

电子倍增型 GaAs 光阴极实验研究

胡仓陆^{1,2}, 郭 晖^{1,2}, 焦岗成^{1,2,3}, 彭岔霞^{1,2}, 冯 驰^{1,2},
徐晓兵^{1,2}, 周玉鉴^{1,2}, 成 伟^{1,2}, 王书菲^{1,2}

(1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西西安 710065; 2. 北方夜视科技集团有限公司, 云南昆明 650223;
3. 西北工业大学材料学院, 凝固技术国家重点实验室, 陕西西安 710072)

摘 要: 电子倍增型 GaAs 光阴极是利用雪崩倍增效应的一种新型光阴极组件, 通过在常规 GaAs 光阴极中引入雪崩电子倍增层制备了 GaAs 光阴极/电子倍增器一体化组件, 研究了该组件的热清洗温度、电子增益等性能. 对组件热清洗工艺前后的 $I-V$ 特性进行了对比测试, 结果表明, 该组件可以承受 580℃ 的热清洗温度, 并获得了 12.6 倍的电子增益; 880nm 处的探测灵敏度 $\geq 3.87\text{mA/w}$; 暗电流密度 $\leq 6.79 \times 10^{-5}\text{mA/cm}^2$.

关键词: 砷化镓; 光阴极; 雪崩倍增; 电子增益; 负电子亲和势

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 08-1549-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.08.015

An Experimental Study on GaAs Photocathode with Electronic Multiplier

HU Cang-lu^{1,2}, GUO Hui^{1,2}, JIAO Gang-cheng^{1,2,3}, Peng Cha-xia^{1,2}, FENG Chi^{1,2},
XU Xiao-bing^{1,2}, ZHOU Yu-jian^{1,2}, CHENG Wei^{1,2}, WANG Shu-fei^{1,2}

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. North Night-Vision Science & Technology Group Corp, Ltd, Kunming, Yunnan 650223, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, State Key Laboratory of Solidification Processing, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: GaAs photocathode with avalanche electron multiplier is a new type photocathode and fabricated by adding the avalanche electron multiplication layer in typical GaAs photocathode, the hot clean temperature, electron gain and other performance of the photocathode component are investigated. The I-V characteristic of the photocathode component after and before hot cleaning was measured and analyzed. The experimental results were shown that photocathode component can endure 580℃ hot cleaning temperature and got electron gain 12.6, the radiation sensitivity is greater or equal to 3.87mA/w at 880nm of wave length, the dark current density is less than or equal to $6.79 \times 10^{-5}\text{mA/cm}^2$.

Key words: GaAs; photocathode; avalanche multiplication; electron gain; negative electron affinity

1 引言

上世纪 60 年代, 微通道板电子倍增器^[1,2] (Micro-Electron-Multipliers, MCP) 的发明和商品化是微光探测和成像领域里一个重大的里程碑事件, 是它促使微光夜视技术由一代级联式像增强器发展到第二代的 MCP 像增强器, 从而大大减小了微光夜视仪的体积和重量, 尤其是 MCP 所具有的电饱和和特性使器件在强光条件下能够正常工作; 在此基础上, 人们又将具有灵敏度更高的负电子亲和势 (NEA) GaAs 光阴极引入像管中, 更新换代为第三代微光夜视技术^[3,4]. 目前, 三代微光夜视技术已达到相当高的水平, 并广泛应用于世界若干局部战

争、防爆反恐及相关民用领域. 尽管如此, 人们仍在不懈努力, 继续挖掘像增强器各个部件或环节的潜力, 以求不断提高装备性能, 延伸作用距离. 这其中, 关于像管中电子倍增器的改进和更新工作就一直有停止.

MCP 应用于像管中已经显露出如上所述的优点, 但现有的 MCP 结构和像管中的分离式结构, 同时也不同程度地暴露了很多弱点: 微通道体层内部埋藏了大量的残余气体难以真空除气导致器件工作寿命大大缩短; 不连续蜂窝式平面结构导致 MCP 有效 (开口) 工作面积减小, 使信噪比损失至少 40% 以上; 近贴聚焦像管中与 MCP 相关的前后近贴距离, 导致像管的 MTF (调制传递函数) 性能的提升受到很大限制等.

