

引用格式: 郭磊, 陈江, 王多书, 等. 国产小型磁选态铯钟电子倍增器性能测试与分析[J]. 时间频率学报, 2022, 45(2): 143-150.

国产小型磁选态铯钟电子倍增器 性能测试与分析

郭磊^{1,2}, 陈江^{1,2}, 王多书^{1,2}, 王骥^{1,2}, 黄良玉^{1,2}, 马寅光^{1,2},
崔敬忠^{1,2}, 刘志栋^{1,2}, 杨纬¹, 侍椿科¹, 李富乾¹, 杨军^{1,2}, 郑宁¹

(1. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000;

2. 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

摘要:采用电子入射测试系统测试了目前国产小型磁选态铯钟电子倍增器的性能, 相比国内敏化法与早期磁控溅射法, 目前磁控溅射法研制电子倍增器增益提高了 4 倍, 二次电子发射系数由 4.6 提高至 5.4, 暗电流指标降至 0.5 pA 以下, 衰减速率由 2 V/d 降至 0.1~0.7 V/d, 使用寿命由 2 年提高至 5 年以上, 部分可达 20 年。相比美国研制电子倍增器性能, 增益与二次电子发射系数已接近, 暗电流已达到, 衰减速率还存在差距, 具体表现不同器件衰减速率离散性更大。在后续的研究工作中, 还需要继续降低电子倍增器的衰减速率, 提高不同器件一致性。

关键词: 国产磁选态铯钟; 电子倍增器; 磁控溅射技术

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2022-02-0143-08

Performance characterization and analysis of electron multiplier for home-made compact magnetically selected cesium atomic clock

GUO Lei^{1,2}, CHEN Jiang^{1,2}, WANG Duo-shu^{1,2}, WANG Ji^{1,2}, HUANG Liang-yu¹,
MA Yin-guang^{1,2}, CUI Jing-zhong^{1,2}, LIU Zhi-dong^{1,2}, YANG Wei¹, SHI Chun-ke¹,
LI Fu-qian¹, YANG Jun^{1,2}, ZHENG Ning¹

(1. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The electron incidence testing system was used to characterize the performance of electron multiplier used by home-made compact magnetically selected cesium atomic clock. Compared with domestic Ag-Mg Alloy activated method and magnetron sputtering method in the early process, at present the gain of the electron multiplier made by magnetron sputtering method has increased by 4 times, secondary electron emission coefficient have increased from 4.6 to 5.4, dark current has fallen to 0.5 pA, and decay rate has fallen from 2 V/day to 0.1~0.7 V/day, service lifetime can be more than 5 years, some up to 20 years. Compared with the technical performance of electron multiplier made in USA, gain and secondary electron emission coefficient and dark current are comparable, and there is still a big gap in the decay rate, as indicated by the divergence in the various parts. It is necessary to reduce decay rate and control the process

fluctuation in the following research.

Key words: home-made magnetically selected cesium atomic clock; electron multiplier; magnetron sputtering method

0 引言

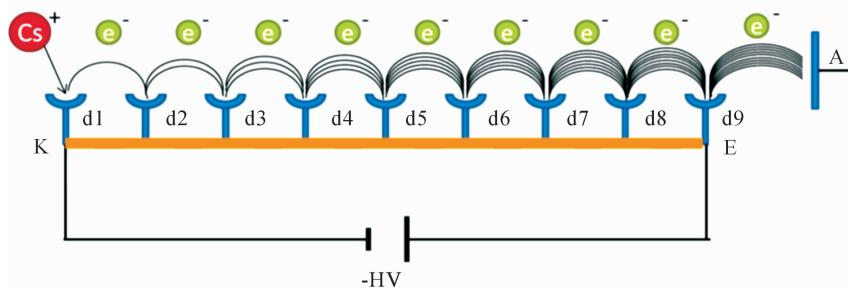
小型磁选态铯钟具有准确度高、长期稳定性好、环境适应性强的特点,可作为一级频率标准使用^[1-2]。在小型磁选态铯钟中,电子倍增器是将微弱铯离子信号放大用于检测的部件,也是影响铯钟使用寿命与信噪比的关键部件。长寿命低噪声电子倍增器研制难度很大,主要原因在于长寿命技术很难突破^[3-4],目前只有美国^[5-6]研制电子倍增器使用寿命可达 12 年以上,部分可达 30 年以上,而国内^[7-8]研制电子倍增器长期技术水平较低,使用寿命不到 1 年,成为影响铯钟国产化的瓶颈技术。

