



## 电子敏感CMOS部件除气方法

李桐桐 肖超 焦岗成 闫磊 樊海波 马靖 李成林

### Degassing method of electronic sensitive CMOS components

LI Tongtong, XIAO Chao, JIAO Gangcheng, YAN Lei, FAN Haibo, MA Jing, LI Chenglin

引用本文:

李桐桐, 肖超, 焦岗成, 等. 电子敏感CMOS部件除气方法[J]. *应用光学*, 2022, 43(6): 1181–1186. DOI: 10.5768/JAO202243.0604019

LI Tongtong, XIAO Chao, JIAO Gangcheng, et al. Degassing method of electronic sensitive CMOS components[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(6): 1181–1186. DOI: 10.5768/JAO202243.0604019

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604019>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 高灵敏度光纤应变传感器

High sensitive fiber strain sensor

应用光学. 2017, 38(5): 848–851 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0508002>

#### 基于有限包络圆的光电平台传感器布局设计

Design of sensor layout in photoelectric platform based on finite circle method

应用光学. 2017, 38(6): 857–862 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0601001>

#### 一种星敏感器主点和焦距的加权在轨标定方法

Weighted on-orbit calibration method of principal point and focal length for star sensor

应用光学. 2018, 39(6): 827–831 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601009>

#### 基于视觉的传感器位置记忆追踪方法

Memory tracking method of sensor location based on vision

应用光学. 2021, 42(5): 853–858 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502005>

#### 波长和强度同时响应的锥形多模光纤温度传感器

Tapered multi-mode fiber temperature sensor based on simultaneous response of wavelength and intensity

应用光学. 2017, 38(2): 331–335 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0208001>

#### EBCMOS相机盲元检测方法的研究

Research on blind element detection method of EBCMOS camera

应用光学. 2021, 42(1): 137–142 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103007>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2022) 06-1181-06

# 电子敏感 CMOS 部件除气方法

李桐桐<sup>1,2</sup>, 肖 超<sup>1,2</sup>, 焦岗成<sup>1,2</sup>, 闫 磊<sup>1,2</sup>, 樊海波<sup>1,2</sup>, 马 靖<sup>1,2</sup>, 李成林<sup>1,2</sup>

(1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 电子轰击有源像素传感器 (electron bombarded active pixel sensor, EBAPS) 作为真空-固体混合型微光器件, 其性能和工作寿命一定程度上取决于器件内部真空度保持情况。分析造成 EBAPS 器件真空度下降的原因, 推断出真空度恶化的严重后果, 提出提高和保持 EBAPS 器件内部真空度的手段, 通过搭建超高真空除气系统对 EBAPS 器件中核心部件电子敏感 CMOS 部件的放气特性进行了研究, 并根据研究结果得到最佳的除气工艺参数, 为 EBAPS 数字化微光器件的制备提供了技术基础。

**关键词:** 电子轰击有源像素传感器; 电子敏感 CMOS; 放气特性; 除气工艺

中图分类号: TN366

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202243.0604019](https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604019)

## Degassing method of electronic sensitive CMOS components

LI Tongtong<sup>1,2</sup>, XIAO Chao<sup>1,2</sup>, JIAO Gangcheng<sup>1,2</sup>, YAN Lei<sup>1,2</sup>,  
FAN Haibo<sup>1,2</sup>, MA Jing<sup>1,2</sup>, LI Chenglin<sup>1,2</sup>

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;

2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** Electron bombarded active pixel sensor (EBAPS) is a hybrid vacuum-solid low-level-light device. Its performance and service life depend on the vacuum maintenance of the device to a certain extent. The reasons for the decline of vacuum degree of EBAPS devices were analyzed, the serious consequences of the deterioration of vacuum degree were deduced, and the means to improve and maintain the internal vacuum degree of EBAPS devices were put forward. By constructing an ultra-high vacuum degassing system, the degassing characteristics of the core components of EBAPS electronic sensitive complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) components were studied. According to the research results, the optimal degassing process parameters were obtained, which provided a technical basis for the preparation of EBAPS digital low-level-light devices.

