

光谱响应范围为 0.7—1.65 μm 的 一种近红外光阴极*

陶 兆 民

(中国科学院电子学研究所)

(一) 前言

众所周知,夜视仪器最基本的要求是看得远、看得清。夜视仪器中主要的部件除光学透镜外就是微光管。而光阴极则是微光管的“眼睛”。目前,二、三代微光管中的光阴极分别为 Sb-K-Na-Cs 与 GaAs, 它们的长波阈约为 0.9 μm 。夜天空辐射强度是满月与星空交替变化的。满月以可见光辐射为主,而星空则以近红外辐射为主。在星空辐射下,波长大于 1 μm 的辐射强度比可见光的辐射强度约大 1—2 个数量级^[1]。因此, Sb-K-Na-Cs 与 GaAs 两种光阴极用于微光管内接收夜天空辐射,对满月是可以的,但是对波长长于 0.9 μm 的星空辐射则完全不能接收。显然, Sb-K-Na-Cs 与 GaAs 两种光阴极用于夜视仪器内接收夜天空的辐射是不理想的。因此,有必要寻找一种光阴极,它既能接收满月的辐射,又能接收星空的辐射。

文献[2]给出 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 光阴极的长波阈为 1.65 μm 。InP/ $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 光阴极如作为透射式使用,它的光谱响应范围为 0.9—1.65 μm 。这是因为 InP 对波长长于 0.9 μm 的入射光才能透过,而波长短于 0.9 μm 的入射光则不能透过。显然,光谱响应范围为 0.9—1.65 μm 的透射式 InP/ $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 光阴极也不适合接收满月的辐射。

本文设计一种光阴极,它的光谱响应范围为 0.7—1.65 μm 。其目的是保存 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 光阴极的长波阈为 1.65 μm ,但更换光阴极 ($\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$) 的衬底材料,使其短波起始波长扩展到 0.7 μm ,以便既能接收满月辐射,也能接收星空辐射。

(二) 光谱响应范围为 0.7—1.65 μm 的透射式光阴极

1、GaP/ $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}$ / $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ($x:0 \rightarrow 1$) 光阴极的组成结构设计 在 GaP 衬底上以汽相外延生长 $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}$ 缓变层,此处 x 从 0 开始,逐步增加到 1,以“ $x:0 \rightarrow 1$ ”符号表示。当 $x = 0$ 时, $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}$ 即为 GaP;当 x 逐步增加到 1 时, $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}$ 即为 InP。而后在 $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}$ 上再以汽相外延生长 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 。

由于 GaP 与 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 的晶格常数差异较大,故在 GaP 与 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 之间加 $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}$ 缓变层。缓变层的晶格常数从 GaP 的晶格常数 (5.4511 Å) 逐步增加到 InP

* 1982年3月5日收到。

的晶格常数 (5.8687 Å). 而 InP 的晶格常数与 Ga_{0.47}In_{0.53}As 的晶格常数 (5.8679 Å)* 则很接近.

对透射式 GaP, 其短波起始波长约从 0.55 μm 开始, 由于 Ga_(1-x)In_xP 缓变层对短波波长的吸收, 所以透射式 GaP/Ga_(1-x)In_xP 的短波起始波长约从 0.7 μm 开始. 因此, 透射式 GaP/Ga_(1-x)In_xP/Ga_{0.47}In_{0.53}As 光阴极的光谱响应范围为 0.7—1.65 μm .

2. 夜天空(满月与星空)辐射下, GaP/Ga_(1-x)In_xP/Ga_{0.47}In_{0.53}As (光谱响应范围为 0.7—1.65 μm) 与 GaAs (光谱响应范围为 0.4—0.9 μm) 两种光阴极光电发射性能的比较.

图 1 给出夜天空(满月与星空)的辐射强度随波长的分布曲线^[1]. 为了计算 GaP/Ga_(1-x)In_xP/Ga_{0.47}In_{0.53}As (0.7—1.65 μm) 与 GaAs(0.4—0.9 μm) 的光电发射并作比较, 须将图 1 中夜天空辐射强度的单位 [W/(cm²·sr· μm)] 换算成 [(Photons/s)/(cm²·sr· μm)]. 换算的结果如表 1 所列.

按文献报道, 透射式 GaAs 光阴极的量子效率 (electrons/photon) 约为 10%^[3]; 反射式 InP/Ga_{0.47}In_{0.53}As 光阴极的量子效率为 8%^[4]. 本文计算时暂取透射式 GaP/Ga_(1-x)In_xP/Ga_{0.47}In_{0.53}As 光阴极的量子效率为 3%. III—V 族化合物光阴极的量子效率在光谱响应范围内基本上是一样的.