小型磁选态铯钟电子倍增器突破长寿命的关键点与难点在于高质量 MgO 二次电子发射薄膜的制备。因 MgO 薄膜的制备方法不同,铯钟电子倍增器研制方法可分为 Ag-Mg 合金敏化法和磁控溅射镀膜法^[9-10]。Ag-Mg 合金敏化法起源于 20 世纪 60 年代,是一种加热氧化 Ag-Mg 合金形成 MgO 薄膜的传统方法。磁控溅射技术是一种真空环境下通过靶材溅射在目标基底上形成 MgO 薄膜的方法,该方法相对较新,于 21 世纪初应用于电子倍增器 MgO 薄膜镀制。相较传统 Ag-Mg 合金敏化法,磁控溅射镀膜法具有膜层结构可精确设计、膜层厚度可精确控制、膜层质量相对较好等特点,在长寿命电子倍增器研制上展现出了较大优势。近年来兰州空间技术物理研究所采用磁控溅射技术研制长寿命电子倍增器取得了较大进展,并已在地面铯钟实现批量化应用,是目前国内唯一一家实现电子倍增器实用化的单位^[9]。本文测试了目前磁控溅射技术研制的电子倍增器,与磁控溅射早期技术、国内敏化法技术以及美国研制电子倍增器指标进行了对比分析,指出了目前存在的问题,提出了后续技术提升方向。

1 电子倍增器性能测试方法

1.1 工作原理与性能指标

电子倍增器放大铯离子信号原理是基于二次电子发射雪崩效应^[11]。铯钟电子倍增器采用 9 打拿极结构,放大铯离子信号的过程(图 1)如下:在负载高压的作用下,铯离子轰击第一打拿极 MgO 薄膜发射二次电子,产生的二次电子在电场作用下入射至第二打拿极,激发第二打拿极产生二次电子,以此类推,经 9 级打拿极倍增后的二次电子最终被收集并产生电流信号用于铯钟信号检测。



注:d1-d9 为第一至第九打拿极,第一打拿极 d1 又称为阴极 K,第九打拿极即末打拿极 E,A 为阳极即收集极

图 1 电子倍增器工作原理

电子倍增器影响铯钟使用寿命的原因在于:在铯钟运行过程中,电子倍增器 MgO 薄膜除了不断发射电子外,还承受入射铯离子与发射电子的不断轰击,轰击作用造成 MgO 薄膜结构逐渐损伤,二次电子发射系数逐渐减小。 MgO 薄膜二次电子发射系数减小会造成电子倍增器输出信号逐渐减小,为了稳定电子倍增器输出信号,需要不断提高电子倍增器负载电压,负载电压极限值到达则电子倍增器失效,最终导致铯钟寿命终结。

在小型磁选态铯钟中,电子倍增器初始工作电压到极限工作电压的工作电压阈值一般为($-1\sim100$ V~ $2\sim600$ V),初始工作电压高低与达到工作电压极限值的快慢决定了电子倍增器使用寿命。而电子倍增器增益大小决定了初始工作电压高低,电子倍增器衰减速率快慢决定了达到工作电压极限值的快慢,因此电子倍增器增益与衰减速率技术指标是直接影响铯钟使用寿命的关键指标。另外电子倍增器的本底噪声对铯钟信噪比指标也有重要影响。在铯钟电子倍增器研制过程中,需要着重关注电子倍增器增益、衰减速率与暗电流技术指标。

1.2 测试方法

电子倍增器性能指标测试在专用的测试系统中进行。该测试系统与美国 Hewlett-Packard 公司的电子倍增器测试系统原理一致^[11],其结构如图 2 所示。测试系统真空度可达 5×10^{-6} Pa,与铯束管中电子倍增器工作环境一致。测试系统采用光电法产生 pA 量级电子流,作为输入信号,用于电子倍增器性能指标测试。测试系统采用斯坦福 PS350 高压电源用于电子倍增器工作电压输入,采用吉时利 6517B 静电计收集电子倍增器输出电流信号。