**Key words:** electron bombarded active pixel sensor; electronic sensitive complementary metal-oxide-semiconductor; discharging characteristics; degassing process

## 引言

随着微光夜视装备技术的快速发展, 对微光夜视器件提出了信息化、高可靠和长寿命的要求。微光夜视器件主要分为传统真空微光器件、固体微光器件和真空-固体混合型微光器件, 根据器件结构和工作原理的不同, 应用于不同环境。传统真空微光器件相较于固体微光器件具有其无法替代的优势, 如低噪声, 高速电子快门, 时间精度可

以到纳秒级, 超低功耗。近年来以 EBAPS 为典型代表的真空-固体混合型数字化微光器件, 由于兼顾了上述两者的技术优势, 具备高灵敏度、低噪声和快响应等优势, 成为微光夜视领域中重点研究方向<sup>[1-2]</sup>。一般来说, 传统真空微光器件和真空-固体混合型微光器件都是由光电阴极、电子倍增系统以及高压电源组成, 器件内部超高真空度的保持是其工作性能和使用寿命的保证, 因此对真空

收稿日期: 2022-09-04; 修回日期: 2022-10-11

基金项目: 国家自然科学基金 (U2141239)

作者简介: 李桐桐 (1995—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事数字化微光器件研究。E-mail: [Littka@126.com](mailto:Littka@126.com)

类微光器件内部真空度的可靠性提出了高要求。

近年来,国内外有诸多研究者对真空型微光器件的真空度保持进行了研究。程耀进等人根据潘宁放电原理对按照三代微光像管制作工艺封接的管壳内部真空度进行监测,发现工艺封接中存在真空度下降现象,根据材料内部气体溶解放气模型以及微小漏孔中气体漏气模型,分析得出管壳内部真空度下降主要是由于封接端面存在的缺陷引起,为提高微光像增强器的使用寿命提出了改进方向<sup>[3]</sup>。聂晶等人通过研究指出了微光像增强器的微通道板内的残余气体是影响噪声因子的主要因素,并通过实验研究证明,真空热处理和电子清刷可以有效去除微通道板表面及体内的残余气体,降低其噪声<sup>[4]</sup>。徐江涛在三代微光像增强器的研制中发现引起 GaAs 光阴极灵敏度下降的主要因素是器件内部的有害气体和杂质,当它们成为真空系统中主要压强后,在极短时间内就会使 GaAs 光阴极灵敏度下降 80%,甚至到零<sup>[5]</sup>。

本文针对真空-固体混合型微光器件——EBAPS 器件,分析其真空度下降的原因和造成的影响,总结提高 EBAPS 器件内部真空度的手段,最后针对 EBAPS 器件中的主要放气源—电子敏感 CMOS 部件的放气现象进行了研究,并提出最佳的除气工艺。

## 1 EBAPS 器件真空度恶化的影响及提高方法

### 1.1 EBAPS 器件真空度恶化的影响

EBAPS 器件如图 1 所示主要是由负电子亲和势 GaAs 光电阴极部件与背照式电子敏感 CMOS 芯片部件通过可伐金属管壳封接构成,光阴极受环境光照所产生的光电子被高压电场加速后经近贴聚焦系统轰击至电子敏感 CMOS 芯片中,硅基衬底吸收光电子能量而产生电子-空穴对,形成电子轰击半导体增益,倍增电子最终被读出电路收集并输出视频信号<sup>[6-7]</sup>。

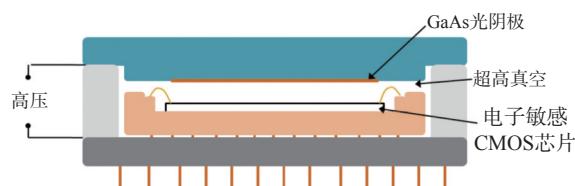


图 1 EBAPS 器件结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of EBAPS device

EBAPS 作为一种真空-固体微光器件,其内部

真空度过低可能会对器件性能造成以下影响:

1) 负电子亲和势 GaAs 光阴极正常工作所需的真空度要求为不低于  $10^{-7}$  Pa 量级,若管内真空度达不到该量级,光阴极则无法激发光电子,器件功能失效;2) 器件管体内有微量残余气体分子释放,在后期工作过程中,气体分子被电离,正离子经高压电场轰击至 GaAs 光阴极表面时,可能会造成 Cs-O 层破坏,导致表面负电子亲和势状态改变,造成阴极量子效率降低,甚至可能永久地损伤阴极结构,且该过程不可逆<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2 提高 EBAPS 器件真空度的方法

