucl. Instr. Meth. A, 489 (2002)
- [3] H. Iijima, et al., Proc. 2002 EPAC 1771-1773
- [4] A. Sakumi, et al., Proc. 2005 PAC 3079-3081
- [5] J. Sasabe et al., Nucl. Instr. Meth. A, 528 (2004)
- [6] H. Dewa et al., Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003
- [7] H. Moritani et al., Beam Physics Meeting in Japan, 2006
- [8] Y. Yamazaki., Doctor thesis.