

〈微光技术〉

透射式 GaAs 光电阴极荧光光谱特性研究

李晓峰^{1,2}, 石 峰¹, 冯 刘²

(1.微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2.北方夜视技术股份有限公司, 云南 昆明 650114)

摘要: 测量了透射式 GaAs 光电阴极四层、二层结构组件和三代像增强器光电阴极的荧光光谱。激发光的波长分别为 514.5 nm 和 785 nm。测量结果表明, GaAs 外延层荧光光谱的峰值波长较 GaAs 衬底荧光峰值波长长。当 GaAs 阴极四层结构组件变为二层结构组件时, GaAs 发射层的荧光光谱峰值波长向长波方向移动。将 GaAs 阴极二层结构组件减薄激活之后, GaAs 阴极发射层的荧光光谱峰值波长向短波方向移动。三代像增强器 GaAs 阴极组件在制作过程中荧光光谱峰值波长变化的原因主要是 GaAs 发射层内部晶格存在应变, 因此当四层 GaAs 阴极组件变为二层 GaAs 阴极组件之后, 由于 GaAs 发射层内部晶格应变状态的变化, 致使荧光光谱的峰值波长向长波方向移动。当二层 GaAs 阴极组件经过减薄、热清洗和激活之后, 由于 GaAs 发射层内部应力的释放, 应变在一定程度上得到消除, 因此 GaAs 发射层的荧光光谱峰值波长又向短波方向移动。通常情况下, GaAs 材料的荧光光谱是一条高斯型的曲线, 但对三代管 GaAs 阴极组件而言, 当 GaAs 发射层中存在不均匀的晶格应变时, 其荧光光谱曲线在峰值附近会出现不规则的形状, 而当不均匀的晶格应变消除后, 荧光光谱曲线会恢复到正常的形状。所以 GaAs 发射层中存在的应变会通过荧光光谱反映出来, 这样在 GaAs 光电阴极的制作过程中, 除了通过测量积分光荧光来评价 GaAs 光电阴极的制作过程之外, 还可以通过测量 GaAs 光电阴极荧光光谱的峰值波长变化来监控 GaAs 光电阴极的制作过程。

关键词: 像增强器; GaAs 光电阴极; 荧光光谱; 晶格应变; 应力

中图分类号: O462.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)06-0319-06

Study on Fluorescence of Transparent GaAs Cathode

LI Xiao-feng^{1,2}, SHI Feng², FENG Liu²

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

2.North Night Vision Technology Group Co., Ltd., Kunming 650114, China)

Abstract: The fluorescence spectra of transparent GaAs photocathode of four layer, two layer structure assembly and the third generation image intensifier are measured. The wavelengths of the exciting light are respectively 514.5 nm and 785 nm. The measurement results show that the peak wavelength of fluorescence spectrum of the GaAs epitaxial layer is longer than that of GaAs substrate fluorescence. When the cathode of GaAs four-layer structure assembly were made into two-layer structure assembly, peak wavelength of fluorescence of GaAs emission layer shifts toward the long wavelength. After the GaAs cathode of two-layer structure assembly was thinner and activated by Cs-O, the peak wavelength of fluorescence of GaAs cathode emissive layer shifted to short wavelength direction. While the third generation image intensifier GaAs cathode assembly is in the production process, the major cause of its peak wavelength variation of fluorescence spectrum is the internal lattice strain of GaAs emission layer, so when the four layers of the GaAs photocathode was made into two layers, due to changes in GaAs emission layer internal lattice strain state, the peak wavelength of fluorescence spectra is moved to long wavelength direction. After thinning, heat cleaning and activation to the two layers of the GaAs emission layer, due to internal stress release, strain

收稿日期: 2013-01-16; 修订日期: 2013-03-18.

作者简介: 李晓峰 (1963-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为真空光电器件。E-mail: lxf@nvt.com.cn.