影响 EBAPS 器件内部真空度的主要因素有器件管壳的漏气、部件材料的放气以及管壳制造工艺不良等,其中部件材料的放气是制约 EBAPS 器件内部真空度提升的关键因素。EBAPS 器件中 GaAs 光阴极部件和管壳部件的制造及除气相关技术均是基于成熟的微光像增强器,可以满足 EBAPS 器件超高真空环境兼容的需求,而作为 EBAPS 器件核心部件的电子敏感 CMOS 部件的除气方法处于研究阶段,尚无相关除气方法研究。

根据前期的研究基础,采用以下方法可以在很大程度上提高 EBAPS 器件的内部真空度。

- 器件结构及工艺设计时优先考虑出气量少、气孔缺陷少的材料:陶瓷基座采用高强度、高致密性、高气密性的多层陶瓷材料,可以抑制基座的放气。陶瓷基座与 CMOS 芯片的粘接采用金属合金焊料,如银锡合金、金锡合金等,基于金属合金焊料放气量低、易除气的特性,降低真空环境下出现缓慢放气的现象;

- EBAPS 器件中陶瓷基座为了实现电学导通,其针脚采用钎焊的方式进行连接,因此在封装前要对陶瓷基座的气密性进行检漏筛选,杜绝基座针脚钎焊微漏导致器件内部真空度持续下降;

- EBAPS 器件管壳内部焊接非蒸散型吸气剂,在器件封装过程中,通过对吸气剂进行适当的激活处理,基于吸气剂的物理及化学吸附工作原理,提升管内真空度,并且在器件封装后吸气剂会吸附周围杂质气体,提高器件的储存寿命<sup>[10]</sup>;

- 基于电子轰击诱导脱附原理对 CMOS 芯片表面除气,低能电子轰击 CMOS 芯片表面后,促使吸附在芯片表面上的气体、杂质及离子解吸,降低芯片的放气量<sup>[11-12]</sup>。

利用上述方法可以有效地提升 EBAPS 器件内部的真空度,但对于电子敏感 CMOS 部件,电子轰

击只能使芯片表面残留的气体脱附, 难以去除芯片内部、陶瓷基座及焊料夹层溶解吸附的气体。因此, 为了进一步提升 EBAPS 器件内部的真空环境, 必须开展针对电子敏感 CMOS 部件的放气特性和除气方法研究。

## 2 电子敏感 CMOS 部件除气方法

电子敏感 CMOS 部件的主要组成材料有氧化硅、氧化铝、单晶硅、合金焊料等, 在其加工及制造过程中会溶解吸附气体, 而在后期工作过程中, 吸附的气体分子缓慢释放后被电离, 正离子经高压电场轰击至 GaAs 光阴极, 会破坏光阴极的负电子亲和势, 降低 EBAPS 器件的性能及工作寿命。因此, 本节通过研究电子敏感 CMOS 部件的放气特性, 确定相应的除气方法。

### 2.1 实验装置及原理

本研究通过搭建的超高真空除气系统, 利用四极质谱仪<sup>[13-14]</sup>对 EBAPS 器件中的核心部件—电子敏感 CMOS 部件的放气特性进行监测, 重点围绕除气工艺中的烘烤温度和烘烤时间进行研究, 采用的电子敏感 CMOS 部件除气系统示意图如图 2 所示。

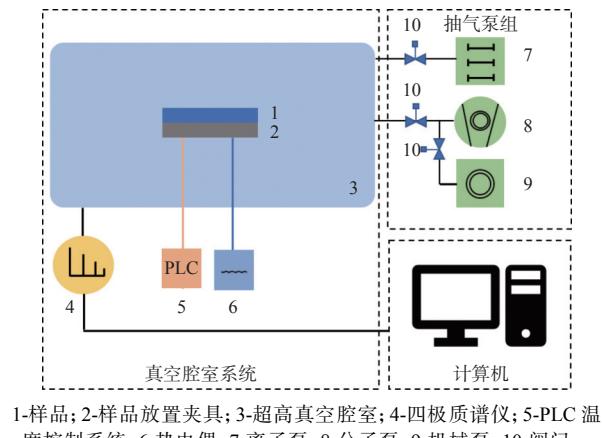


图 2 电子敏感 CMOS 部件除气系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of degassing system for electronic sensitive CMOS component