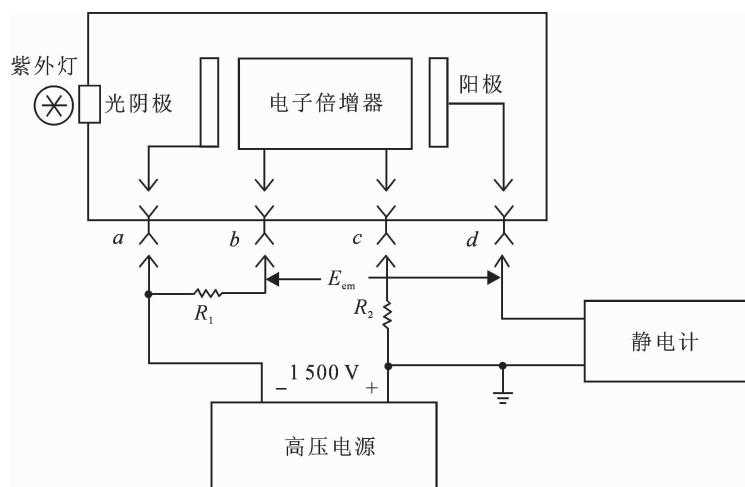


图 2 电子倍增器测试系统结构

增益测试:测试电子倍增器输入电流信号以及输出电流信号,输出电流信号与输入电流信号的比值为电子倍增器的增益值。增益: $G=I_{\text{out}}/I_{\text{in}}$, I_{in} 为输入电流信号, I_{out} 为输出电流信号。而增益值与二次电子发射系数之间存在如下关系: $G(V)=\delta(V)^n$,其中 $\delta(V)$ 为电子入射下 MgO 薄膜在工作电压 V 下的二次电子发射系数, n 为电子倍增器打拿极数量。通过该公式可得出 MgO 薄膜的二次电子发射系数值。

衰减测试:采用加速的方式,固定工作电压,监测电子倍增器增益电流变化,测试电子倍增器的衰减特性。

暗电流测试:关闭输入电流,测试电子倍增器在不同工作电压下的本底噪声电流信号。

2 电子倍增器性能测试与分析

2.1 增益测试与分析

测试了目前磁控溅射法研制电子倍增器在不同工作电压下的增益值,并与早期磁控溅射法以及国内敏化法研制电子倍增器的增益值进行了比较分析,测试数据如图 3 所示。从图中可以看出三种技术研制电子倍增器增益值随工作电压增大均呈现指数式增大。相较其他两种技术,目前磁控溅射法研制电子倍增器的增益值明显较高。以工作电压 $-2\sim500$ V 下电子倍增器增益值为例,三种技术研制电子倍增器增益值分别为: 4×10^6 (磁控现在技术)、 1×10^6 (磁控早期技术)、 1.8×10^5 (国内敏化技术)(表 1)。目前磁控溅射法研制电子倍增器的增益值分别是早期磁控溅射法与国内敏化法研制电子倍增器增益值的 4 倍和 20 倍。