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金, 编号: J2011016.

can be eliminated to a certain extent, so the peak wavelength of GaAs fluorescence emission layer is shifted to short wavelength direction. Typically, the fluorescent spectrum of GaAs material is a Gauss curve, but the GaAs cathode assembly of the third generation image intensifier, when in the presence of no uniform lattice strain of GaAs emission layer, the fluorescence spectrum curves in the peak will occur near the irregular shape, and when the lattice strain in homogeneity is eliminated, fluorescence spectral curve will be restored to the normal shape. The strain of the GaAs emissive layer will be reflected by fluorescence spectrum, so in the process of making GaAs photocathode, in addition to measuring the integrated fluorescence of GaAs photocathode, the peak wavelength change of GaAs fluorescent spectrum can also be measured in order to monitor GaAs photocathode process.

Key words: image intensifier, GaAs photocathode, fluorescence spectrum, lattice strain, stress

0 引言

微光像增强器是微光夜视仪的核心,其作用是放大微弱光信号,使亮度达到人眼所能识别的要求。目前最先进的微光像增强器为三代像增强器。三代像增强器采用透射式 GaAs 负电子亲和势光电阴极,因此阴极灵敏度较高,可以达到 $2000\mu\text{A}/\text{lm}$ 以上,同时信噪比可以达到 28 以上,所以应用越来越广泛^[1]。三代像增强器 GaAs 光电阴极一般采用倒置法工艺制作。首先在 GaAs 衬底上外延一层 GaAlAs 腐蚀阻挡层,之后在 GaAlAs 腐蚀阻挡层上再生长 GaAs 发射层,在 GaAs 发射层之上再生长 GaAlAs 缓冲层,在 GaAlAs 缓冲层之上再生长 GaAs 保护层。制作 GaAs 光电阴极组件前,先将 GaAs 保护层去除,在 GaAlAs 缓冲层上蒸镀 Si_3N_4 减反膜,利用热粘接的方法将 Si_3N_4 减反膜连同衬底一道粘接在玻璃窗上,然后通过选择性腐蚀分别去除 GaAs 衬底、GaAlAs 腐蚀阻挡层,使 GaAs 发射层暴露空气中并减薄到一定的厚度之后,再给 GaAs 阴极组件制备上电极,最后将 GaAs 阴极组件送入真空室进行激活,使其表面为负电子亲和势,这样完整的三代像增强器透射式 GaAs 光电阴极就制作完成了。透射式 GaAs 光电阴极灵敏度的高低除与 GaAs 阴极材料的特性有关之外,还与 GaAs 阴极组件的制作过程,如热粘接、减薄和激活等过程有关。要进一步优化工艺,提高阴极的灵敏度,就要对 GaAs 阴极组件制作过程中的每一个过程进行研究,其中主要是围绕影响电子跃迁几率、扩散长度以及寿命长短等参数的过程进行研究。对于电子跃迁几率的研究,可以采用荧光测量的方法。郭晖^[2]利用积分荧光测试研究了透射式 GaAs 光电阴极的制作过程。郭晖利用 $0.67\mu\text{m}$ 波长的激光对 GaAs 光电阴极进行激发,并通过旋转式逐点扫描得到整个 GaAs 样品片上的荧光强度分布。这样通过对 GaAs 光电阴极在选择性腐蚀、热粘接等过程中荧光强度的变化就可以

判断出工艺的正确性,从而为改进工艺提供理论指导。然而从原理上讲,荧光实际上是包括了荧光的强度和荧光的波长两个因素,在 GaAs 光电阴极的选择性腐蚀、热粘接等过程中,不仅荧光的强度会发生变化,荧光的波长也会发生变化,因此研究 GaAs 光电阴极在热粘接、选择性腐蚀、激活等过程中的荧光变化,不仅要研究荧光强度的变化,而且还要研究荧光波长的变化^[3-6]。因为荧光的强度与跃迁电子的数量相关,而荧光的波长又与跃迁电子所处的能级有关,所以在 GaAs 光电阴极的制造过程中,在测量荧光强度变化的基础上再进一步测量荧光波长的变化,对进一步了解 GaAs 光电阴极的光电发射机理^[7-14],优化制造工艺,提高阴极的灵敏度具有积极促进作用。

1 四层 GaAs 阴极组件测试结果分析

四层 GaAs 阴极组件为经过热粘接的 $\phi 18\text{ mm}$ 三代像增强器阴极组件,其结构如图 1 所示。该样品是一个完整的透射式 GaAs 阴极组件,包括了玻璃窗、 Si_3N_4 减反膜、GaAlAs 缓冲层、GaAs 发射层、GaAlAs 腐蚀阻挡层以及 GaAs 衬底。