对于超高真空度腔室, 其放气量  $Q$  与真空系统真空度  $P$ 、真空腔室的实际抽速  $S$  和真空腔室体积  $V$  之间有如下关系:

$$\sum Q - SP = V(dP/dt) \quad (1)$$

因此, 当上述电子敏感 CMOS 部件放气分析装置内部抽放气达到动态平衡时, 通过四极质谱

仪监测烘烤电子敏感 CMOS 部件前后, 腔室内各气体分压强的变化, 即能实现对电子敏感 CMOS 部件放气特性的研究。电子敏感 CMOS 部件除气工艺的研究主线是围绕烘烤温度和烘烤时间 2 个工艺参数。基于四极质谱仪的工作原理分析电子敏感 CMOS 部件材料释放的气体成分和各气体所占分压强, 有助于检测出主要的放气源以及判断所采用烘烤温度和烘烤时间是否科学合理, 进而优化除气工艺参数。

### 2.2 实验过程

本实验采用动态测试方法, 对超高真空腔室抽气的同时, 也对电子敏感 CMOS 部件持续加热, 并监测腔室内气体分压强变化情况, 由于部件中释放的气体分子会破坏腔室原本内部压强的动态平衡, 所以四极质谱仪监测的质谱峰值反映的是部件加热过程中的放气速率<sup>[15]</sup>。电子敏感 CMOS 部件放入超高真空腔室后, 为保证测量系统的真空度尽可能高, 实验系统腔室的所有法兰端口均采用无氧铜圈进行密封。此外, 为了最大程度地减小真空腔室本底放气速率对电子敏感 CMOS 部件放气速率的影响。实验前先对腔室内外进行高温烘烤除气, 当腔室内真空度优于  $2 \times 10^{-7}$  Pa 稳定后, 停止烘烤降至室温。实验时采用局部热辐射的方式对电子敏感 CMOS 部件进行加热, 加速部件放气, 利用四极质谱仪监测放气曲线。

电子敏感 CMOS 芯片的极限工作温度约为 300 °C, 用于芯片和基座粘接的金属焊料熔点为 270 °C, 为了保证电子敏感 CMOS 部件的工作性能稳定, 除气温度不能超过 270 °C。通过监测腔室真空度变化并结合质谱法分析, 得出不同烘烤温度下部件的放气特性, 确定部件的有效烘烤温度和主要释放的气体, 之后对部件的烘烤除气时间进行实验研究, 确定部件的有效烘烤时间, 获得最佳的除气工艺参数。

### 2.3 实验结果与分析

实验前, 对部件样品进行烘烤加热以确定部件材料主要释放气体, 根据四极质谱仪监测的如图 3 所示的质谱图可以发现, 离子主峰出现在质量数为 1、2、16、17、18、28、44 处, 其中 1、16、17 分别是氢气、水蒸气的碎片峰, 所以综合判定电子敏感 CMOS 部件释放的气体中占主要比重有: 氢气 ( $H_2$ )、水蒸气 ( $H_2O$ )、氮气 ( $N_2$ )/一氧化碳 ( $CO$ )、二氧化碳 ( $CO_2$ ), 因此在本实验中主要关注这 4 种气体对应的离子流变化情况。

