

Upgrade of Cartridge Type Exchangeable Na₂KSb Cathode RF Gun

Yoshihisa Nakazono^{#,A)}, Kunihiro Miyoshi^{A)}, Akira Sakumi^{A)}, and Mitsuru Uesaka^{A)}

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

2-22 Shirakatashirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1188 Japan

Abstract

Photocathode RF gun with cartridge-type cathode exchanging system produces high-brightness low-emittance sub- or femto second electron bunches. A cathode without breaking the vacuum of RF gun was replaced and a high quantum efficiency (QE) photocathode such as Ce₂Te or Na₂KSb was used. Using the photocathode LINAC system, the application for observation of physico-chemical reactions by pulse radiolysis system in a time-range of picoseconds and sub-pico seconds was investigated. The important factors for the fast radiation chemistry are the pulse length of the beam, the synchronization between beam and laser and the electro beam current. Na₂KSb photocathode is the workable cathode and has been widely used for photomultipliers which can be driven by visible light. The workfunction of Na₂KSb is 2.0 eV, whose sum of the energy gap is 1.0 eV and the electron affinity is 1.0 eV. A Na₂KSb photocathode was installed into RF cavity and the RF was aged. After aging for 12 h, UV light (266 nm; third harmonic of Ti:Sa laser 800 nm) and 400nm visible light (second harmonic) were brought in the Na₂KSb cathode. The maximal charge was 3.1 nC at 266 nm and 1.6 nC at 400 nm. The saturation of the beam current caused by space charge limit was observed. The saturation charge at 400 nm was half of that at 266 nm. The life time of the cathode was measured. The half life time of the cathode was 100 h. The damping of the quantum efficiency occurred rapidly and it reached 1/5 after 280 h. The QE remained about 0.1% after 500 h.

カートリッジ型高周波電子銃アンチモン系光陰極の性能向上

1. はじめに

光陰極高周波電子銃は、高エネルギー・低エミッタンス・短パルスの電子ビームを生成することが可能な電子源として、国内外で研究開発が行われている。高エネルギー加速器の入射器としてや、医療・産業分野への応用など、電子ビームの利用研究は大きな役割を果たしている。東京大学ライナック研究施設では線形加速器からの電子ビームを利用した応用研究として、放射線化学における極短量子現象の解明のためのポンプ&プローブによるパルスラジオリシス実験が行われている[1,2]。加速器からの電子ビームを高品質なものにするには、電子を発生する大元である電子源の高性能化および発生した電子を加速する高周波電子銃の最適化が不可欠である。本研究では、高輝度・超寿命の電子源としてのアンチモン系光陰極の開発、及び、光陰極電子銃における研究を主題として行う。

2. S バンド 18MeV 電子線形加速器

18L のビームラインは、光陰極 RF 電子銃(1.6 セル、BNL-typeIV)、ソレノイド磁石、進行波型加速管、四極電磁石、シケイン型磁気パルス圧縮器からなる。0.3 TW の Ti:Sapphire レーザー(800 nm)を光陰極励起用及びプローブ用光源として用いている。S バンドとは電子銃及び加速管に電磁場を励起するために投入するマイクロ波の周波数帯であり 2856 MHz を

表す。光陰極 RF 電子銃を用いた線形加速器とパルスラジオリシス実験の体系を図 1 に示す。パルスラジオリシス実験等の応用研究の際には、大電荷でかつエミッタンスの小さい安定な電子ビームを供給することが要求される。本研究で取り組むアンチモン系光陰極は、量子効率(入射光子に対する放出電子の割合を示す量)が高いことから、大きな電流量を発生することができる。また、バンドギャップが小さいために、可視光領域のレーザーで駆動できるという大きな特徴を持ち、レーザーの負担を低減することもでき高性能の電子源開発は安定なビーム供給に大きく関わりを持っている。