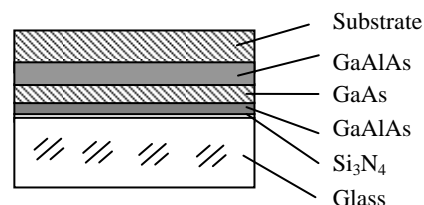


图1 GaAs 阴极组件示意图

Fig.1 Illustration of GaAs cathode

对该样品测量时,分别从衬底端和玻璃端进行测量。测量仪器采用显微拉曼光谱仪,激发光为激光,波长分别为 514.5 nm 和 785 nm 。图 2 为 J01-1 样品在 514.5 nm 波长激光激发条件下从玻璃端中心位置和衬底端中心位置测得的荧光谱,对玻璃端进行测量时,所用激光的入射功率为 0.5 mW ,而对衬底端进行测

量时,所用激光的入射功率为5 mW。图中的曲线G表示从玻璃端测得的荧光谱,而曲线S则表示从衬底端测得的荧光谱。由于激发光从玻璃一端入射时,激发光先经过AlGaAs缓冲层和GaAs发射层,因此所测量的荧光谱主要是AlGaAs缓冲层和GaAs发射层的荧光谱,而当激发光从衬底一端入射时,激发光先经过GaAs衬底和AlGaAs腐蚀阻挡层,因此所测量的荧光谱主要是GaAs衬底和AlGaAs腐蚀阻挡层的荧光谱。

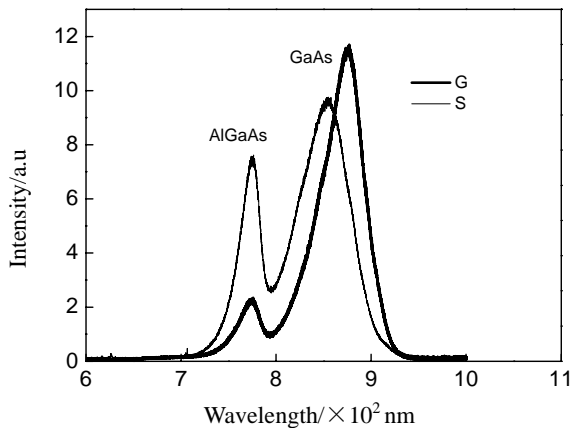


图2 514.5 nm 波长激发荧光谱

Fig.2 Fluorescent spectrum excited by 514.5 nm

从图2中看出,四层结构GaAs光电阴极组件的荧光谱无论是从玻璃端测试还是从衬底端测试,均有2个荧光峰,一个长波峰和一个短波峰。因为四层结构GaAs光电阴极组件包括1层GaAs衬底、1层Si₃N₄减反膜、二层GaAs外延层和二层AlGaAs外延层。因此所测量的荧光谱中只可能包含Si₃N₄、AlGaAs和GaAs三种材料的荧光谱,由于Si₃N₄材料的禁带宽度为5.4 eV,而激发光的光子能量仅为2.4 eV,不可能激发Si₃N₄发光,因此荧光谱中的2个荧光峰只可能是GaAs和AlGaAs的荧光峰。AlGaAs与GaAs相比较,AlGaAs的禁带宽度更宽,因此荧光谱中的短波峰应该是AlGaAs材料的荧光峰,长波峰是GaAs材料的荧光峰。2条荧光谱相比较,玻璃端测得的GaAs发射层的荧光强度高于衬底端测得的GaAs衬底的荧光强度。玻璃端测得的GaAs荧光谱的峰值荧光强度为11567,而衬底端测得的GaAs荧光谱的峰值荧光强度仅为852,再考虑到从玻璃一端测量时,激发光的功率仅为0.5 mW,而从衬底一端测量时,激发光的功率为5 mW,相差1个数量级。因为入射光越强,荧光强度越强,因此说明从玻璃端所测得的GaAs荧光谱的强度远远高于从衬底一端所测得的GaAs荧光谱的强度。从衬底一端所测得的GaAs荧光强度较低的原因是衬底表面未抛光,表面较粗糙,对入射光的

