

## 高量子效率 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 红外光电阴极模拟

周振辉<sup>1,2,3</sup>, 徐向晏<sup>1,3</sup>, 刘虎林<sup>1,3</sup>, 李岩<sup>4</sup>, 卢裕<sup>1,3</sup>, 钱森<sup>5,6</sup>, 韦永林<sup>1,3</sup>, 何凯<sup>1,3</sup>,  
赛小锋<sup>1,3</sup>, 田进寿<sup>1,3</sup>, 陈萍<sup>1,3</sup>

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院超快诊断重点实验室, 陕西 西安 710119;
4. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;
5. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 6. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

**摘要:** 将 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 吸收层设计为多个薄层, 通过不同浓度掺杂实现吸收层杂质指数分布, 建立了 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 红外光电阴极模型, 在皮秒级响应时间的前提下模拟了吸收层厚度、掺杂浓度和阴极外置偏压对阴极内量子效率的影响, 给出了光电子在吸收层和发射层的一维连续性方程和边界条件, 计算了光电子克服激活层势垒发射到真空中的几率, 进而获得阴极外量子效率随上述三个因素的变化规律, 结果表明, 吸收层掺杂浓度在 10<sup>15</sup>~10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> 范围内变化时, 内量子效率变化很小; 随着吸收层厚度在 0.09~0.81 μm 内增大, 内量子效率随之增大; 随着外置偏压升高, 内量子效率先增大后趋于平稳。文中给出一组既能获得高量子效率又能有快时间响应的阴极设计参数, 理论上 1.55 μm 入射光可以获得 8.4% 的外量子效率, 此时响应时间为 49 ps。

**关键词:** 量子效率; 响应时间; 指数掺杂; 红外光电阴极; InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0221002

## Simulation of InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP infrared photocathode with high quantum yield

Zhou Zhenhui<sup>1,2,3</sup>, Xu Xiangyan<sup>1,3</sup>, Liu Hulin<sup>1,3</sup>, Li Yan<sup>4</sup>, Lu Yu<sup>1,3</sup>, Qian Sen<sup>5,6</sup>, Wei Yonglin<sup>1,3</sup>,  
He Kai<sup>1,3</sup>, Sai Xiaofeng<sup>1,3</sup>, Tian Jinshou<sup>1,3</sup>, Chen Ping<sup>1,3</sup>

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
4. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
5. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
6. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China)

**Abstract:** An InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP infrared photocathode model was established. The In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As absorber layer was designed as a multi-layer structure, the impurities of it were exponentially distributed by doping with different concentrations of the thin layers. The one-dimensional continuity equations and boundary

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(11475209)

作者简介: 周振辉(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光电成像方面的研究。Email: zhouzhenhui2015@opt.cn

导师简介: 徐向晏(1973-), 男, 研究员, 博士后, 主要从事物理电子学、微电子学及光电成像技术方面的研究。Email: xuxy@opt.ac.cn

conditions of the photoelectron in the absorber layer and the emissive layer were given and the probability that photoelectrons overcome the launch of the active layer barrier into the vacuum was calculated. The effects of absorber layer thickness, doping concentration and cathode bias voltage on the internal quantum efficiency of the cathode was simulated under the condition of picosecond response time, and then the law of the external quantum yield of the cathode was obtained with the above three factors. The results show that, when the doping concentration of the absorber layer changes within the range of  $10^{15}$ – $10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$ , The internal quantum efficiency change is very small; as the thickness of the absorber layer increases within 0.09–0.81  $\mu\text{m}$ , the internal quantum efficiency increases. As the external bias voltage increases, the internal quantum efficiency increases first and then tends to be stable. A set of cathode design parameters that could achieve both high quantum efficiency and fast time response were presented. Theoretically, an external quantum yield of 8.4% can be obtained for 1.55  $\mu\text{m}$  incident light, and the response time is 49 ps.