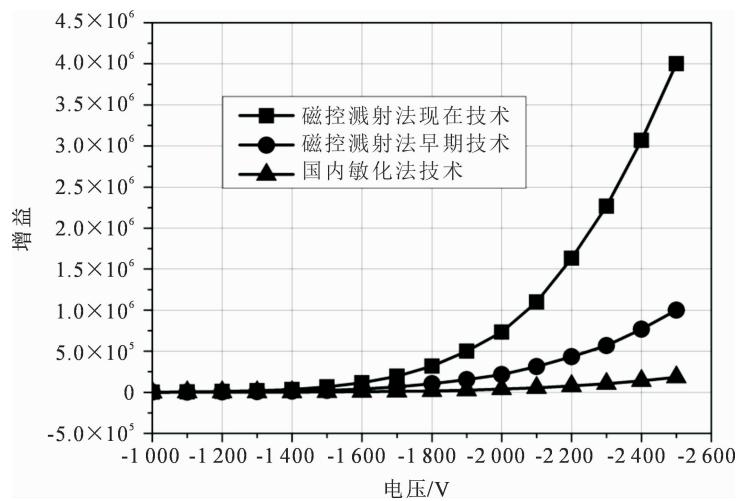


图 3 电子倍增器增益测试数据

表 1 工作电压 -2 500 V 下三种技术电子倍增器增益值

电子倍增器	增益
磁控溅射法现在技术	4×10^6
磁控溅射法早期技术	1×10^6
国内敏化法技术	1.8×10^5

根据电子倍增器增益值与 MgO 薄膜二次电子发射系数之间关系： $G(V) = \delta(V)^n$ ，可得出三种技术研制电子倍增器 MgO 薄膜的二次电子发射系数值，并与美国 Hewlett-Packard 公司^[11]研制的电子倍增器 MgO 薄膜的二次电子发射系数值进行了对比分析。图 4 为三种技术以及美国 Hewlett-Packard 公司研制电子倍增器 MgO 薄膜的二次电子发射系数随极间电压的变化曲线。从图中可以看出，四种电子倍增器 MgO 薄膜二次电子发射系数随极间电压增大均基本呈线性增大。极间电压 -250 V 下，三种技术研制电子倍增器 MgO 薄膜二次电子发射系数分别为：5.4(磁控现在技术)、4.6(磁控早期技术)、3.8(国内敏化技术)和 5.9(美国电子倍增器)(表 2)。比较四种电子倍增器 MgO 薄膜二次电子发射系数可以看出，目前磁控溅射法技术指标明显高于国内敏化法，比早期磁控溅射法有了较大提升，接近美国电子倍增器技术指标。

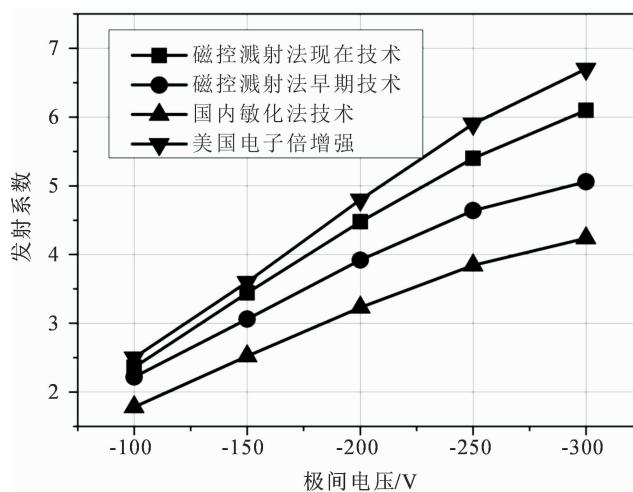


图 4 不同极间电压下不同技术电子倍增器 MgO 薄膜二次电子发射系数

表2 极间电压-250 V下不同技术电子倍增器 MgO 薄膜二次电子发射系数

电子倍增器	发射系数
磁控溅射法现在技术	5.4
磁控溅射法早期技术	4.6
国内敏化法技术	3.8
美国技术	5.9

电子倍增器增益值决定了铯钟初始工作电压值,目前磁控溅射技术研制电子倍增器具备接近美国研制电子倍增器的增益指标,保证铯钟初始工作电压较低。目前采用磁控溅射法研制电子倍增器的铯钟初始工作电压大多在-1 100 V左右,而早期采用磁控溅射法研制电子倍增器的铯钟初始工作电压大多在-1 600 V~1 700 V附近,采用敏化法研制电子倍增器的铯钟初始工作电压大多在-2 100 V~2 200 V附近。以电子倍增器极限工作电压-2 600 V计算,与早期技术比,目前磁控溅射法研制电子倍增器工作电压范围变大了500~600 V。

2.2 衰减测试与分析

为缩短试验周期,我们采用加速考核的方式,测试电子倍增器的衰减情况。具体方案为:调整工作电压,将电子倍增器输出电流调至200 nA,固定此时工作电压值,以0.5 h为间隔记录电子倍增器输出电流值,分析数据变化,获得电子倍增器衰减情况。图5为不同技术研制电子倍增器输出电流随时间的变化曲线。从图中可以看出,磁控溅射现在技术与早期技术电子倍增器输出电流初期都呈现上升趋势,然后进入下降阶段,而敏化法技术电子倍增器输出电流没有上升而直接下降。磁控早期技术上升时间较短,25 h左右由200 nA上升至290 nA,然后进入下降阶段。与早期技术相比,目前磁控溅射技术输出电流时间上升时间更长、上升幅度更高,250 h左右由200 nA升至550 nA,然后进入衰减阶段。进入衰减阶段后,三种技术研制电子倍增器输出电流衰减速率明显不同,输出电流衰减速率为:0.12 nA/h(磁控现在技术)、0.49 nA/h(磁控早期技术)、1.06 nA/h(国内敏化技术)(表3)。与前两种技术相比,目前磁控溅射技术研制电子倍增器输出电流衰减速率显著下降。