散射大,再加上衬底一端没有减反膜,对入射光的反射较大,光能的利用率低。尽管从衬底一端测得的GaAs的荧光强度较弱,但其荧光谱的峰值波长较短,为852 nm,而从玻璃端测得的荧光谱的峰值波长较长,为873 nm。波长短,意味着跃迁电子所处的能级高,而波长长,意味着跃迁电子所处的能级低。

从图2看出,AlGaAs的荧光谱与GaAs荧光谱的情况相反。从玻璃端所测得的AlGaAs荧光谱较从衬底端所测得的荧光谱弱,而峰值波长也区别不大。玻璃端测得荧光谱的峰值强度为2279,峰值波长为772 nm,而衬底端测得荧光谱的峰值强度为7465,峰值波长为773 nm。玻璃端测得荧光强度较低,原因是从玻璃端测量时,主要是测量AlGaAs缓冲层的荧光谱,而从衬底端测量时,主要是测量AlGaAs腐蚀阻挡层的荧光谱。因为腐蚀阻挡层较厚,缓冲层较薄,而较厚的腐蚀阻挡层能吸收更多的光子,从而能够发出更强的荧光,因此从衬底一端测量时,尽管激发光的利用率较低,但荧光的强度还是超过从玻璃端测得的荧光强度。但对AlGaAs而言,无论是衬底端还是玻璃端,所测量的AlGaAs均为外延层,其结构基本相同,因此其荧光谱的峰值波长也基本相同。

图3为J01-1样品785 nm波长激光激发条件下玻璃端中心位置和衬底端中心位置的荧光谱,测量时对玻璃端所用激光的入射功率为0.03 μW,对衬底端所用激光的入射功率为0.15 mW。图中的曲线G表示从玻璃端测量得到荧光谱,而曲线S则表示从衬底端测得的荧光谱。

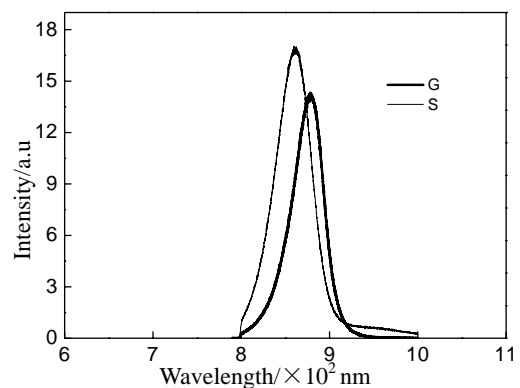


图3 785 nm 波长激发荧光谱

Fig.3 Fluorescent spectrum excited by 785 nm

从图3中看出,由于785 nm激光波长的光子能量为1.58 eV,低于AlGaAs的禁带宽度,因此不可能激发AlGaAs发光,所以785 nm激光波长所激发的荧光谱中不可能出现AlGaAs材料的荧光谱,因此图3中的2条曲线分别表示从玻璃端和衬底端测量得到的GaAs发射层和GaAs衬底的荧光谱。两条荧光谱相比

较，衬底端的荧光强度为 17037，而玻璃端的荧光强度为 14104，表面上看衬底端的荧光强度高于玻璃端的荧光强度，但考虑到两者激发功率不一样，两者相差近 4 个数量级，因此扣除激发功率的影响，实际上是玻璃端所获得的荧光强度更强，这与 514.5 nm 荧光谱得出的结论相同，即玻璃端 GaAs 外延层的荧光强度更强。玻璃端所获得 GaAs 荧光谱的峰值波长为 876 nm，而衬底端所获得 GaAs 荧光谱的峰值波长为 859 nm，与 514.5 nm 荧光谱测得的结论相同，即衬底的荧光谱峰值波长更短。

为使测量的数据更具有代表性，除测量了 J01-1 样品之外，还测量了 J69-2 样品。在测量时，除测量每一个样品玻璃端和衬底端的中心位置之外，还分别测量了 $\phi 10$ mm 圆周上相互间隔 90° 的 4 个点的位置，所得出的结论与中心位置相同。表 1 为 J01-1 样品和 J69-2 样品 514.5 nm 波长激光激发条件下的荧光谱测试数据，表中的测量数据为样品表面 5 个位置上所测量数据的平均值，表中的 λ 为荧光谱的峰值波长， I 为荧光谱的峰值强度，GaAs(G) 表示从玻璃端测得的数据，而 GaAs(S) 则表示从衬底端测得的数据。

