

東大・ライナックにおける Mg photocathode RF gun

飯島北斗^{1,A)}、上坂充^{B)}、上田徹^{B)}、熊谷教孝^{C)}、土橋克広^{A)}、深澤篤^{B)}、室屋裕佐^{B)}、
渡部貴宏^{B)}、吉井康司^{B)}

^{A)}放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

^{B)}東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設

〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

^{C)}放高輝度光科学研究センター

〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町三原 323-3

概要

東大、S-band ライナックに設置された Mg フォトカソード RF ガンはエージングを終えて現在、ビームの試験中である。一般に Cu cathode よりも量子効率が 10 倍程度 ($\sim 10^{-3}$) よいとされる Mg カソードであるが酸化されやすい材料であるために、通常は Cu よりも悪い 10^{-5} 程度であり、 10^{-3} の量子効率を実現するためにはレーザークリーニングなどが必要とされている。しかしながら我々はカソードの製作段階から細心の注意を払いクリーニング前のカソードで Cu と同程度の 10^{-4} を実現した。また、加速管を用いて 2nC/bunch、22MeV、水平方向エミッタンス 80 mm·mrad、垂直方向 40 mm·mrad のビーム発生に成功した。

1. はじめに

パルスラジオリシスは放射線化学において有用な手法である。これまでに東京大学大学院工学部附属原子力工学研究施設ではパルスラジオリシスによる

さまざまな研究を行ってきた^[1]。特にピコ秒、またはサブピコ秒の時間領域で起こる水の化学変化は興味のある現象である。東大工原施ではこの短時間領域でのパルスラジオリシスを、フォトカソード RF ガンを用いた S-band ライナックで行ってきた。図 1 に示すように、この S-band ライナックは主にフォトカソード RF ガン、加速管およびシケイン型のバンチ圧縮器から構成される。RF ガンの駆動レーザー、およびパルスラジオリシスのプローブレザーは Ti:Sapphire レーザーを用いている。この Ti:Sapphire レーザーは波長 795 nm、エネルギー 30 mJ/pulse、パルス幅 300 ps の光を供給する。ポンプビームとプローブレザーの同期精度の観点からガンの駆動レーザーとプローブレザーはこの光をスプリッターで分けて使用している。駆動用の光はガンの手前で 3 倍波発生器を用いて波長 265 nm、エネルギー数百 μ J/pulse、パルス幅数 ps の光に変換してガンに入射させる。

以前我々はガンのカソードに Cu を用いていた。この際、ガンからの最大発生電荷量 7nC/bunch、エミッタンス 6 mm·mrad、バンチ幅 240 fs (FWHM) の電