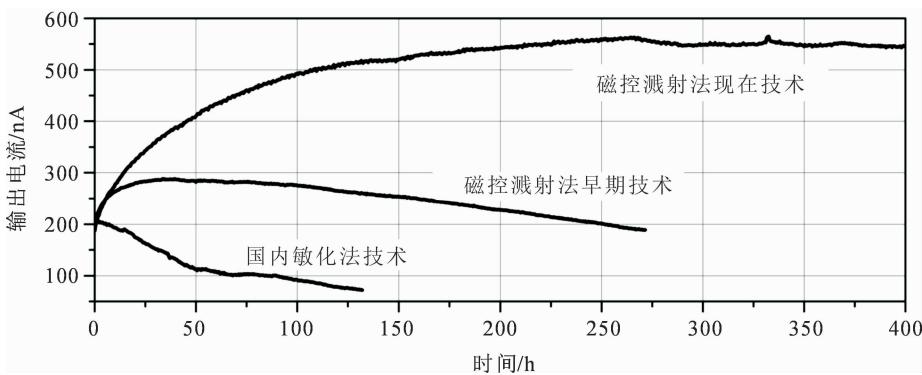


图5 测试系统中不同技术电子倍增器输出电流随时间的变化曲线

表3 测试系统中不同技术电子倍增器输出电流衰减速率

电子倍增器	衰减速率/(nA/h)
磁控溅射法现在技术	0.12
磁控溅射法早期技术	0.49
国内敏化法技术	1.06

电子倍增器衰减速率是影响铯钟使用寿命的关键指标。在铯钟中电子倍增器衰减速率是指电子倍增器平均每天的工作电压增幅。以上测试数据不能定量说明铯钟电子倍增器实际衰减速率,但由于造成衰减的物理机理是一致的,因此可以定性说明电子倍增器衰减情况。从以上数据可以看出,目前磁控溅射技术在控制电子倍增器衰减方面取得了较大提升,这些提升在铯钟中已有体现。表 4 统计了铯钟中不同技术电子倍增器衰减速率与使用寿命数据。国内敏化法技术研制电子倍增器封装铯钟,电压增幅约为 $8\sim10$ V/d,使用寿命仅为 2 个月左右。早期磁控溅射法研制电子倍增器封装铯钟,电压增幅约为 2 V/d,使用寿命约为 2 年。目前磁控溅射法研制电子倍增器封装铯钟,电压增幅约为 $0.1\sim0.7$ V/d,使用寿命可达 5 年以上,部分使用寿命可达 20 年。从文献报道看,美国^[5-6]研制电子倍增器的衰减速率分布在 $0.05\sim0.25$ V/d,衰减速率很低,不同器件一致性较好,使用寿命可达 12 年以上,部分使用寿命可达 30 年。与美国研制电子倍增器比,目前国内磁控溅射技术研制电子倍增器在衰减速率方面还存在差距,不同器件衰减速率离散性更大,还需要继续降低电子倍增器的衰减速率,控制器件一致性。

表 4 铯钟中不同技术电子倍增器衰减速率与使用寿命

电子倍增器	衰减速率/(V/d)	使用寿命/年
磁控溅射法现在技术	$0.1\sim0.7$	$5\sim20$
磁控溅射法早期技术	2	2
国内敏化法技术	$8\sim10$	0.2
美国技术	$0.05\sim0.25$	$12\sim30$

2.3 暗电流测试与分析

在放大铯离子信号的过程中,电子倍增器本底噪声不可避免地会引入到最终的输出信号中,从而影响铯钟整机技术指标,因此控制电子倍增器本底噪声对于提升铯钟整机技术指标十分重要^[11]。关闭入射电子流,测试不同工作电压下电子倍增器的暗电流数值。图 6 为不同技术电子倍增器暗电流值随工作电压的变化曲线。从图中可以发现,在工作电压 -2000 V 以下,几种不同技术电子倍增器暗电流值均小于 1 pA,当工作电压到达 -2500 V,国内敏化法与磁控溅射法早期技术研制电子倍增器暗电流值出现跃升,分别为 2.6 pA 和 5.8 pA,而目前磁控溅射技术研制电子倍增器与美国研制电子倍增器暗电流值保持在较低水平,均小于 0.5 pA。