表 1 GaAs 外延层和衬底的测量数据

Table 1 Florescence spectrum of GaAs epitaxy and substrate

Sample	GaAs (G)		GaAs (S)	
	λ	I	λ	I
J01-1	874	10896	850	8563
J69-2	870	8258	856	9686

2 二层 GaAs 阴极组件测试结果分析

在 J01-1 样品测试完成之后，通过选择性腐蚀去除 GaAs 衬底和 GaAlAs 腐蚀阻挡层，得到一个二层结构的 GaAs 光电阴极组件，见图 4。再从二层结构 GaAs 阴极样品的衬底端和玻璃端进行荧光测试。

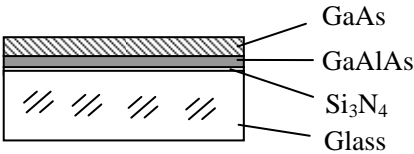


图 4 GaAs 阴极组件示意图

Fig.4 Illustration of GaAs cathode

图 5 为 J01-1 样品二层结构组件在 514.5 nm 波长激光激发条件下玻璃端中心位置和 GaAs 外延层中心位置测得的荧光谱，对玻璃端和 GaAs 发射层进行测量时，所用激光的入射功率均为 0.2 mW。图 5 中的曲线 G 表示从玻璃端测得的荧光谱，而曲线 S 则表示从 GaAs 发射层端面测得的荧光谱。由于二层结构 GaAs

阴极组件只有 1 层 GaAs 发射层和 1 层 AlGaAs 缓冲层，因此无论激发光从玻璃的一端入射还是从 GaAs 发射层的一端入射，所测量的荧光谱均为 AlGaAs 缓冲层和 GaAs 外延层的荧光谱。图中的曲线 G 为从玻璃端测得的荧光谱，而曲线 S 为从 GaAs 发射层端测得的荧光谱。

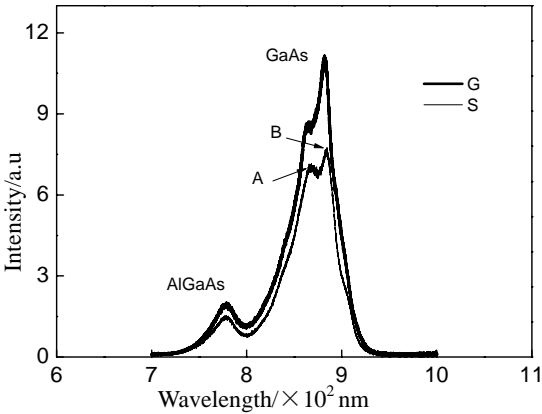


图 5 514.5 nm 波长激发荧光谱

Fig.5 Fluorescent spectrum excited by 514.5 nm

从图 5 中可以看出，从玻璃端测得的荧光谱，无论是 GaAs 的荧光强度还是 AlGaAs 的荧光强度，均高于从 GaAs 外延层所测得的荧光强度，原因是玻璃端存在 Si₃N₄ 减反膜，因此反射率低，激发光的利用率高，而 GaAs 外延层一端没有减反膜，因此反射率高，激发光的利用率低。如果仔细观察图 5 中的荧光谱，可以发现 GaAs 发射层的荧光谱曲线在峰值区域形状不规则，如对从发射层端面测得的 S 曲线而言，似乎存在 2 个荧光峰，一个为 A 峰，另一个为 B 峰。但 AlGaAs 荧光谱形状却很规则，峰值波长均为 772 nm，与四层结构 GaAs 阴极组件测得荧光谱峰值波长基本相同。

图 6 为 J01-1 样品二层结构组件在 785 nm 波长激光激发条件下玻璃端中心位置和衬底端中心位置的荧光谱，测量时，对玻璃端所用激光的入射功率为 0.03 μ W，而如果对衬底端，所用激光的入射功率为 0.2 mW。图中的曲线 G 表示从玻璃端测量得到荧光谱，而曲线 S 则表示从 GaAs 发射层端面测得的荧光谱。