**Key words:** quantum yield; response time; exponential doping; infrared photocathode;

InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP

## 0 引言

银氧铯光电阴极(S-1)和以 S-20 为代表的多碱光电阴极能够实现皮秒级的时间分辨,但 S-1 光电阴极波长阈值只能达到 1.55  $\mu\text{m}$ ,且量子效率非常低,大约为  $10^{-5}$ ,而 S-20 波长阈值仅为 0.9  $\mu\text{m}$ 。为了在拥有快时间响应的同时实现高的量子效率和对更长的红外波段的探测,InGaAs 光电阴极因电子能量分布集中,量子效率高,响应速度快,暗电流小,光电探测波长范围宽(0.9~3.5  $\mu\text{m}$ )等优点得到了许多研究人员的关注<sup>[1-6]</sup>。J.S.Escher 等人提出波长阈值能达到 1.65  $\mu\text{m}$  的 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 转移电子光电阴极,当波长为 1.55  $\mu\text{m}$  时,量子效率为  $10^{-3}$ (125 K)和  $10^{-4}$ (300 K)<sup>[7]</sup>;李晋闽对场助均匀掺杂型 InP/InGaAsP 阴极量子效率进行过定量计算,场助电压为 7 V 时量子效率为 1%左右<sup>[8]</sup>;赵静,常本康等人研制的 InGaAs/GaAlAs 透射型光电阴极量子效率达到了 7%左右<sup>[9]</sup>。这些工作都注重 InGaAs 光电阴极量子效率的研究。在响应时间方面,李晋闽通过一个一维连续性方程组对 InP/InGaAsP 阴极响应时间进行计算,得到掺杂浓度为  $10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$ ,加 7 V 偏压时,1.24  $\mu\text{m}$  入射波长响应时间缩小为 10 ps<sup>[10]</sup>;孙巧霞于 2013 年对阈值波长为 1.7  $\mu\text{m}$  的均匀掺杂 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 红外光电阴极的响应时间特性进行了模拟,发现控制响应时间在 100 ps 以内时,量子效率在波长 1.55  $\mu\text{m}$  处为 4%左右<sup>[11]</sup>。

为了在快时间响应的基础上提高 InP/InGaAs/InP 红外光电阴极的量子效率,文中将 InGaAs 吸收层设计成多层结构,掺杂浓度按指数分布,利用杂质浓度梯度形成的均匀内建电场辅助体内光电子输运。通过对阴极进行模拟,明确了吸收层厚度、吸收层掺杂浓度和外置偏压大小对量子效率的影响规律,理论计算了电子克服 Cs-O 激活层势垒发射的几率,获得了一组兼顾快时间响应的高量子效率设计参数,在响应时间为 49 ps 时量子效率达到 8.4%。

## 1 模型和方法

与其他透射式光电阴极相同,InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 光电阴极按 Spicer 提出的“三步模型”实现光电子发射,入射光由衬底 InP 入射被 InGaAs 层吸收,价带中的电子被激发到导带成为光电子,光电子由导带向 InP 发射层外表面输运,部分光电子克服表面势垒发射到真空中。

根据 Vegard 定理,In 组分为  $x$  的 In <sub>$x$</sub> Ga <sub>$1-x$</sub> As 的晶格常数为:

$$a(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})=x \times a(\text{InAs})+(1-x) \times a(\text{GaAs}) \quad (1)$$

式中:InAs、GaAs 和 InP 的晶格常数分别为 6.06, 5.65 和 5.87 Å,为使 InGaAs-InP 晶格匹配,计算得  $x=0.53$ 。In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 吸收层和 InP 衬底禁带宽度分别为 0.75 eV 和 1.35 eV,这将 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 光电阴极的响应波长限制为 0.9~1.7  $\mu\text{m}$ 。

将吸收层等分为 9 个等厚薄层,如图 1(a)所示,

第  $i$  层掺杂浓度  $N_i$  符合:

$$N_i = N_1 \exp\left(-\frac{i \times l}{z}\right) \quad (2)$$

式中:  $N_1$  为第 1 层掺杂浓度;  $l$  为薄层厚度;  $z$  为指数函数参数。第  $i$  和第  $i+1$  两个薄层之间因浓度差产生势能下降  $\Delta E_i$  为:

$$\Delta E_i = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_{i+1}}{N_i}\right) \quad (3)$$