为了克服 MCP 像管存在的以上弊端,人们正在尝试着寻找解决问题的其他途径.其中,利用“光阴极/倍增器一体化组件”技术不失为一种值得探讨的新途径.这种半导体电子雪崩倍增原理和技术已成功应用于雪崩光电二极管(APD)^[5]和电子雪崩倍增 CCD(EMCCD)中,但至今尚未见到应用这一新技术的相关器件的结构设计、工艺考核和性能测试等详细报道,只是在上世纪 70~80 年代开始,国外有人提出“大面阵固体电子倍增器”的概念,并发表了相关的专利^[6],但目前,尚未有研制成果发布和产品问世.

本文通过探讨电子倍增型 GaAs 光阴极组件设计的理论依据、工艺试验、性能测试等内容,为电子倍增型 GaAs 光阴极微光像增强器的研制与制备提供技术基础.

2 理论依据

2.1 分离式 GaAs 光阴极/MCP 像增强器技术特点及其局限性

分离式 GaAs 光阴极^[7,8]和 MCP 做成的第三代微光像增强器的基本结构和工作原理如图 1 所示,输入景物的光图像经 GaAs 光阴极外光电转换为光电子图像,后经 MCP 电子倍增并在阳极高压电场作用下轰击荧光屏,电致发光转变为亮度得到上万倍增强的可见光图像^[9-11].

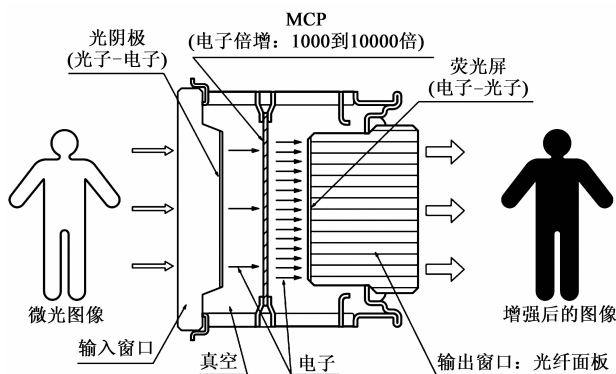


图1 三代微光像增强器基本原理和结构示意图

第三代微光像增强器是当今最先进的微光成像器件,但在实践中尚存在引言中所提到的三大缺陷有待改进:

(1) 提高器件极限分辨率的制约因素

MCP 单丝直径及像管前近贴距离不够小,限制了器件分辨率的进一步提高.理论分析表明^[12],如果令像管为一线性不变系统,则其系统总的 MTF 和分辨率可用其五级图像传递环节的 MTF 及分辨率表示,即

$$M_{\text{总}}(N) = M_{\text{光阴极}}(N) \cdot M_{\text{前近贴}}(N) \cdot M_{\text{MCP}}(N) \cdot M_{\text{后近贴}}(N) \cdot M_{\text{荧光屏}}(N) \quad (1)$$

$$R_{\text{总}}^{-2} = R_{\text{光阴极}}^{-2} + R_{\text{前近贴}}^{-2} + R_{\text{MCP}}^{-2} + R_{\text{后近贴}}^{-2} + R_{\text{荧光屏}}^{-2} \quad (2)$$

实践证明,其中影响器件 MTF 及分辨率权重最大的是 MCP 单丝直径($p, \mu\text{m}$)和前近贴距离(d, mm)及其工作电压为 $V_{\text{前}}$ (V),根据双近贴像管电子光学理论^[12],可将它们的分辨率(lp/mm)分别表示为:

$$R_{\text{MCP}} = \frac{1000}{1.72p} \quad (3)$$

$$R_{\text{前近贴}} = 0.49 \frac{\sqrt{0.49(V_{\text{前}})}}{d_{\text{前}}} \quad (4)$$

很显然,减小 MCP 单丝直径(p)和缩短前近贴距离(d),可以使器件的分辨率得到成倍的提高;但是,相对目前的工艺水平,要使 $p \leq 4\mu\text{m}$, $d \leq 0.1\text{mm}$ 受到工艺条件的严格限制,在分立部件中实现起来是非常困难的,目前的分立部件分辨率在 $60lp/\text{mm}$ 以内,理论与实际比较相符.将阴极与倍增器集成在一个部件中,其中的前近贴距离 d 可以减小到 μm 量级,即消除因前近贴距对像管分辨率的影响.