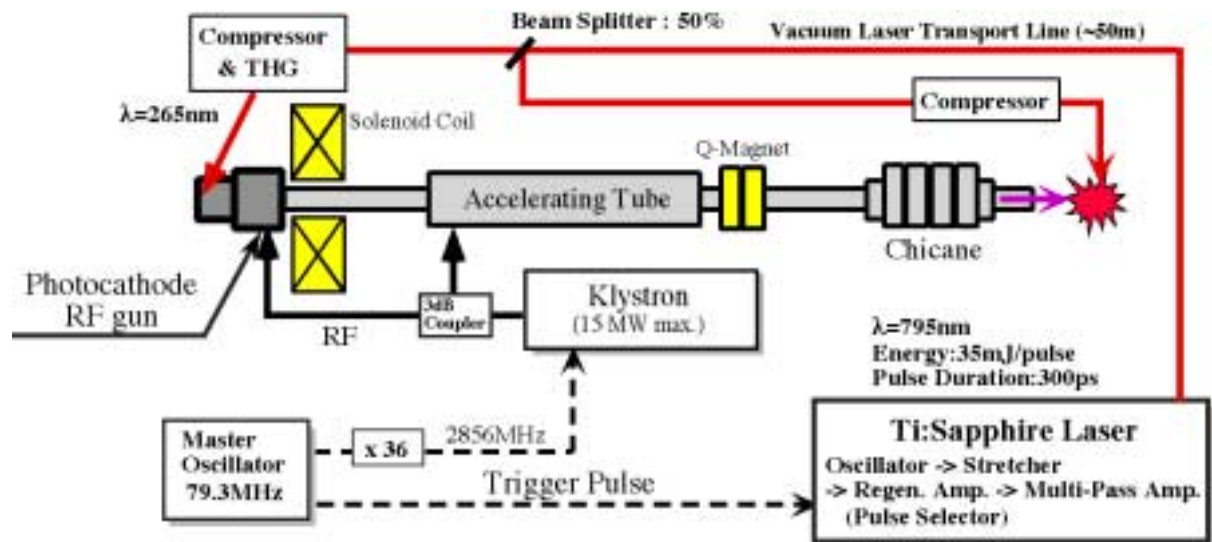


図 1 : フォトカソード RF ガンを用いたパルスラジオリシスのための S-band ライナック

¹ E-mail: hokuto@tokai.t.u-tokyo.ac.jp

子ビーム発生に成功している^[2]。また、ポンプビームとプローブレーザーの同期精度は、数分間の間で 320 fs (rms)、数時間では 1.9 ps (rms)であった。一方、パルスラジオリシスの実験からいくつかの改善点もあがった。特に安定性に関しては重要な項目であった。例えば数 nC/bunch の大電荷電子ビームをサブピコ秒のパンチ幅で長時間供給するのは、駆動レーザーが不安定であるために困難であった。安定して供給できるのは 1nC 以下、1 ps 程度のビームであるが、これはパルスラジオリシスにおけるポンプ-プローブ実験の SN 比を十分に満足できていない。また、長時間の同期精度の安定も望まれた。こうしたことから我々は Mg をフォトカソードに用いた新しい RF ガンの開発を始めた。Mg の量子効率 は Cu の 10 倍といわれ、 10^3 程度が期待される。これにより大電化発生安定化を目指す。同期精度の安定化に関してはライナック建屋の空調工事を行い、温度の揺らぎを常時 ± 1 に抑えた。

2 . Mg カソード RF ガン

2.1 RF ガンキャビティー

Mg フォトカソード RF ガンは SPring-8、KEK、早稲田大学、住友重機の協力をえて作成された。暗電流の低減、空洞エージングの軽減を目指してカソード端面にダイヤモンド研磨を、空洞内壁はダイヤモンドバイトによる精密加工を施している。ダイヤモンド研磨では粒径 $3\mu\text{m}$ と $1\mu\text{m}$ のダイヤモンド粒子を用いた^[3,4]。それぞれの表面粗度は空洞が数十 nm、カソード端面が $1\mu\text{m}$ 以下になっていると思われる。また、到達真空度をよくするためにガンのベーキングを単体で 150、7 日間、ライナックに取り付けてから 120 度、48 時間行った。結果、ガンの真空度は

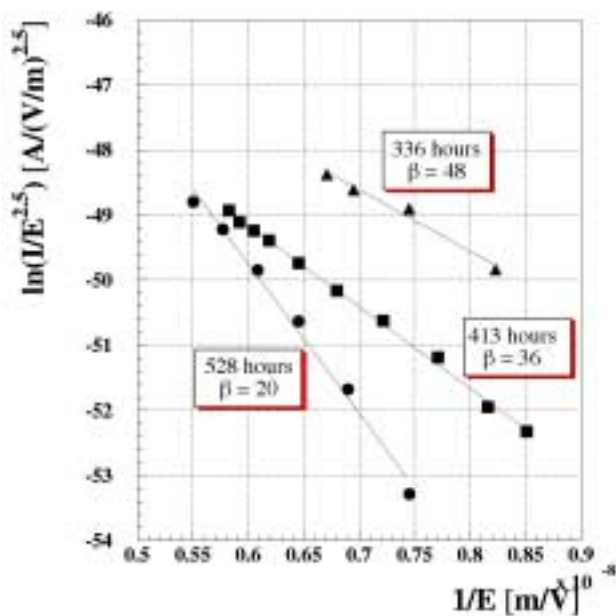


図 2 : Fowler-Nordheim プロット

運転中で 5×10^{-10} Torr 以下を保つ。ガンのエージングは総計で 528 時間 (22 日間) 行った。図 2 はそれぞれのエージング時間に対する Fowler-Nordheim プロットである。フィッティングからもとめられるエンハンスメントファクター はそれぞれ、336 時間後で 48、413 時間後で 36、528 時間後で 20 であった。以前使用していた Cu カソードのガンでは 80~100 であったので十分に精密加工の成果が出ているといえる。暗電流は、RF パワー 6.6 MW、パルス幅 $2\mu\text{s}$ 、繰返し 10pps に対して 600 pC/pulse であった。これも Cu と比較すると低減している。