式中:  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为热力学温度;  $e$  为电子电量。从衬底-吸收层界面到衬底-发射层界面的势能差值为:

$$\Delta E = \sum_{i=1}^s \Delta E_i = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_9}{N_1}\right) \quad (4)$$

光激发的电子可以通过内电场获得最大为  $\Delta E$  的能量, 从而实现加速运输和提高量子效率。吸收层-发射层界面势垒高度近似为 0.65 eV。给阴极施加一个反向偏压, 降低发射层表面电位, 使能带向下弯曲, 吸收层-发射层界面方形势垒变为三角形势垒, 如图 1(b) 所示, 从而增大光电子克服势垒运输到发射层表面的几率。

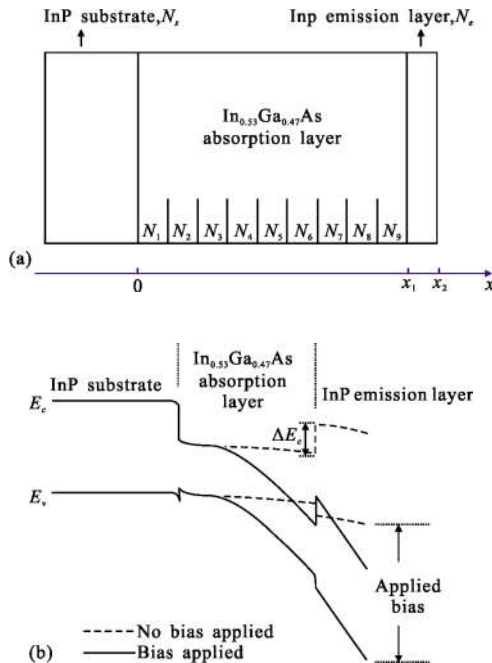


图 1 (a) 指数掺杂 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 结构图, (b) 施加偏压与未施加偏压情况下阴极能带图像对比

Fig.1 (a) Structure of exponential doping InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP photocathode, (b) comparison of energy band of photocathode with bias and without bias

光电子在阴极内输运可由一维电子连续性方程描述:

$$\frac{\partial n(x)}{\partial t} = \frac{\nabla J}{q} + g - \frac{n(x)}{\tau} \quad (5)$$

式中:  $n(x)$  表示光电子密度随  $x$  的分布函数;  $g$  为电子产生函数;  $\tau$  为平均光电子寿命;  $q$  为电子电荷量;  $J$  为电流密度。传输方程的边界条件分别为:

$$D_n \frac{dn(x)}{dx} \Big|_{x=0} - \mu F n(x) \Big|_{x=0} = n(x) S_1 \Big|_{x=0} \quad (6)$$

$$n(x) \Big|_{x=\infty} = 0 \quad (7)$$

式中:  $F$  为电场强度;  $D_n$  为电子扩散系数;  $\mu$  为电子迁移率;  $S_1$  为  $x=0$  处界面复合速率。同理对发射层进行分析, 可以得出阴极内量子效率。曾有研究人员对  $x=x_1$  处界面复合速率  $S_2$  对内量子效率的影响进行模拟, 发现当  $S_2 \leq 105$  cm/s 时, 界面复合速率对内量子效率影响不大, 当  $S_2 \geq 10^6$  cm/s 时, 量子效率下降明显<sup>[10]</sup>。文中模拟假设表面符合率偏高, 模拟时设置  $S_1 = S_2 = 10^6$  cm/s。

在 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 结构靠近发射面一侧的表面, 淀积 Cs-O 激活层形成负电子亲和势以增加电子透射几率  $D$ 。分别参考 Su C. Y. 和 J.S.Escher 的研究结果, 得到的激活后的阴极发射表面能带示意图如图 2 所示<sup>[11-12]</sup>, Cs-O 激活层势垒为分段线性三角