设 (MRI) _{λ} 表示在波长为 λ 时的满月辐射强度, 其单位为 [(Photons/s)/(cm²·sr·

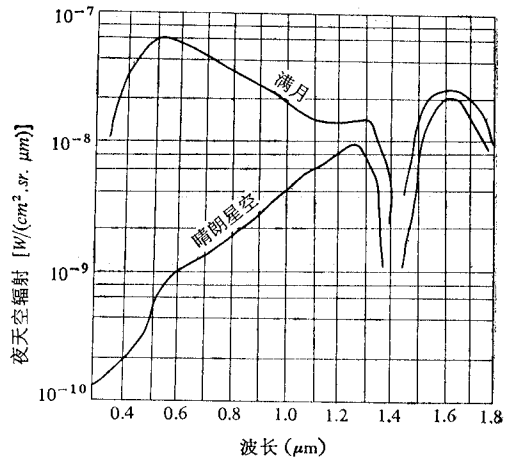


图 1 夜天空(满月与星空)辐射强度分布^[1]

Fig. 1 Night sky (full moon and clear star) radiance

表 1 不同波长的夜天空(满月与星空)的辐射强度 [(Photons/s)/(cm²·sr· μm)]

Tab. 1 Night sky (full moon and clear star) radiance at different wavelengths

$\lambda(\mu\text{m})$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
(MRI) _{λ} 满月	6×10^{10}	1.5×10^{11}	1.74×10^{11}	1.47×10^{11}	1.5×10^{11}	1.35×10^{11}	
(SRI) _{λ} 星空	4×10^8	1×10^9	3×10^9	5.25×10^9	7×10^9	1.35×10^{10}	
$\lambda(\mu\text{m})$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4*	1.5	1.6
(MRI) _{λ} 满月	9×10^{10}	8.3×10^{10}	9×10^{10}	1×10^{11}	—	9.24×10^{10}	1.7×10^{11}
(SRI) _{λ} 星空	2×10^{10}	3.3×10^{10}	4.8×10^{10}	5.3×10^{10}	—	0.2×10^{10}	1.6×10^{11}

* 在 1.4 μm 附近大气有强烈的吸收, 故未计算.

* 根据 Ga_{0.47}In_{0.53}As 中的成份计算的结果

$\mu\text{m}]$], 此即表 1 中的第 2 行; $(\text{SRI})_\lambda$ 表示在波长为 λ 时的星空辐射强度, 其单位为 $[(\text{Photons/s})/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})]$, 此即表 1 中的第 3 行; $(\text{QE})_\lambda$ 表示在波长为 λ 时, 透射式 GaAs (光谱响应范围为 $0.4\text{--}0.9\mu\text{m}$) 与透射式 GaP/Ga $_{(1-x)}$ In $_x$ P/Ga $_{0.47}$ In $_{0.53}$ As (光谱响应范围为 $0.7\text{--}1.65\mu\text{m}$) 的量子效率, 其单位为 (electrons/photon)。

$(\text{MRI})_\lambda(\text{QE})_\lambda$ 与 $(\text{SRI})_\lambda(\text{QE})_\lambda$ 分别为满月与星空辐射强度下, 透射式 GaAs 与透射式 GaP/Ga $_{(1-x)}$ In $_x$ P/Ga $_{0.47}$ In $_{0.53}$ As 在波长为 λ 的光电发射, 其单位为 $[\text{electrons/s}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})]$, 计算结果分别列于表 2 与表 3。

表 2 透射式 GaAs ($0.4\text{--}0.9\mu\text{m}$) 在满月与星空辐射强度下, 不同波长的光电发射, 其单位为 $[\text{electrons/s}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})]$

Tab. 2 Photoemission of GaAs ($0.4\text{--}0.9\mu\text{m}$) under night sky (full moon and clear star) irradiation at different wavelengths

$\lambda(\mu\text{m})$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$(\text{MRI})_\lambda(\text{QE})_\lambda$	6×10^9	1.5×10^{10}	1.74×10^{10}	1.47×10^{10}	1.5×10^{10}	1.35×10^{10}
$(\text{SRI})_\lambda(\text{QE})_\lambda$	4×10^7	1×10^8	3×10^8	5.25×10^8	7×10^8	1.35×10^9

表 3 透射式 GaP/Ga $_{(1-x)}$ In $_x$ P/Ga $_{0.47}$ In $_{0.53}$ As 在满月与星空辐射强度下, 不同波长的光电发射, 其单位为 $[\text{Photons/s}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})]$

Tab. 3 Photoemission of GaP/Ga $_{(1-x)}$ In $_x$ P/Ga $_{0.47}$ In $_{0.53}$ As ($0.7\text{--}1.65\mu\text{m}$) under night sky (full moon and clear star) irradiation at different wavelengths