从图 6 中可以看出，785 nm 波长激发的荧光谱仍然是从玻璃一端测量得到的荧光谱强度更强。从玻璃端测得的荧光谱的峰值波长为 880 nm，荧光峰值强度为 27912，而从 GaAs 发射层测得荧光谱峰值荧光强度仅仅为 8399。另外与图 5 的情况类似，荧光谱的形状较不规则。如果仔细观察曲线 S，似乎也存在 2 个荧光峰，一个 A 峰和一个 B 峰，如图 6 所示。

为使测量的数据更具有代表性，除测量了

J01-1GaAs 二层结构组件之外,还测量了 J69-2 GaAs 二层结构组件。在测量时,除测量每一个样品玻璃端面 and 衬底端面的中心位置之外,还分别测量了 $\phi 10\text{ mm}$ 圆周上相互间隔 90° 的 4 个点的位置,所得出的结论与中心位置相同。表 2 为 J01-1 样品和 J69-2 样品 514.5 nm 波长激光激发条件下的荧光谱测试数据,表中的测量数据为在样品表面 5 个位置上所测量 GaAs 外延层和 GaAs 衬底荧光谱的平均值,表中的 λ 为荧光谱的峰值波长, I 为荧光谱的峰值强度,GaAs(G)表示从玻璃端测得的 GaAs 发射层的荧光数据,GaAs(S)表示从 GaAs 发射层端测得的 GaAs 发射层的荧光数据。

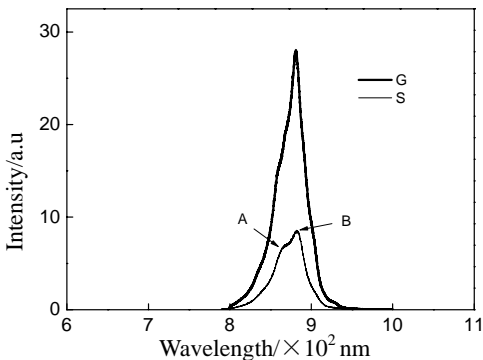


图 6 785 nm 波长激发荧光谱

Fig.6 Fluorescent spectrum excited by 785 nm

表 2 GaAs 发射层的测量数据

Table 2 Florescence spectrum of GaAs epitaxy

Sample	GaAs(G)		GaAs(S)	
	λ	I	λ	I
J01-1	880	10203	878	7725
J69-2	876	7808	877	6290

3 三代管 GaAs 阴极测试结果分析

图 7 是 267#三代像增强器在 514.5 nm 波长激光激发条件下从玻璃端测得的荧光谱,测量时激发光的功率为 0.2 mW 。

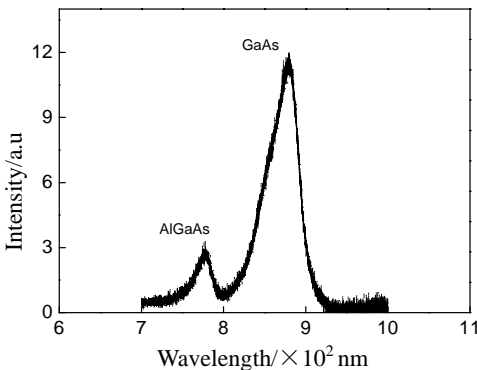


图 7 514.5 nm 波长激发荧光谱

Fig.7 Fluorescent spectrum excited by 514.5 nm

对比图 7 和图 5,即将图 7 中的荧光谱曲线与图 5 中的荧光谱曲线 G 作比较,可以发现三代像增强器 GaAs 阴极的荧光谱曲线与二层 GaAs 阴极组件相比,已不再出现类似图 5 中荧光曲线 G 在峰值附近形状不规则、出现两个荧光峰的现象,荧光曲线恢复到正常的形状。图 8 为 267#三代像增强器在 785 nm 波长激光激发条件下从玻璃端测得的荧光谱,测量时激发光的激发功率为 $0.03\text{ }\mu\text{W}$ 。将图 8 中的荧光谱曲线与图 6 中的荧光谱曲线 S 相比较,可以发现三代像增强器在 785 nm 波长激光激发条件下的荧光谱曲线也不再出现类似图 6 中荧光曲线 S 在荧光曲线的峰值附近形状不规则的现象。