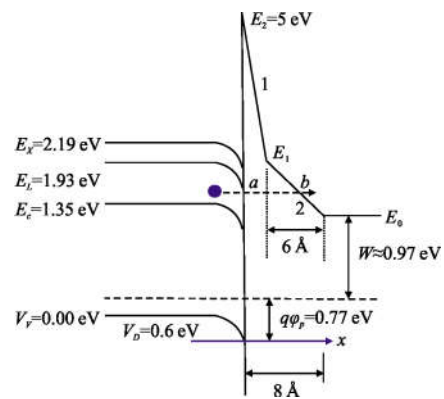


图 2 Cs-O 激活后发射界面势垒示意图

Fig.2 Band structure of emission interface after Cs-O activation

形势垒, 光电子从  $a$  点入射, 从  $b$  点透射而出,  $a$ 、 $b$  在  $x$  轴上坐标  $x_a$  与  $x_b$  根据电子入射能量  $E$  与势垒的关系得出, 从方形势垒透射率计算方法出发, 通过积分的方法得出透射率计算公式, 如公式(8)所示:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{4\pi}{h} \int_{x_a}^{x_b} \sqrt{2m[U(x) - E]} dx\right) \quad (8)$$

式中： $D_0$  为常数，一般取为 1； $h$  为普朗克常数； $m$  为电子有效质量； $U(x)$  为描述势垒的函数，该计算式适用于任意形状势垒透射率计算。

量子效率是衡量光电阴极性能的重要参数，文中所述量子效率均指电子发射到真空的外量子效率，可由内量子效率  $\eta_m$  和光电子对 Cs-O 激活层的透射几率  $D$  的乘积求得，即  $\eta = \eta_m \times D$ 。因为  $D$  取决于材料结构可以视为定值，故  $\eta$  和  $\eta_m$  有着相同的变化规律。文中采用上述模型，通过数值模拟的方法对 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 红外光电阴极吸收层掺杂浓度、厚度及外加电场进行模拟计算，考查内量子效率  $\eta_m$  内的变化规律。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸收层掺杂浓度对内量子效率的影响

由公式(3)和公式(4)可知，当吸收层各薄层掺杂浓度等比例变化时，能带弯曲量不会发生变化，故用浓度系数  $\beta$  乘以吸收层各层掺杂浓度，可以在能带下降大小相同的情况下获得不同浓度的掺杂。入射光脉冲半高宽设为 1 ps，吸收层起始掺杂浓度  $6.07 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，吸收层厚度  $d_a = 0.63 \mu\text{m}$ ，外加反向偏压  $V_b = 2 \text{ V}$ 。模拟了不同浓度系数  $\beta$  时 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 红外光电阴极在近红外常见波长 1.06、1.24、1.31、1.55  $\mu\text{m}$  处的内量子效率，结果如图 3 所示。当  $\beta$  从

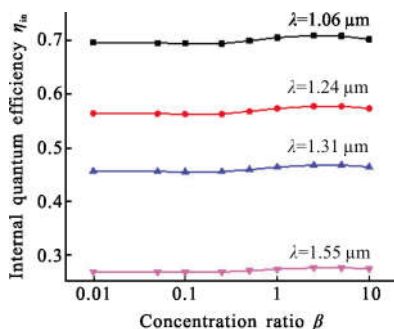


图 3 波长 1.06、1.24、1.31、1.55  $\mu\text{m}$  内量子效率随浓度系数  $\beta$  变化曲线

Fig.3 Internal quantum efficiency changed with concentration coefficient  $\beta$  at 1.06, 1.24, 1.31, 1.55  $\mu\text{m}$  respectively

0.01 增大到 10，内量子效率略微上升，这表明在器件制备过程中，单层材料掺杂浓度控制并不需要十分严格。0.9~1.7  $\mu\text{m}$  入射光在 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 中透射深度可由材料的吸收系数<sup>[13]</sup>计算得出，结果如图 4 所