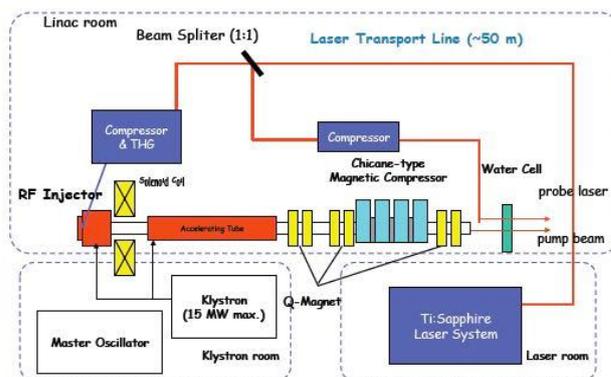


図 1 : S バンド電子線形加速器の装置体系

3. 光陰極高周波電子銃

光陰極高周波電子銃は陰極物質にレーザーを照射し光電効果による発生電子を高周波電場によって加速する装置である。Cs-Te などの半導体光陰極は陰極製膜から電子銃への導入の間まで一貫して超高真空に保つ必要があり、東京大学ライナック研究施設では図 2 に示すように電子銃の真空を破ることなく光陰極を交換できるカートリッジ式システムを(財)JASRI/SPring-8、浜松ホトニクス(株)と共同で開発導入を行っている[3]。SPring-8 ではカートリッジシステムを搭載した単セル高周波電子銃によって、Cs-Te 光陰極の評価が行われた[4,5]。Cs-Te の量子効率率は 3-4 %であり数 nC の電荷供給可能であるが、紫外領域のレーザーが必要でありレーザーに負担がかかるという問題がある。可視光領域のレーザーで駆動可能なアンチモン系光陰極の試運転を研究開発している。カートリッジ式交換システムについては電子銃後方の空間的問題から、SPring-8 で使用されているものよりも 50cm から 80cm 程度小型のシステムが要求され陰極プラグ、カソード輸送用直線/回転導入器からなるシステムは陰極を超高真空に保ったまま輸送できる。陰極導入の際にはフィードスルーのベキングを行った後ゲートバルブを開けカートリッジ管に封入された陰極プラグを直線導入器で端板後方まで移動させ真空封じのためのコバール膜を破り回転導入器によって陰極プラグを端板の規定位置まで移動することで陰極を交換する仕様で陰極真空度の確認する為に端板後方に真空計を設置している。

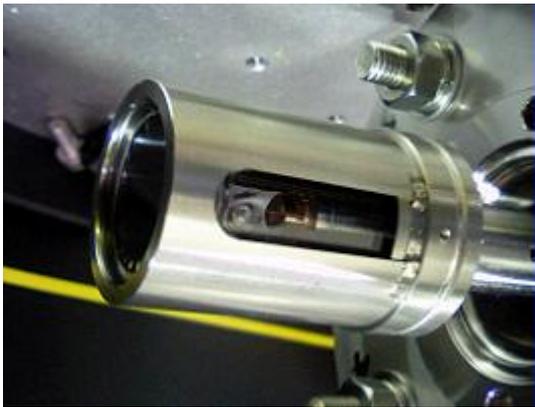


図 2 : カートリッジ式光陰極高周波電子銃フォトカソード

3. Na₂KSb 光陰極の特性試験

3.1 Na₂KSb 光陰極

Na₂KSb は半導体光陰極の一種であり光電子増倍管などの光電面に用いられ図 3 のような結晶構造である。ギャップエネルギーが 1.0 eV、価電子帯と真空順位の差(電子親和力)が 1.0 eV で実効的な仕事関数は

2.0 eV と金属系光陰極や Cs-Te 光陰極と比べて非常に低いのが特徴である。オフラインの試験において 500 nm 帯の入射光に対して 10%以上の高い量子効率を有することが報告されている[6]。ただし、Cs-Te に比べて、Na₂KSb カソードプラグごとの量子効率にばらつきがあることも 1 つの特徴であり高周波雰囲気において同様な特性が得られるか検証する必要がある。