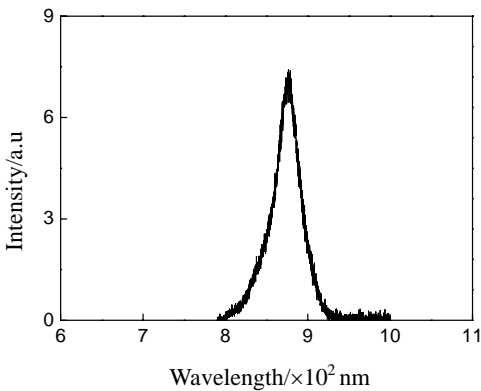


图 8 785 nm 波长激发荧光谱

Fig.8 Fluorescent spectrum excited by 785 nm

三代像增强器的阴极组件与二层结构的 GaAs 阴极组件相比,区别仅在于三代像增强器的 GaAs 发射层经过了适当的减薄,再有还经过高温热清洗和 Cs-O 表面激活。GaAs 发射层的减薄和表面 Cs-O 激活过程从原理上讲均不会对其荧光谱的形状产生影响,对荧光谱的形状产生影响的唯一因素只可能是高温的热清洗过程,因为这一过程相当于对 GaAs 发射层进行退火,使 GaAs 阴极中存在的应力得到释放。因为二层 GaAs 阴极组件是从四层 GaAs 阴极组件经过化学腐蚀的方法去除 GaAs 衬底和 AlGaAs 腐蚀阻挡层之后得到的,在去除 GaAs 衬底和 AlGaAs 腐蚀阻挡层之后,GaAs 发射层的一端暴露于空气,这一端原来与 AlGaAs 腐蚀阻挡层之间存在的热应力得到了释放,晶格的应变也得到消除,但 GaAs 发射层的另一端由于存在 AlGaAs 缓冲层,因此它们之间存在热应力,而热应力就会导致晶格应变。所以对二层 GaAs 阴极组件而言,暴露空气一端的 GaAs 发射层的晶格常数为 GaAs 的晶格常数,而与 AlGaAs 缓冲层相接触一端的晶格常数为应变 GaAs 的晶格常数。这样 GaAs 发射层的晶格常数在与 AlGaAs 缓冲层相接触一端最大,在与空气相接触的一端最小,而在两个表

面之间，GaAs 的晶格常数存在渐变。正是 GaAs 发射层中存在的晶格渐变，才使得二层 GaAs 阴极组件的 GaAs 荧光谱在荧光曲线的峰值附近出现不规则的形状。而对于 GaAs 阴极组件中的 AlGaAs 缓冲层，无论是在二层 GaAs 阴极结构组件中还是在四层 GaAs 阴极结构组件中，其上下端面所处的状态均不改变，因此二层 GaAs 阴极结构组件中的荧光谱与四层 GaAs 阴极结构组件中的荧光谱相比较，其形状基本不变，见图 5 和图 2。

为使测量的数据更具有代表性，除测量了 267# 三代像增强器之外，还测量了 153#三代像增强器。在测量时，除测量每一个样品玻璃端面和衬底端面的中心位置之外，还分别测量了 $\phi 10\text{ mm}$ 圆周上相互间隔 90° 的 4 个点的位置，所得出的结论与中心位置相同。表 3 为 267#三代像增强器和 153#三代像增强器在 514.5 nm 波长激光激发条件下的荧光谱测试数据，表中的测量数据为在样品表面 5 个位置上所测量 GaAs 发射层荧光谱数据的平均值，表中的 λ 为荧光谱的峰值波长， I 为荧光谱的峰值强度。