2.2 量子効率

発生電荷量はソレノイドコイル下流に設置されたファラデーカップを用いて測定した (図 1 参照)。測定は RF パワー 6.6 MW、パルス幅、 $2\mu\text{s}$ 、繰返し 10 pps のもとでおこなった。また、レーザーのスポットサイズは直径で 5 mm 程度である。ソレノイドコイルによる磁場の強さとレーザーの入射位相は電荷が最大になるように調整している。図 2 はレーザー

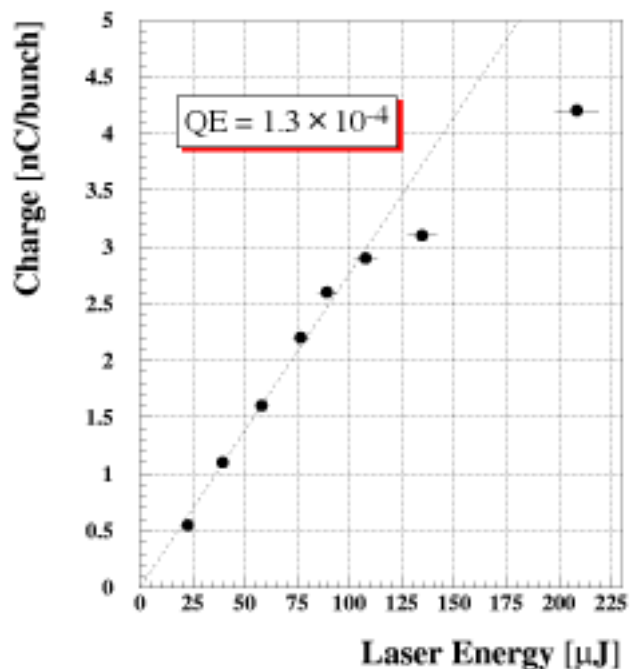


図 3 : レーザーエネルギーに対する発生電荷量

のエネルギーに対する発生電荷量とそこから求めた量子効率を表している。量子効率はレーザーエネルギー $100\mu\text{J}/\text{pulse}$ までの 5 点を直線でフィッティングしてもとめている。結果は 1.3×10^{-4} であった。これは Cu カソードと同程度 (1.6×10^{-4}) の値であった。一般に Mg は表面が酸化しやすいのでレーザークリーニングのような表面の酸化膜を取り除く作業をおこなわないと、その量子効率は低い^[3]。しかしながら我々のカソードが Cu と同程度の量子効率を持っているのはダイヤモンド研磨後の取り扱いによるものと思われる。カソードはダイヤモンド研磨の直後、

窒素中に保管されライナックに取り付けるまでの間、大気中にさらしたのはわずか 48 時間であった。

また、図3に見られるように 3nC/bunch 以上で量子効率のサチュレーションのような現象が見られるが、これはガンから発生した電荷が大きくなるほどファラデーカップに届いていないためにおきていることが分かっている。

3 . ビーム試験

加速されたビームのエネルギーはマグネティックアナライザーで測定した。結果は 22MeV であった。

ビームのエミッタンスは Q-scan 法で測定した。結果は水平方向の規格化エミッタンスが 80 mm・mrad (rms)、垂直方向が 40 mm・mrad であった。このときの電荷量は 2nC/bunch、バンチ幅 10 ps (FWHM) であった。今回測定されたエミッタンスは他の研究グループが測定したエミッタンスよりもかなり大きい。また、我々が以前測定した Cu カソードのものと比べてもはるかに大きい。現時点ではこの理由を特定できていない。現在この原因を調べているが、幸いビームは最下流で直径 3mm 以下には絞ることができるのでこの点からはパルスラジオリシスの要求を満たしている。しかし、大電荷発生を目指す我々としては今後解決すべき問題である。