示，入射波长越短，透射深度越小，材料对光的吸收率越高，因此短波长入射光内量子效率高于长波长入射光。

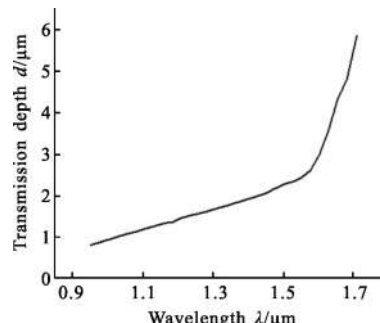


图 4 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 材料不同波长透射深度曲线

Fig.4 Wavelength-transmission depth curve in In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As material

### 2.2 吸收层厚度对内量子效率的影响

光电子在输运过程中，运动距离越长，则需要的时间越长，复合的光电子也越多。改变吸收层厚度，将直接影响到内量子效率和响应时间大小，取外置偏压  $V_b = 5 \text{ V}$ ，在其他参数同前文所述情况下，模拟结果如图 5 所示。从图 5(a)可知，吸收层厚度  $0.09 \mu\text{m} < d_a < 0.81 \mu\text{m}$  时，内量子效率随着  $d_a$  增大而增大；当入射波长  $\lambda > 1.57 \mu\text{m}$  时，量子效率随波长增加迅速降低。这根据图 4 可以得到解释，In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 透射深度随波长增加而变大，即吸收率降低，因此内量子效率随波长增加而迅速减小。图 5(b)展示了 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 阴极对波长为 1.06、1.24、1.31、1.55  $\mu\text{m}$  的入射光的内量子效率与  $d_a$  的变化曲线。随着  $d_a$  增大，内量子效率先增大后减小。入射光入射波长越短，激发光电子位置越靠近光入射面，光电子输运到阴极发射端面距离越远，越容易被复合，因此短波长入射光的内量子效率也将比长波长更早因吸收层厚度增大而下降。由于  $d_a = 0.63 \mu\text{m}$  时，波长 1.06、1.24、1.31  $\mu\text{m}$  对应的内量子效率已接近最大值，继续增大  $d_a$  其内量子效率变化不大，考虑到厚的吸收层厚度可能会增大器件的响应时间，因此吸收层厚度取  $0.63 \mu\text{m}$  左右较为合适。由图 5(b)可知在吸收层厚度为  $0.63 \mu\text{m}$  时，1.55  $\mu\text{m}$  波长的内量子效率为 0.28，此时吸收层内部场强超过  $10^4 \text{ V/cm}$ ，大多数电子都能够从电场中获得足够能量跃迁至 L 能谷<sup>[14]</sup>，由公式(5)计算得电子对 Cs-O 层的透射几率  $D = 0.3$ ，故其外量子效率  $\eta = 8.4\%$ 。与吸收层厚度为  $0.63 \mu\text{m}$ ，掺杂浓度为

$6.07 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  的均匀掺杂型阴极对比, 指数掺杂型内量子效率更高; 图 5(c) 给出了指数掺杂与均匀掺杂时响应速度的比较, 相较于均匀掺杂型响应时间 95 ps, 指数掺杂型响应时间缩短为 49 ps, 响应速度有明显提高。