表 3 GaAs 发射层的测量数据
Table 3 Florescence spectrum of GaAs epitaxy

Sample	514.5 nm		785 nm	
	λ	I	λ	I
267	872	281	880	749
153	871	241	881	775

4 结论

1) 在 514.5 nm 波长激光的激发条件下，对于五层结构的 GaAs 阴极组件，GaAs 衬底的荧光峰值波长平均为 853 nm ，而 GaAs 发射层的荧光峰值波长平均为 872 nm 。但将五层结构去除 GaAs 衬底和 AlGaAs 腐蚀阻挡层形成二层结构 GaAs 阴极组件之后，GaAs 发射层荧光谱的峰值波长进一步向长波方向移动，峰值波长平均变为 878 nm 。将二层结构的 GaAs 阴极组件减薄激活之后，GaAs 阴极发射层的荧光谱峰值波长向短波方向移动，平均为 872 nm 。三代像增强器 GaAs 阴极组件在制作过程中荧光谱峰值波长变化的原因主要是 GaAs 发射层内部晶格存在应变，因此当五层 GaAs 阴极组件变为二层 GaAs 阴极组件之后，由于 GaAs 发射层内部晶格应变状态的变化，致使荧光谱的峰值波长向长波方向移动。当二层 GaAs 阴极组件经过减薄、热清洗和激活之后，由于 GaAs 发射层内部应力的释放，应变在一定程度上得到消除，因此 GaAs 发射层的荧光谱峰值波长又向短波方向移动。

2) 一般情况下，GaAs 材料的荧光谱是一条高斯

型的曲线，但对三代管 GaAs 阴极组件而言，当 GaAs 发射层中存在不均匀的晶格应变时，其荧光谱曲线在峰值附近会出现不规则的形状，而当不均匀的晶格应变消除后，荧光谱曲线会恢复到正常的形状。所以 GaAs 发射层中存在的应变会通过荧光谱反映出来，这样在 GaAs 光电阴极的制作过程中，除了通过测量积分光荧光来评价 GaAs 光电阴极的制作过程之外，还可以通过测量 GaAs 光电阴极荧光谱的峰值波长变化来监控 GaAs 光电阴极的制作过程。

参考文献:

[1] 常本康. 多碱光电阴极[M]. 北京:兵器工业出版社, 2011.

[2] 郭晖. 积分光荧光测试在三代微光像增强器光阴极制作中的应用[J]. 应用光学, 2000, 21(6): 10-12.

[3] 谢大兵, 华文深, 李刚, 等. 电子俘获材料 ZnS:Cu,Pb,Mn 发光机理研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(5): 45-49.

[4] 熊丽, 李美成, 邱永鑫. GaAs 基 GaSb 薄膜的分子束外延生长与发光特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(2): 67-71.

[5] 任维义, 孙卫国. Na_2 分子部分电子态的完全振动能谱和解能级的精确研究[J]. 物理学报, 2005, 54(2): 166-170.

[6] 樊群超, 申立, 孙卫国, 等. 双原子分子解能的精确研究[J]. 原子与分子物理学报, 2006, 23(z1): 117-121.

[7] Zhang Yijun, Niu Jun, Zou Jijun, et al. Variation of spectral response for exponential-doped transmission-mode GaAs photocathodes in the preparation process[J]. Applied Optics, 2010, 49(20): 3935-3940.

[8] Zou Jijun, Chang Benkang, Zhang Yijun, et al. Variation of spectral response from cesium-covered GaAs and band features contained within the spectral response[J]. Applied Optics, 2010, 49(14): 2561-2565.

[9] Liu Lei, Wang Xin, Chang Benkang. Spectral matching technology of a low-light-level night-vision system with a laser illuminator[J]. Applied Optics, 2010, 49(3): 286-291.

[10] Niu Jun, Zhang Yijun, Chang Benkang, et al. Influence of exponential doping structure on the performance of GaAs photocathodes[J]. Applied Optics, 2009, 49(29): 5445-5450.

[11] Zhang Yijun, Chang Benkang, Yang Zhi, et al. Annealing study of carrier concentration in gradient-doped GaAs/GaAlAs epilayers grown by molecular beam epitaxy[J]. Applied Optics, 2009, 48(9): 1715-1720.

[12] Yang Zhi, Chang Benkang, Zou Jijun, et al. Comparison between gradient-doping GaAs photocathode and uniform-doping GaAs photocathode[J]. Applied Optics, 2007, 46(28): 7035-7039.

[13] Liu Lei, Du Yujie, Chang Benkang, et al. Spectral response variation of a negative electron-affinity photocathode in the preparation process[J]. Applied Optics, 2006, 45(24): 6094-6098.

[14] Liu Lei, Chang Benkang. Spectral matching factors between Super S₂₅ and New S₂₅ photocathodes and reflective radiation of objects[J]. Applied Optics, 2004, 43(3): 616-619.