(2) MCP 芯料-皮料间蜂窝式结构对器件性能的不良影响

有效直径为 $\Phi 25\text{mm}$ 的 MCP 由上百万根微通道组成,通道与通道之间必须用皮料隔开,因此,目前 MCP 的开口面积比 $\leq 70\%$,因此至少有 30% 的输入信号损失;而且不仅如此,这些皮料区域对输入电子有弹性反射作用,导致器件在强光输入情况下“光晕”现象的发生,严重恶化了图像对比度,如图 2 所示.

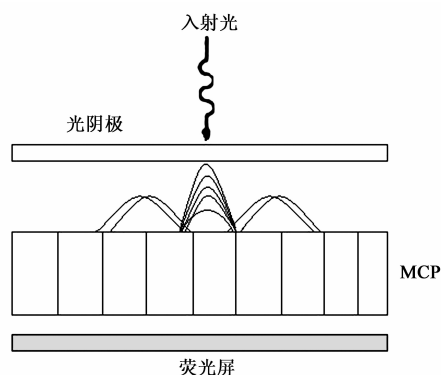


图2 强光输入条件下像管“光晕”现象的形成及其对 MTF 分辨率的影响

(3) MCP 输出端诱生的气体电离及正离子反馈对器件寿命的影响

深埋于 MCP 体材料中的残余气体很难完全除尽,在工作状态下,其输出端由于电压高,电流大,使这些残余气体部分被赶出、并被电离,正离子反馈至光阴极,破坏了阴极表面 Cs-O 层结构,导致器件寿命缩短,为此,不得不在其输入端涂覆防离子反馈膜,结果不仅损失了部分信号,而且进一步增加了器件的噪声.

正是由于以上弊端,人们从未停止“另辟捷径”的努力,不断改进工艺或技术创新.其中,利用“GaAs 光阴极/倍增器一体化组件”的方案,不失为一种值得探讨的新途径.

2.2 GaAs 雪崩电子倍增器工作原理及其特征参数

雪崩式光电二极管(Avalanche Photodiode APD)的能带结构及其工作原理如图 3 所示.按照图 3(c)的光子吸收规律,进入 P-I-N 耗尽层的光子将满带中的电子激发到导带,产生电子-空穴对,它们在外界反偏压电场的驱使下,在 I 区分别向右和向左运动图 3(b)如果反向偏压加得足够高,而未达到使结击穿电压时,它们将获得足够的能量去轰击材料,产生新一代的电子和空穴.这样经过多次雪崩过程,可以使输入载流子流得到一定程度的倍增和放大.这种固体电子倍增器的特征参数有:电子增益、暗电流(噪声)以及反映其综合性能的 $V-I$ 特性曲线等.

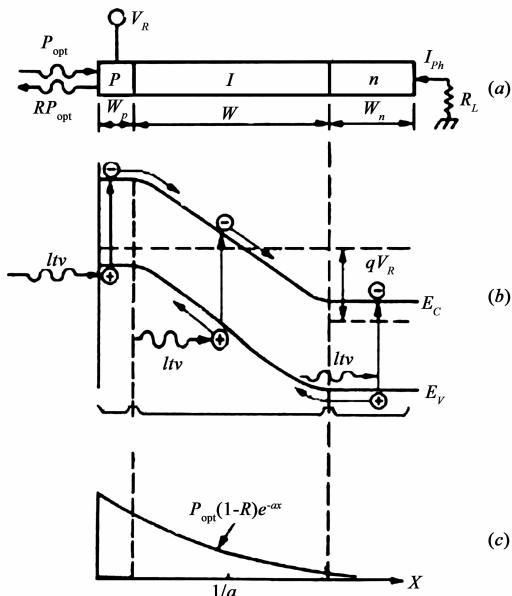


图3 GaAs雪崩光电二极管原理及结构示意图

2.3 电子倍增器型 GaAs 光阴极像探测器技术特点

基于以上光阴极和雪崩电子倍增器机理,可以设计出一个光阴极雪崩电子倍增器集成在一起的一体化探测器,其光阴极组件结构特点是选用晶格常数与 GaAs 比较匹配的多层 GaAs/GaAlAs 异质结结构,构成“光电转换层”-“电子雪崩倍增层”-“GaAs 激活层”一体化组件,与阳极管壳一起组成一体化微光探测器,如图 4 示.其中, PIN 电子倍增器由多周期 P 型 GaAs-本征 GaAs-N 型 GaAs 组成,外加偏压施加在透明导电膜与 GaAs 激活层上,透明导电膜为磁控溅射 ITO 膜,将镀有 ITO 膜的含有 PIN 电子倍增器的 GaAs 光阴极材料粘接在玻璃窗口上,用化学掩膜腐蚀法腐蚀掉周围的 GaAs/