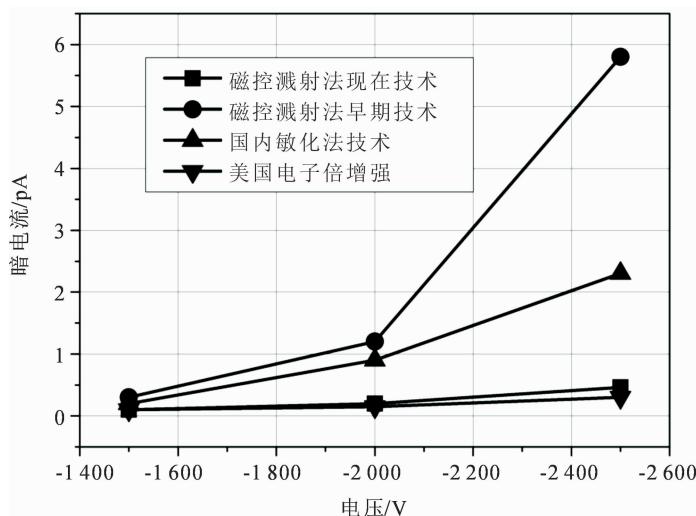


图 6 不同技术电子倍增器暗电流随工作电压的变化曲线

保持工作电压在 -2500 V 下,测试了电子倍增器暗电流随时间的变化。图7为不同技术研制电子倍增器暗电流随时间的变化曲线。从图中可以看出,与国内敏化法和磁控溅射法早期技术研制电子倍增器相比,目前磁控溅射技术研制电子倍增器在暗电流值与波动性控制方面均有了较大提升,已与美国研制电子倍增器相当,这为铯钟高指标的获得提供了技术基础。王骥等人^[12]曾对铯钟稳定度与信噪比的关系做了分析,指出信噪比达到3000以上才能获得较高的长期稳定度。电子倍增器暗电流指标小于0.5 pA,可为铯钟信噪比指标达到3000以上起到重要支撑作用。目前国产小型磁选态铯钟^[13]信噪比可达4000左右,万秒频率稳定度 $\leqslant 8.5 \times 10^{-14}$,5天频率稳定度 $\leqslant 1.0 \times 10^{-14}$,达到美国优质管铯钟HP5071A技术指标。