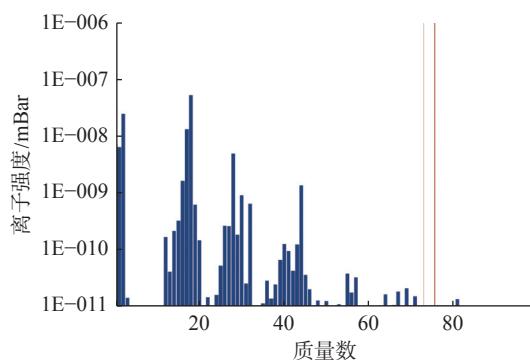


图 3 实验前质谱峰分布

Fig. 3 Mass spectrum peak distribution before experiment

进行不同烘烤温度下部件材料放气速率实验时,首先监测本底的放气速率,待本底放气速率稳定后,实施 40 min 内匀速升温,分别升至根据部件的耐温温度设计的 3 个烘烤温度( $220^{\circ}\text{C}$ 、 $240^{\circ}\text{C}$ 、 $260^{\circ}\text{C}$ )后保持烘烤 5 h。监测 4 种气体在不同温度下的离子流变化曲线,即质量数为 2、18、28、44 所对应的气体  $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2/\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  放气速率的变化曲线。由图 4(a)~图 4(d)可以发现  $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2/\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  均随着烘烤温度升高而加速脱附,烘烤温度越高,部件的放气速率越快。因此可通过提升烘烤温度,加快气体分子从电子敏感 CMOS 部件材料中脱附的速率,提升其除气效果。

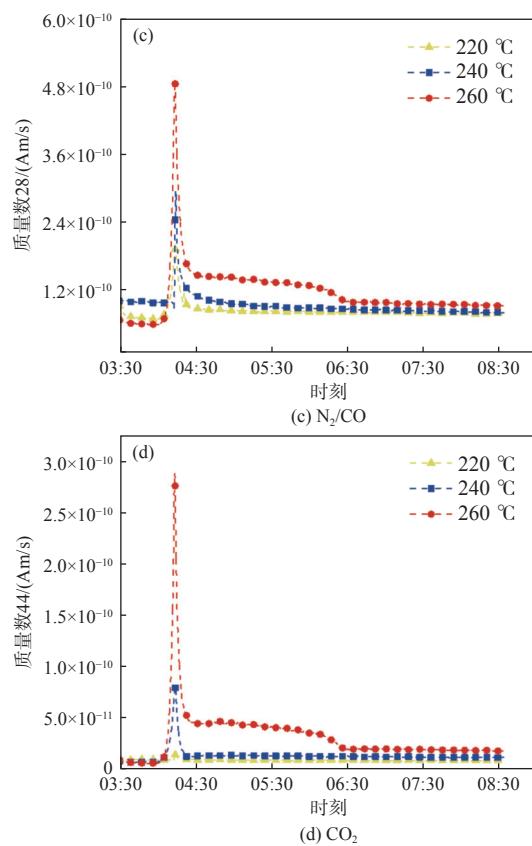
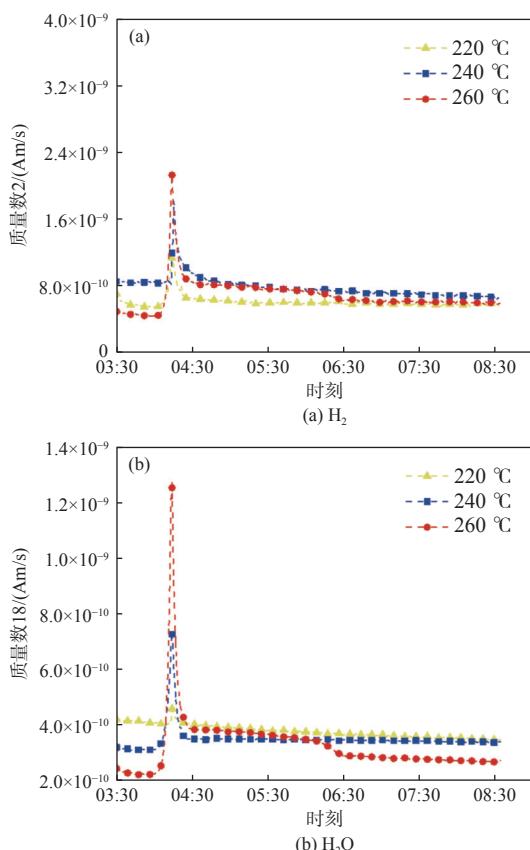