GaAlAs,露出一圈环状 ITO 膜,再用磁控溅射法在 ITO 膜的圆环上镀制一层 Cr-Ni 电极,作为倍增器的阴极,在 GaAs 激活层上镀一层 Cr-Ni 电极作为倍增器的阳极如图 5(b)所示,由于 GaAlAs 窗口层、GaAs 光电转换层及 GaAs 激活层均为 P 型重掺杂,电导率大,因此外加偏压几乎全部落在 PIN 电子倍增器上,多级 PIN 电子倍增器相当于多个 PIN 二极管串联,可以认为外加电压平均分配到各个二极管上,实际施加的电压降全部落在 PIN 二极管的 I 层上,当外加偏压增加到一定值时,进入到倍增器的电子将会发生雪崩倍增.经过倍增后的光电子流最后从 GaAs 光阴极激活层表面逸入真空,被阳极收集,构成为电子倍增型 GaAs 光阴极探测器.

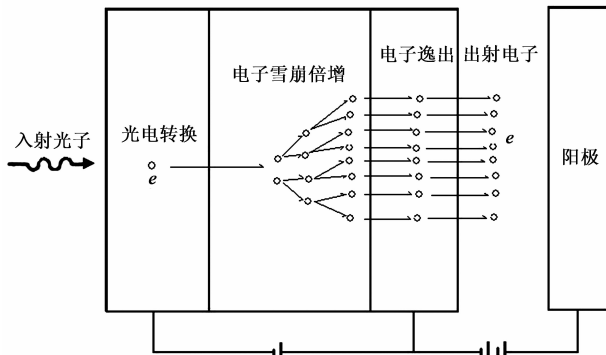


图4 电子倍增型GaAs光阴极探测器工作原理图

3 实验设计

3.1 光阴极组件结构

提供实验研究的电子倍增型 GaAs 光阴极组件的结构如图 5 所示,为了比较,图中还给出了当今比较成熟的 GaAs 光阴极组件的结构示意图.

借助现有比较成熟的微光像增强器研制设备和工艺,制备出了若干电子倍增型 GaAs 光阴极组件和探测器器件,其主要工艺包括:

- (1) 组件半导体材料的设计、MOCVD 生长和检验.
- (2) 组件材料/ Si_3N_4 及透明导电膜的镀制.
- (3) 组件材料/ Si_3N_4 /窗玻璃的真空热压粘接.
- (4) 组件所需的化学选择性腐蚀及表面净化.
- (5) 超高真空腔室(UHV)内光阴极组件的表面原子级洁净热清洗.
- (6) UHV 内一体化组件表面进行 Cs-O 激活,以形成负电子亲和势(NEA)光阴极表面态.
- (7) 在 UHV 中,经检验合格的光阴极组件传递到压封室,与陶瓷可伐管体(含阳极收集极)冷钎封成探测器,供测试分析.