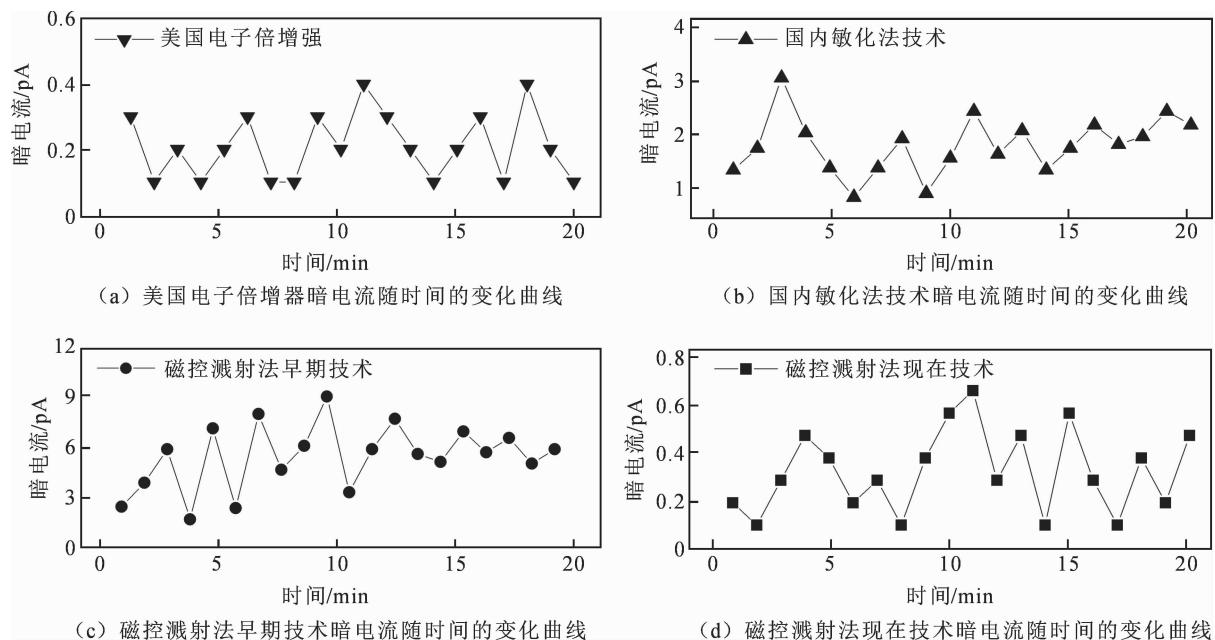


图7 不同技术研制电子倍增器暗电流随时间的变化曲线

3 结语

电子倍增器是影响小型磁选态铯钟使用寿命与信噪比的关键器件,而使用寿命问题最为突出,是影响国产小型磁选态铯钟研制的瓶颈技术问题。基于电子倍增器工作原理与失效机理,分析得出了电子倍增器性能指标与铯钟性能指标的对应关系。采用与美国 Hewlett-Packard 公司的电子倍增器测试系统原理一致的测试系统,测试了目前国产小型磁选态铯钟磁控溅射技术电子倍增器技术指标,与国内敏化法以及美国研制电子倍增器指标进行了对比分析。通过数据对比分析得出,与国内敏化法以及早期磁控溅射法相比,目前磁控溅射技术研制电子倍增器在增益、二次电子发射系数、衰减速率、暗电流等多项影响铯钟性能的关键指标上均取得了较大进步。电子倍增器增益提高了4倍,二次电子发射系数由4.6提高至5.4,暗电流指标降至0.5 pA以下,衰减速率由2 V/d降至0.1~0.7 V/d,使用寿命由2年提高至5年以上,部分可达20年。相比美国研制电子倍增器性能,增益与二次电子发射系数已接近,暗电流已达到,衰减速率还存在差距,具体表现不同器件衰减速率离散性较大。在后续的研究工作中,还需要继续降低电子倍增器的衰减速率,提高不同器件一致性。

参考文献:

- [1] 陈江,李得天,王骥,等.导航铯原子钟的发展现状及趋势[J].国际太空,2016(4):20-24.
- [2] 陈江,王骥,朱宏伟,等.高性能小型磁选态铯原子钟研制进展[C]//2011年全国时间频率学术会议,北京:全国时间频率

学术会议组委会,2011:78-80.

- [3] 成大鹏,马寅光,王骥,等.影响铯束管寿命因素的分析[J].真空与低温,2015,21(1):48-50.
- [4] 幸小雷,王超,黄凯,等.替代铯钟内电子倍增器技术初探[C]//2011年全国时间频率学术会议论文集,北京:全国时间频率学术会议组委会,2011:81-84.
- [5] KUSTERS J A,CUTLER L S,POWERS E D. Long-term experience with cesium beam frequency standards[C]//1999 Joint Meeting EFTF - IEEE IFCS,1999:159-163.
- [6] 刘春侠,王改霞,漆溢. HP5071A 铯原子钟内部工作参数的监视与分析[J]. 时间频率学报,2004,27(1):54-63.
- [7] 陈江,王骥,马沛,等. LIP Cs3000C 磁选态铯原子钟的测试[J]. 时间频率学报,2018,41(3):190-193.
- [8] 陈江,马沛,王骥,等. 小型磁选态铯原子钟产品化进展[J]. 宇航计测技术,2020,40(3):12-16.
- [9] WARGO P,HAXBY B V,SHEPHERD W G. Preparation and properties of thin film MgO secondary emitters[J]. Journal of Applied Physics,1956,27(11):1311-1316.
- [10] 何一蕾,王多书,郭磊. 打拿极材料二次电子发射系数计算模型研究现状[J]. 真空与低温,2017,23(3):207-211.
- [11] STRAKA E R. Performance characteristics of cesium beam tube electron multipliers[C]//36th Annual Symposium on Frequency Control,IEEE Xplore,1982:230-235.
- [12] 王骥,陈江,成大鹏,等. 小型磁选态铯束管信噪比测试及其分析[C]//2011年全国时间频率学术会议论文集,北京:全国时间频率学术会议组委会,2011:92-94.
- [13] 张军,王向磊,王路生,等. 国产小铯钟比测结果分析[J]. 时间频率学报,2018,41(3):160-170.