图 4 不同烘烤温度下 4 种气体的离子流变化

Fig. 4 Changes of ion flow of four gases at different drying temperatures

根据图 4(a)~图 4(d)可知,电子敏感 CMOS 部件中  $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2/\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  在不同烘烤温度下,放气速率的变化情况均不相同。随着温度的升高,测试时间内各气体组分的相对占比并没有发生明显变化,说明温度升高对电子敏感 CMOS 部件的放气组分基本没有影响。其次,在相同抽气速率条件下,温度越高,由于气体的放气速率越快,除气时间前 2 h 内,260 °C 的放气速率仍高于 240 °C 和 220 °C,但除气时间超过 2 h 后,260 °C 的放气速率相较于 240 °C 和 220 °C 时的衰减也越快。这是由于温度越高除气效果越明显,导致电子敏感 CMOS 部件中残留的气体含量逐渐减少,在经过长时间除气处理后,其放气速率会出现较为明显的衰减。因此,在芯片性能不受温度影响的前提下,提升烘烤的除气温度是提升除气效果的关键。

根据烘烤温度实验结论:烘烤温度越高,残余气体从电子敏感 CMOS 部件材料内脱附速率越快。下一步选取了接近 CMOS 部件工作极限温度 260 °C 的除气温度,进行了长时间烘烤除气实验以

期获得部件达到最佳除气时间。根据图 5 的实验结果, 在测试时间内, 从 260 °C 烘烤温度下的 4 种气体释放曲线可以看出, 脱附速率最快的气体为 H<sub>2</sub>, 其余依次为 H<sub>2</sub>O、CO(N<sub>2</sub>)、CO<sub>2</sub>。经过烘烤 72 h 后, 4 种气体的放气速率基本能与烘烤前本底的气体释放速率一致, 并结合烘烤前后腔室内真空度均稳定在  $2 \times 10^{-7}$  Pa 左右, 说明电子敏感 CMOS 部件在 260 °C 下烘烤 72 h 可以达到最佳除气效果。

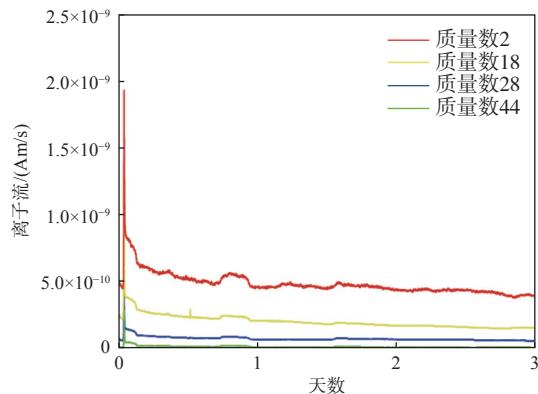


图 5 4 种气体在 260 °C 下烘烤 3 天的离子流变化

Fig. 5 Changes of ion flow of four gases baked at 260 °C for 3 days

部件材料释放的气体中, 对 GaAs 光阴极灵敏度参数影响最严重的残气是 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O, 而 N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> 相对要小。因此, 对于 EBAPS 器件而言, 降低器件内 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 的气体含量, 对于高性能、长寿命的 EBAPS 器件尤为重要。根据电子敏感 CMOS 部件的放气特性分析可知, 其放气成分以 H<sub>2</sub> 为主, 而对光阴极灵敏度影响较大的气体 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 含量极低。并由图 5 可知, 在经过 72 h 的烘烤除气后, 电子敏感 CMOS 部件的放气速率衰减至腔室的本底放气水平, 满足低放气量除气效果的要求。

### 3 结论

本文针对 EBAPS 器件中电子敏感 CMOS 部件和 GaAs 光阴极超高真空兼容性的需求, 分析导致 EBAPS 器件真空度恶化的原因, 总结了提升器件真空度的方法, 并通过搭建超高真空除气系统, 围绕电子敏感 CMOS 部件除气工艺的烘烤温度和烘烤时间开展实验研究。根据实验结果, 电子敏感 CMOS 部件材料中放气量最大的是 H<sub>2</sub>, 其次为 H<sub>2</sub>O、CO(N<sub>2</sub>)、CO<sub>2</sub>, 并且在保证芯片正常工作的前提下, 烘烤温度越高, 部件放气速率越快, 验证