3.2 材料结构

本实验研究所采用的是由 MOCVD 法生长的电子

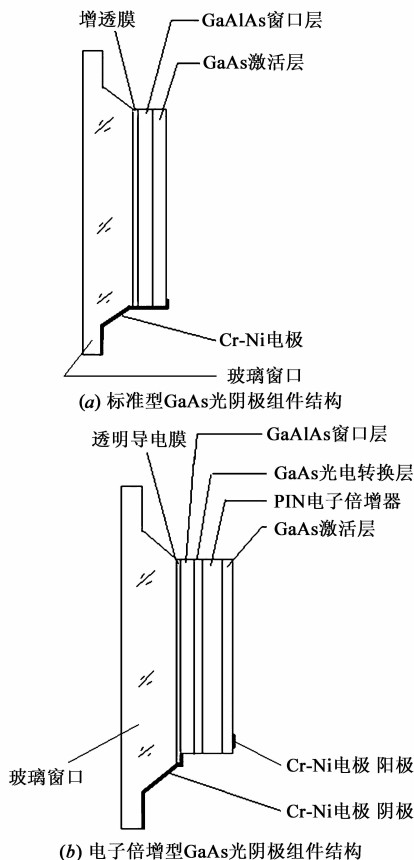


图5 标准型GaAs光阴极组件与电子倍增型GaAs光阴极组件结构示意图

倍增型 GaAs 光阴极材料,结构参数如表 1 所示.在进行外延层结构设计时,做了如下优化折中处理:

(1)该光阴极材料由 GaAs/GaAlAs III-V 簇半导体多层薄膜组成,共有 10 层,即“衬底层/缓冲层/腐蚀阻挡层/发射层/空穴阻挡层/电子雪崩层/光子吸收层/窗口层/保护层”.

(2)表 1 中第 4 到第 7 层为电子倍增结构,其中第 4 层为空穴阻挡层,它被用来阻止第 3 层 P 型 GaAs 中的空穴进入倍增器,以尽量减小暗电流得到雪崩倍增;光子透过第 9 层进入第 8 层,将 GaAs 价带电子激发倒带,受激电子在电场作用下,进入倍增器内,在倍增器内雪崩倍增,倍增后的电子进入第 3 层,经 Cs-O 表面激活,在负电子亲和势(NEA)作用下从表面逸出,在电场作用下向阳极运动.

(3)电子倍增型 GaAs 光阴极材料是基于成熟的 GaAlAs/GaAs 光阴极材料结构的基础,插入多层 P-I-N GaAs 电子雪崩倍增层设计而成,其中电子倍增层与光阴极激活层之间还存在若干结构上兼容、性能上匹配等问题,尚待摸索解决.

图 6 为光阴极倍增器一体化材料平衡能带结构图,从图 6 左起的 P 型 GaAlAs 为阴极的窗口层,紧邻的 P

型 GaAs 为光吸收层,倍增区为多周期 P-I-N 结构,N 型 GaAs 为倍增器平面提供均匀电场,N 型 GaAlAs 阻挡最右侧重掺杂 P 型 GaAs 激活层的空穴进入倍增区,减小暗电流.

表 1 电子倍增型 GaAs 光阴极材料结构

序号	名称	掺杂浓度 (cm ⁻³)	厚度 (nm)
0	GaAs	≥ 1 × 10 ¹⁸	-
1	GaAs	-	500
2	P ⁺ -Al _{0.6} Ga _{0.4} As	5 × 10 ¹⁸	1000
3	P ⁺ -GaAs	1 × 10 ¹⁹	300
4	Al _{0.6} Ga _{0.4} As	-	100
5	N ⁺ -GaAs Layer	3 × 10 ¹⁸	200
6-1	i-GaAs	-	10
6-2	N ⁺ -GaAs	3 × 10 ¹⁸	6
6-3	i-GaAs	-	8
6-4	P ⁺ -GaAs	5 × 10 ¹⁸	6
6-5	i-Al _{0.6} Ga _{0.4} As	-	30
7	GaAs	-	200
8	P ⁺ -GaAs	5 × 10 ¹⁸	400
9	P ⁺ -Al _{0.6} Ga _{0.4} As	5 × 10 ¹⁸	500
10	P ⁺ -GaAs	1 × 10 ¹⁹	-

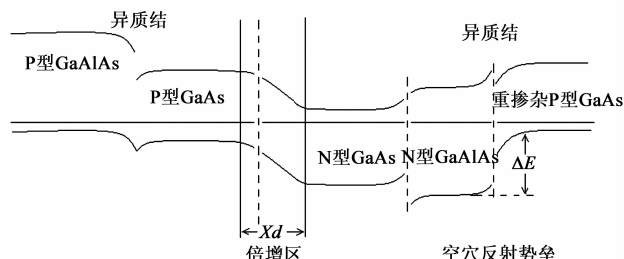


图6 一体化阴极/倍增器半导体材料平衡能带结构图

3.3 测试系统

本实验研究所采用的测试系统如图 7 所示.其中,光源为色温 2856K 的白炽灯,经干涉滤光片分光、光导纤维传输,照射到被测组件上;经标定,其输入辐照度光谱分布为:

波长 (nm)	550	600	650	700	750	800	880
照度 (10 ⁻⁶ W/cm ²)	4.37	5.75	6.85	7.34	7.09	6.74	6.59

电子增益 M 估算公式:

$$M = \frac{\text{有倍增时光电流与暗电流的差}}{\text{无倍增时光电流与暗电流的差}} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \quad (5)$$

测试项目:在反偏压条件下,电子倍增型 GaAs 光阴极组件的 I-V 特性,包括暗电流、光电流、电子增益,以及烘烤温度影响等.

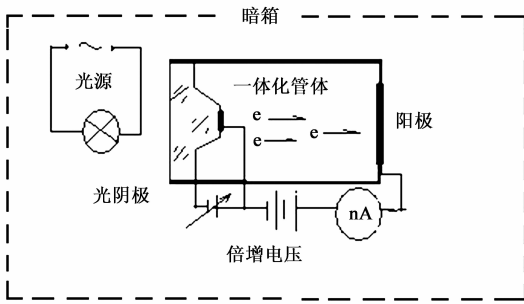


图7 电子倍增型GaAs光阴极组件测试系统示意图

3.4 测试过程

将图 5(b)的电子倍增型光阴极组件送入超高真空激活台中进行 Cs-O 激活后封装在带有阳极的陶瓷金属管壳中,将真空封装后的阴极倍增器一体化样管按图 7 所示连接,在暗箱里进行测试,阳极电压 100V 恒定,在光源关闭情况下,倍增电压从 0V 开始,每次增加 0.5V,记录阳极电流,绘制无光照时的倍增电压与阳极电流曲线,即为如图 8 所示的暗电流曲线;同样在光照条件下测试一组光电流曲线,如图 8 所示的光电流曲线。

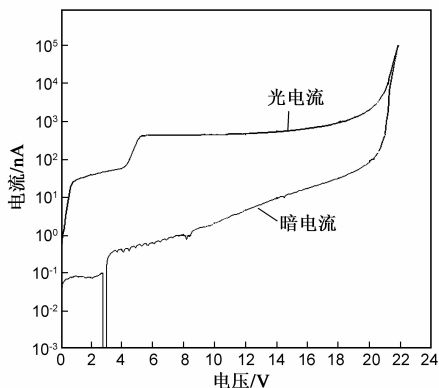
4 测试结果

4.1 $I-V$ 特性测试

被测组件为 $\Phi 3\text{mm}$ 电子倍增型 GaAs 光阴极组件,有光照及无光照条件下 $I-V$ 特性测试结果如图 8 所示,注意到,反向偏压从 12V 开始产生增益,一直到 21.25V 时,暗电流迅速增大,信噪比明显下降。据此,可以推算出含电子倍增器的光阴极组件有效电子倍增电压为 20.5 ~ 21V,相应电子增益为 10 ~ 25 倍。

4.2 一体化组件耐烘烤温度的考核

为了制作光阴极/倍增器一体化微光管,电子倍增型 GaAs 光阴极组件必须经受真空镀膜、热压粘接、化学腐蚀、真空原子洁净等处理。因此,我们对 10Y-24 #、10Y-25 # 两只 ($\Phi 3\text{mm}$) 和 10Y-26 # 等样品进行了高温处理后的 $I-V$ 特性对比测试,结果表明,目前工艺流程下制备的电子倍增型 GaAs 光阴极组件,可以承受

图8 电子倍增型GaAs光阴极组件 $I-V$ 特性图

580℃、两小时的烘烤后,仍能达到一定的光电转换与电子倍增特性。

4.3 综合测试结果:

- (1)反向偏压: 20 ~ 21V.
- (2)电子增益: 12.6.
- (3)探测灵敏度(880nm): $\geq 3.87\text{mA/w}$.
- (4)暗电流密度: $\leq 6.79 \times 10^{-5}\text{mA/cm}^2$.