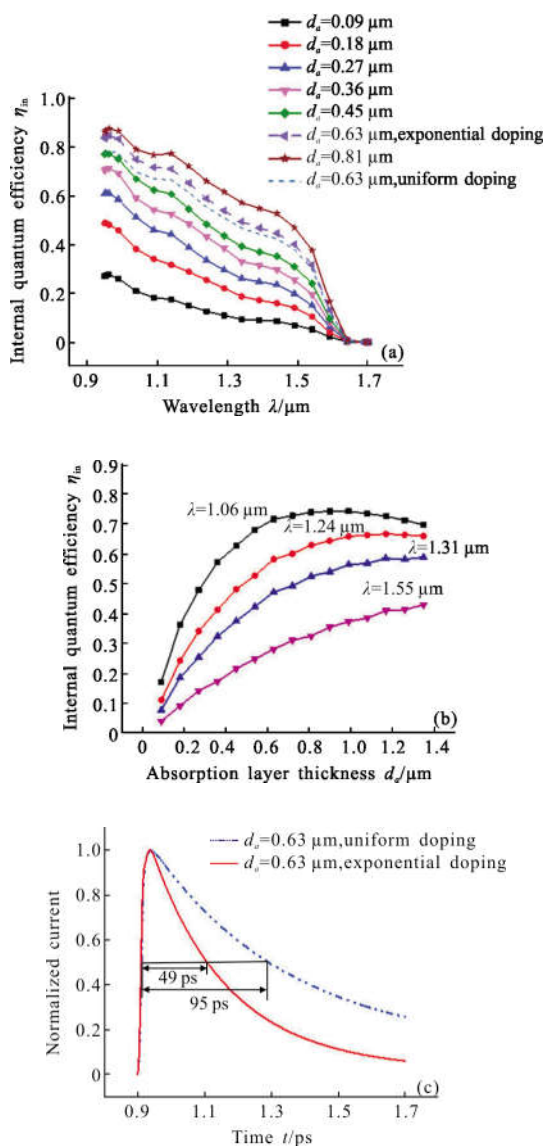


图 5 (a) 不同吸收层厚度下的波长-内量子效率关系, (b) 波长 1.06、1.24、1.31、1.55  $\mu\text{m}$  内量子效率与吸收层厚度的关系, (c) 指数掺杂型和均匀掺杂型阴极响应时间对比

Fig.5 (a) Wavelength-internal quantum efficiency curve at different thickness of absorption layer, (b) internal quantum efficiency at 1.06, 1.24, 1.31, 1.55  $\mu\text{m}$  with different thickness of absorption layer, (c) comparison of exponential doping and uniform doping cathode in response time

从以上结果来看, 短波长可以在吸收层较薄时

获得高的量子效率, 例如  $d_a = 0.45 \mu\text{m}$  时 1.06  $\mu\text{m}$  入射光内量子效率为 0.65, 而 1.55  $\mu\text{m}$  入射光仅有 0.24。这意味着针对短波长可以设计更薄的吸收层, 响应时间也将因此得到提升, 同理, 要使长波长有更高的量子效率, 吸收层需要厚一些, 这样响应时间也会变长。

### 2.3 外置偏压对内量子效率的影响

为了研究外加电场对内量子效率的影响, 取吸收层厚度  $d_a = 0.63 \mu\text{m}$ , 只改变外置偏压  $V_b$ , 模拟结果如图 6(a) 所示。在 0~3 V 内, 内量子效率  $\eta_{in}$  随  $V_b$  升高而增大; 在  $V_b > 3 \text{ V}$  时, 基本已达到最大值, 因为此时吸收层内大部分区域电场强度接近  $10^4 \text{ V/cm}$ , 光电子基本已经由  $\Gamma$  能谷跃迁到更高的能谷, 实现了电子转移。这些光电子具有较高的能量, 输运过程中遇到势垒时将有比  $\Gamma$  能谷光电子更高的透过率。当大多数光电子都从电场中获得足够能量穿过吸收层-发射层势垒到达发射层表面时, 内量子效率便不再增大。虽然继续增大电压不能明显提高内量子效率, 但是可以加快光电子的输运速度, 提高阴极响应速度。图 6(b) 是响应时间模拟计算的结果,  $V_b$  取 7、5、3 V