$\lambda(\mu\text{m})$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4*	1.5	1.6
$(\text{MRI})_\lambda(\text{QE})_\lambda$	4.4×10^9	4.5×10^9	4×10^9	2.7×10^9	2.5×10^9	2.7×10^9	3×10^9	—	2.8×10^9	5×10^9
$(\text{SRI})_\lambda(\text{QE})_\lambda$	1.6×10^8	2.1×10^8	4×10^8	6×10^8	1×10^9	1.4×10^9	1.6×10^9	—	1.9×10^9	4.8×10^9

* 在 $1.4\mu\text{m}$ 附近大气有强烈的吸收, 故未计算。

将表 2 与表 3 的结果绘成曲线即如图 2 所示。从图 2 可以得到如下的结果:

(1) 在星空辐射下:

$$\frac{\text{GaP/Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P/Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As 的光电发射 (0.7—1.65}\mu\text{m})}{\text{GaAs 的光电发射 (0.4—0.9}\mu\text{m})} = 3.4 \text{ 倍}$$

这是在星空辐射下, 近红外辐射占优势的结果。

(2) 在满月辐射下:

$$\frac{\text{GaAs 的光电发射 (0.4—0.9}\mu\text{m})}{\text{GaP/Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P/Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As 的光电发射 (0.7—1.65}\mu\text{m})} = 4.8 \text{ 倍}$$

这是在满月辐射下, 可见光辐射占优势的结果。

为了实现上述设计, 需采用相应的工艺, 例如 10^{-10} 托的超高真空, 原子清洁度表面的获得, 辅助场负电子亲和势光阴极的工艺以及使该阴极冷却至 $200\text{K}^{[5]}$ 的工艺等。这些暂不属本文范围, 故从略。

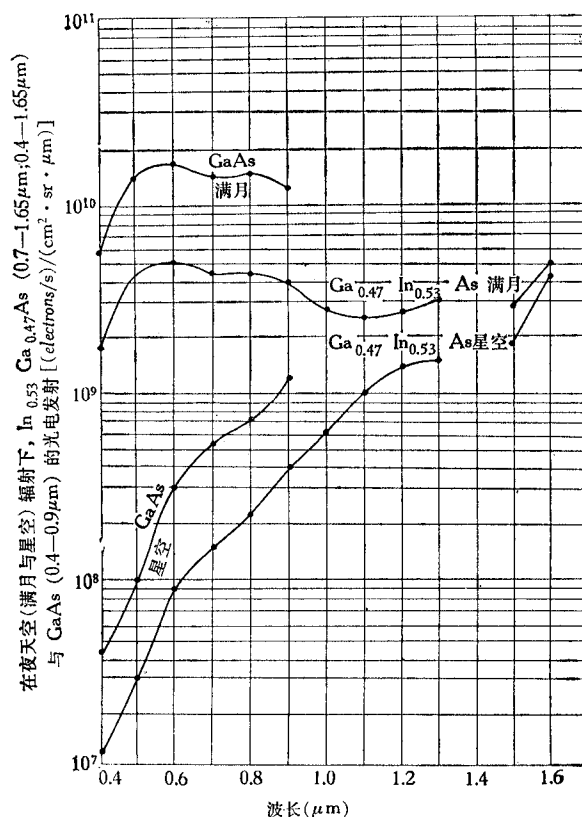


图2 在夜天空(满月与星空)辐射下, $\text{GaP}/\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ (0.7—1.6 μm) 与 GaAs (0.4—0.9 μm) 的光电发射 [electrons/s/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \mu\text{m}$)]

Fig. 2 Photoemission of $\text{GaP}/\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ (0.7—1.65 μm) and GaAs (0.4—0.9 μm) under night sky (full moon and clear star) irradiation

参 考 文 献

- [1] F. A. Richards, *Advances in Electronics and Electron Physics*, Vol. 28B, (1969), p. 661.
- [2] J. S. Escher, *J. Appl. Phys.*, 49(1978), 259.
- [3] P. Csorba, *Appl. Opt.*, 13(1979), 2440.
- [4] J. S. Escher, et al., *IEEE Trans. on ED*, ED-25(1978), 1347.
- [5] J. S. Escher, et al., *IEEE on ED Lett.*, EDL-2(1982), 123.

A NEAR IR PHOTOCATHODE WITH 0.7—1.65 μm PHOTORESPONSE

Tao Zhaomin

(Institute of Electronics, Academia Sinica)

A near IR $\text{GaP}/\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ($x:0 \rightarrow 1$) photocathode with 0.7—1.65 photoresponse is proposed and designed. The photoemission of the $\text{GaP}/\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ is calculated and compared with the photoemission of the GaAs photocathode (0.4—0.9 μm) under night sky (full moon and clear star) irradiation.