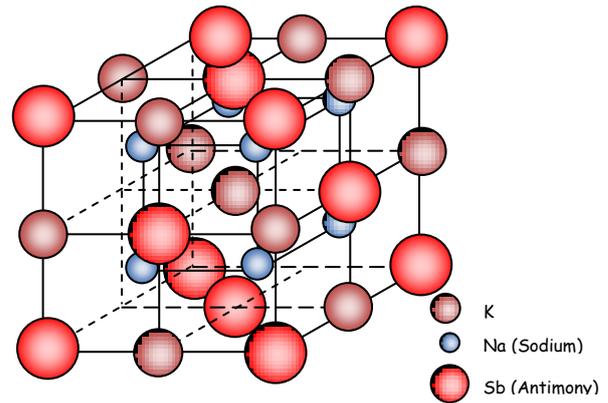


図 3 : マルチアルカリ光陰極: Na₂KSb の結晶構造

3.2 寿命測定

ライナック研究施設において光電効果による電子発生用の励起レーザーとして 0.3 TW の Ti:Sa レーザー(800 nm:1.4 eV)を用い従来の光陰極から電子を取り出すにはの 3 倍高調波(266 nm : 4.6 eV)に波長を変換し変換効率は約 2%である。レーザー安定化と小型化という観点から可視光領域である 2 倍高調波(400 nm:3.1 eV)で動作可能な光陰極の実用化が期待されているが、その候補の一つが Na₂KSb である。Na₂KSb 電子を真空に引き出すために必要なエネルギーは 2.0eV であり Ti:Sa レーザーの 2 倍高調波でも駆動可能である。そこで 266nm における Na₂KSb 光陰極の寿命測定を行い図 4 のように光陰極交換直後の量子効率は約 1.2%、0.1%の量子効率で約 2 ヶ月の動作を確認する結果を得た。

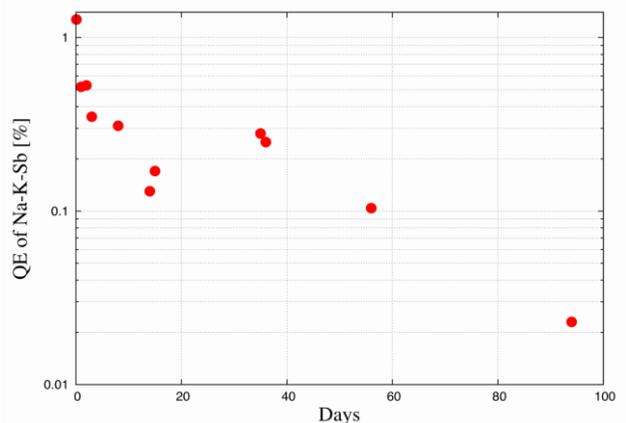


図 4 : Na₂KSb の量子効率(%)の時間変化 (266 nm)

3.2 可視光による光陰極試験

光陰極交換から約 90 日後に 266 nm にて量子効率を測定し 266 nm における飽和電荷量を測定しレーザーの光学系を可視光である 2 倍高調波発生用に調整し同様の実験を可視光領域である 400 nm のレーザーで行った。

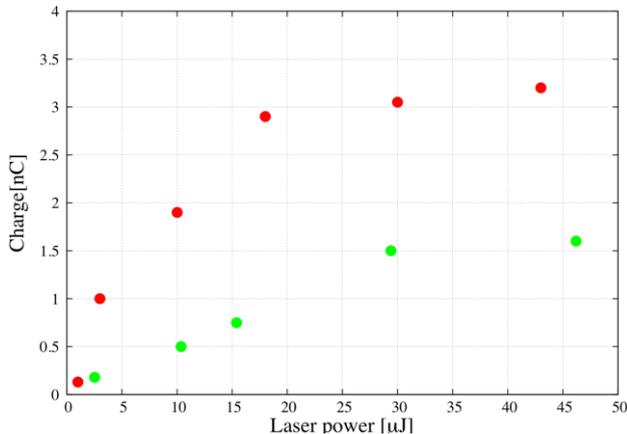


図 5 : レーザーパワーと電荷量の関係。
赤が紫外光、緑が可視光による試験結果。

図 5 に示すように紫外光である 266 nm では 3.1 nC を可視光域 400 nm レーザーで電子銃出口から 1.6 nC の電荷出力を確認し Na₂KSb 光陰極は可視光でも駆動可能であることが確認できた。2 倍高調波での運転時にはレーザーのショットごとのパワーの変化が 3 倍高調波のそれに比べ安定していることも確認され電子ビームのパルスあたりの電荷量も安定したと考えられる。