了高温烘烤对部件除气有较好的效果。最后, 提出了在进行电子敏感 CMOS 部件与光阴极部件压封前, 预先对电子敏感 CMOS 部件进行 72 h 以上的 260 °C 的高温烘烤除气, 使吸附在部件表面的气体或杂质脱附, 对于 EBAPS 器件内部超高真空的提升和维持具有关键性作用。

### 参考文献:

- [1] 吴昊, 伍园. 数字微光夜视器件技术研究[J]. 光电子技术, 2022, 42(1): 72-78.  
WU Hao, WU Yuan. Study on the digital low-light level night vision device technology[J]. Optoelectronic Technology, 2022, 42(1): 72-78.
- [2] 徐鹏霄, 唐光华, 唐家业, 等. EBCMOS 混合型光电探测器研究[J]. 光电子技术, 2016, 36(4): 232-236.  
XU Pengxiao, TANG Guanghua, TANG Jiaye, et al. Review of EBCMOS hybrid photodetector[J]. Optoelectronic Technology, 2016, 36(4): 232-236.
- [3] 程耀进, 徐江涛. 微光像增强器管壳内部真空度恶化分析研究[J]. 真空电子技术, 2012(2): 55-57.  
CHENG Yaojin, XU Jiangtao. Study on decrease of vacuum level in low-light image intensifier[J]. Vacuum Electronics, 2012(2): 55-57.
- [4] 聂晶. 基于真空除气的微通道板噪声抑制技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2013.  
NIE Jing. The research of micro-channel plate restrain technology based on vacuum degassing[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2013.
- [5] 徐江涛. 真空残气对 GaAs 阴极发射性能的影响[J]. 应用光学, 2003, 24(2): 13-15.  
XU Jiangtao. Effect of residual gas on emission property of gallium arsenide cathode in vacuum[J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(2): 13-15.
- [6] CAJGFINGER T, DOMINION A, BARBIER R. Single photon detection and localization accuracy with an eb-CMOS camera[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 2015, 787: 176-181.
- [7] 刘亚宁, 桑鹏, 吕嘉伟, 等. 微型低功耗 EBAPS 相机技术[J]. 红外技术, 2019, 41(9): 810-818.  
LIU Yaning, SANG Peng, LYU Jiawei, et al. Miniature low power consumption EBAPS camera technology[J]. Infrared Technology, 2019, 41(9): 810-818.
- [8] 贾欣志. 负电子亲和势光阴极及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 207-224.

- JIA Xinzhi. Negative electron affinity photocathodes and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 207-224.
- [9] GUO Xing, SHI Feng. Stability of transmission-mode GaAs photocathodes in an ultrahigh vacuum system[J]. Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications, 2021, 11763: 203.
- [10] MIYAZAWA T, TOBISHIMA K. Non-evaporable getter (NEG) coating using titanium and palladium vacuum sublimation[J]. *Vacuum Surface and Science*, 2018, 61(4): 227-235.
- [11] LIU Hulin, WANG Xing. High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018: 67(1): 47-52.
- [12] ZHANG Huzhong, LI Detian. Residual gas adsorption and desorption in the field emission of titanium-coated carbon nanotubes [J]. *Materials*, 2019, 18(12): 2937.
- [13] 董笑瑜, 梁田, 范亚松. 四极质谱仪在微波真空电子器件中的应用[J]. *真空电子技术*, 2018(6): 61-69.
- DONG Xiaoyu, LIANG Tian, FAN Yasong. Applications of quadrupole mass spectrometers in microwave vacuum electronic devices[J]. *Vacuum Electronics*, 2018(6): 61-69.
- [14] 黄化岩, 陈明, 李灿伦. 四极质谱仪在电子诱导脱附实验中的应用[J]. *真空*, 2016, 53(5): 51-54.
- HUANG Huayan, CHEN Ming, LI Canlun. Application of quadrupole mass spectrometer in electron-stimulated desorption[J]. *Vacuum*, 2016, 53(5): 51-54.
- [15] 张亚平, 刘湘云, 董黎红, 等. 外探测器杜瓦夹层材料的出气特性研究[J]. *红外*, 2013, 34(4): 34-37.
- ZHANG Yaping, LIU Xiangyun, DONG Lihong, et al. Outgassing characteristic study of internal material in dewar[J]. *Infrared*, 2013, 34(4): 34-37.