5 结论与展望

通过本课题的研究,研制出了电子倍增型 GaAs 光阴极组件,经测试其电子增益达到了 12.6 倍,880nm 处探测灵敏度 $\geq 3.87\text{mA/w}$;暗电流密度 $\leq 6.79 \times 10^{-5}\text{mA/cm}^2$.验证了利用雪崩倍增效应使 GaAs 光电阴极产生光生电子倍增的原理是可行的。

由于 GaAs 材料外延生长工艺及原材料纯度的限制,以及在组件制作工艺过程中需经过多次高温过程,导致 GaAs 雪崩倍增一体化材料原有的缺陷密度偏多且伴随高温过程逐渐增多,最终将导致倍增电压随之降低,电子增益减小。此外,倍增器中的缺陷在强电场中易被击穿,将导致整个倍增器失效,因此电子倍增型 GaAs 光阴极尺寸难以做大。可以预见,随着 GaAs 材料制备工艺技术的进步以及材料缺陷密度的降低,有望进一步提高电子倍增型 GaAs 光阴极组件的尺寸和电子增益,去除三代微光像增强器的 MCP 电子倍增器,以简化三代微光像增强器结构、减轻器件重量并极大地提高器件的性能。

参考文献

- [1] 向世明,倪国强.光电子成像器件原理[M].北京:国防工业出版社,1999.
Xiang Shiming, Ni Guoqiang. The Principle of Photoelectronic Imaging Devices[M]. Beijing: National Defence Industry Publication Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 端木庆铎,李野,等.硅微通道板电子倍增器[J].电子学报,2001,29(12):1680-1682.
Duanmu Qingduo, Li Ye, et al. Electron multiplier of Si microchannel plate[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12): 1680-1682. (in Chinese)
- [3] 周立伟.目标探测与识别[M].北京:北京理工大学出版社,2002.
Zhou Liwei. Target Detection and Recognition[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Publication Press, 2002. (in Chinese)
- [4] S M Sze.半导体器件物理[M].耿莉,译.西安:西安交通大学出版社,2006.
S M Sze. Physics of Semiconductor of Devices[M]. Geng Li translate. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Publication Press,

2006. (in Chinese)
- [5] W T Tsang. 半导体材料生长技术[M]. 江剑平, 译. 北京: 清华大学出版社, 1993.
W T Tsang. Growth Technology of Semiconductor[M]. Jiang Jianping, translate. Beijing: Peking Publication Press, 1993. (in Chinese)
- [6] Thomas. Image intensifier tube having A solid state electron amplifier[P]. US Patent: 5349177.
- [7] 李晓峰. 第三代像增强器研究[D]. 西安: 西安光机所, 2001.
Li Xiaofeng. Study on the third generation image intensifier [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 2001. (in Chinese)
- [8] 郭里辉, 侯洵, 等. 透射式 GaAs 光电阴极响应时间的理论分析[J]. 电子学报, 1989, 17(5): 118 - 21.
Guo Lihui, Hou Xun et al. Theory analysis of respond time of transmission mode GaAs photocathode [J]. Acta Electronica Sinica, 1989, 17(5): 118 - 121. (in Chinese)
- [9] G A Antypas, J S Escher, J Edgecumbe et al. Broadband GaAs transmission photocathode [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(7): 4301 - 4301.
- [10] M Ettenberg, G H Olsen, C J Nuese. Effect of gas-phase stoichiometry on the minority-carrier diffusion length in vapor-grown GaAs[J]. Applied Physics Letters, 1976, 29(3): 141 - 142.
- [11] H K Pollehn. Performance and Reliability of Third-Generation Image Intensifiers[J]. Advances in Elaelectronics and Electron Physics, 1995, 64A: 63 - 69.

- [12] Csorba I P. Image Turbes [M]. USA, International Standard Book, 1985, 118 - 119.

作者简介



胡仓陆 男, 1961 年出生, 陕西长安县人, 研究员, 长期从事光阴极材料、光阴极组件理论研究和工艺研究.

E-mail: hcl205@126.com



郭 晖 女, 1965 年出生, 河北大名县人, 研究员, 长期从事微光夜视器件理论研究和新型微光夜视器件的研制工作.

E-mail: 18992105211@163.com



焦岗成(通信作者) 男, 1980 年出生陕西宝鸡人, 在读博士, 工程师, 主要从事 III-V 族化合物光阴极材料外延生长研究.

E-mail: jiaogc613@126.com