3.3 放電による陰極表面の劣化

アンチモン系光陰極は表面に高電場が印加されるような用途で利用されることは前例がほとんどなく、その特性は放電や真空度、空洞内の残留ガスの影響を受けやすい可能性がある。図 6 に示すように寿命測定後に光陰極のカートリッジプラグを電子銃から取り外し表面を光学顕微鏡にて観察したところ光電面全体にわたり多数の放電痕が観察された。加速器運転の際には陰極表面には約 100 MV/m の高電場が印加されるため、放電による表面状態の劣化が量子効率の低下を引き起こしていると考えている。光陰極の劣化の主要因として放電による陰極表面の損傷、真空中の残留ガスの陰極への表面吸着等が考えられる。真空度の向上を図るため、40 L/s のイオンポンプを設置し、コンダクタンスが悪く真空への負荷が大きかったカソード交換機構の部分を独立で排気しゲッターポンプの再活性化を行った結果、端板裏において常時 2×10^{-7} Pa 以下の真空度を確認した。上述のような真空作業の後カソードプラグに交換しビーム試験を行った。

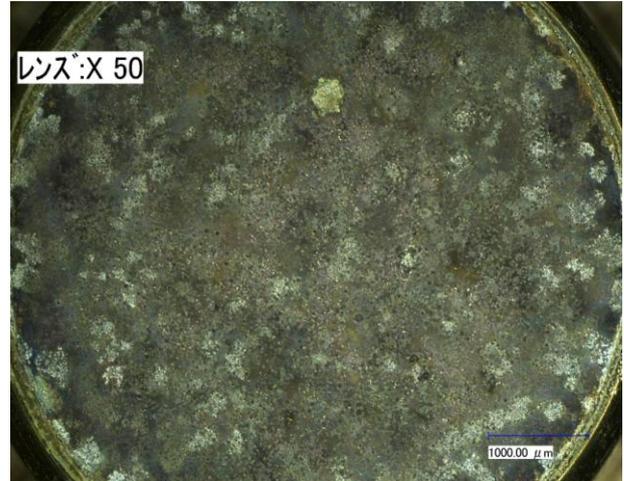


図 6 : RF 電場印加後の光陰極表面の顕微鏡写真
右端が電子銃出口に対応する

引出電荷の飽和現象には空間電荷による飽和量以外に固体表面のポテンシャル変化を引き起こす現象がありカソード材料の固体内で励起された電子は表面で蓄積される電荷によるポテンシャル変化が大きく真空準位の上昇が大きい可能性がある。陰極表面の状態変化によって仕事関数が異なっている場合特に表面に関する現象は敏感かつ要素が多く複雑であるため想定した現象の実証を行う必要が考えられる。

4. 考察と結論

カードリッジ式高周波電子銃において Na₂KSb 光陰極の試験を行った。3 ヶ月にわたる長時間測定の結果、量子効率は最大で 1.2%、0.1% の量子効率で 2 ヶ月動作することを確認した。可視光レーザーによる試運転を行い nC オーダーの電子生成に成功し可視光レーザーで Na₂KSb は駆動可能であることが明らかになった。放電や残留ガスによる陰極表面の状態変化をもたらす引き出し電荷量の現象や量子効率の劣化については不確定な要素が多く、高周波電子銃の改良には表面観察やその場観察等システム改善も今後の選択肢の一つとなる可能性が示唆される。

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] 守谷宏範、修士論文、東京大学 (2007)
- [4] J.Sasabe et al., Proc. 2005 Nucl. Instr. Meth. A, 528(2004)
- [5] H.Dewa et al., Proc of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003
- [6] 浜松ホトニクス(株)、光陰極性能評価書
- [7] K.Miyoshi et al., Particle Accelerator Conference 2009 K.Kambe et al., "Electromagnetic Heat Design of S-Band Linac", 第 6 回加速器学会年会 proceedings (to be published).