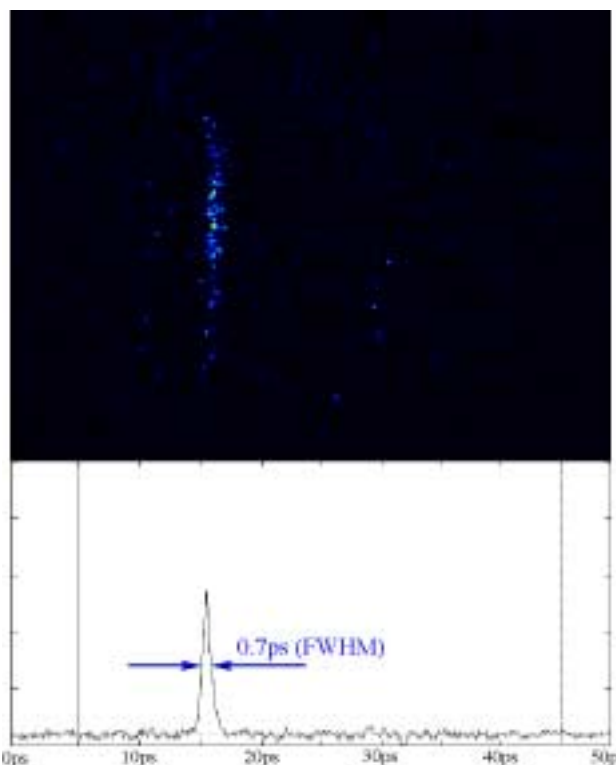
シケイン型マグネットによるバンチ圧縮の結果を図4にしめす。圧縮された電子バンチは Xe チェンバー内でチェレンコフ光を発生しこれを光学系でストリークカメラに導き測定した。図4は典型的なストリークの画像である。このときの圧縮されたバンチ幅は 0.7 ps (FWHM) であった。他数回の測定でもほぼ同じ値である。

図4：ストリークカメラからの画像

4 . まとめと今後

東大工原施としてはじめて Mg フォトカソード RF ガンによる電子ビームの発生試験およびビーム圧縮を行った。量子効率は 1.3×10^{-4} であった。現在、電荷量 2nC/bunch、エネルギー 22MeV、水平方向エミッタンス 80 mm・mrad、垂直方向 40 mm・mrad 圧縮されたバンチ幅 0.7 ps (FWHM) の電子ビーム発生に成功している。

量子効率 1.3×10^{-4} は Cu と同程度ではあるものの本来の Mg の量子効率にはあと一桁足りない。そこ



で我々は今後カソードに対してレーザークリーニングを行うことを検討している。

同期精度に関してはまだ十分なデータを取得していないが、ライナック建屋の空調改善による室内温度の安定性は 3 倍高調波発生安定化に現われている。今後、十分な同期精度のデータを取得したあと、パルスラジオリシスの実験を開始する。

謝辞

SPring8(JASRI)、KEK、早大、BNL および共同開発参画企業の方々には多大な研究協力をいただきました。ここで深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Muroya, T. Watanabe, G. Wu, X. Li, T. Kobayashi, J. Sugahara, T. Ueda, M. Uesaka, Y. Katsumura, Radiation Physics and Chemistry, 60(2001) pp.307-312
- [2] T. Kobayashi, M. Uesaka, Y. Katsumura, Y. Muroya, T. Watanabe, T. Ueda, K. Yoshii, K. Nakajima, X. Zhu, M. Kando, Journal Nucl. Sci. Tech, 39(2002)6
- [3] T.Srinivasan-Rao et al., Rev. Sci. Instrum., 69(1998)2292
- [4] R. Kuroda, M. Washio, S. Kashiwagi, T. Oshima, J. Urakawa, H. Hayano, X. J. Wang, Proc. of 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.171-173, 2001