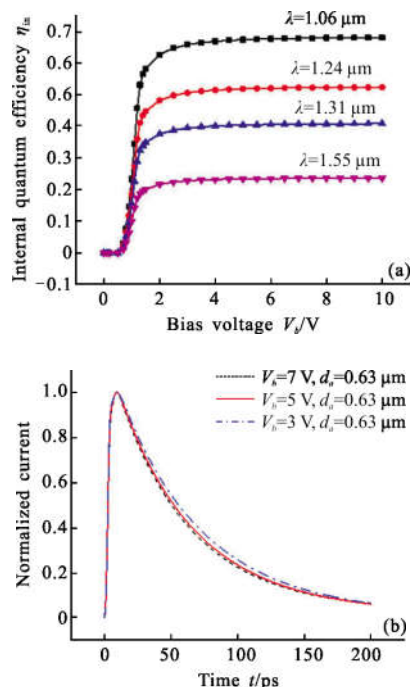


图 6 (a) 波长 1.06、1.24、1.31、1.55  $\mu\text{m}$  的内量子效率  $\eta_{in}$  随偏压  $V_b$  变化曲线, (b)  $V_b$  为 7、5、3 V 时器件的响应时间对比

Fig.6 (a) Internal quantum efficiency  $\eta_{in}$ -bias curve  $V_b$  at 1.06, 1.24, 1.31, 1.55  $\mu\text{m}$  respectively, (b) comparison of response time when  $V_b$  is 7, 5, 3 V

时, 响应脉冲峰值半高宽为  $\Delta t$  分别为 46、49、54 ps。暗电流会随  $V_b$  增大而增大, 同时吸收层内电场在  $V_b=10\text{ V}$  时将增大到  $10^5\text{ V/cm}$ , 考虑到  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  和  $\text{InP}$  的击穿场强分别为  $2\times 10^5\text{ V/cm}$  和  $5\times 10^5\text{ V/cm}$ <sup>[13,15]</sup>, 因此  $V_b$  不宜太大, 取 5 V 左右较为适当。

### 2.4 阴极制作工艺讨论

文中设计的  $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  阴极可以利用现有的半导体制造技术制备。先在  $250\text{ }^\circ\text{C}$  下将  $\text{InP}$  衬底脱气, 然后在真空中进行热化学清洗, 杂质 Be 的掺杂温度控制在  $850\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[16]</sup>。为了实现晶格匹配, 建议采用能精确控制材料组分和生长速率的分子束外延方法生长  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  吸收层, 日本滨松与美国 ITT 公司也都使用该技术进行过阴极制备<sup>[17-18]</sup>。通过光学高温计测量, 在  $526\text{ }^\circ\text{C}$  下生长吸收层的第一个薄层。严格控制 In 源和 Ga 源的输出速度, 保证晶格匹配以减小界面符合率, 外延期间可用激光散射装置检测外延层质量<sup>[19]</sup>, 然后按照预设浓度进行掺杂。其他薄层可用同样的方法生长和掺杂。用于 P 型  $\text{InGaAs}$  掺杂的元素大致有 Si、Cd 和 Zn, 其中 Zn 被认为是更好的选择<sup>[20-23]</sup>。从吸收层浓度对内量子效率的影响来看, 每层掺杂量精度要求不高, 只要基本复合预设指数分布即可获得相近的内量子效率。Cs-O 激活层在低于  $10^{-9}\text{ Pa}$  的高真空条件下用铯氧交替激活法制备, 以实现电子亲和势下降到负值。

### 3 结 论

建立了指数掺杂型  $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  红外光电阴极物理模型, 模拟了该阴极吸收层浓度、厚度和阴极外置偏压三种因素对量子效率的影响, 获得了内量子效率随其变化规律。计算了光电子克服 Cs-O 激活层势垒发射至真空的几率, 从而获得了外量子效率随上述三种因素的变化规律。文中给出一组设计参数和部分工艺参数, 吸收层厚度  $0.63\text{ }\mu\text{m}$ , 吸收层起始掺杂浓度  $6.07\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ , 外置偏压 5 V, 能在响应时间为 49 ps 的情况下对  $1.55\text{ }\mu\text{m}$  入射光的量子效率达到 8.4%, 可为今后半导体光电阴极设计提供参考依据。

### 参考文献:

[1] Yang M Z, Jin M C, Chang B K. Spectral response of  $\text{InGaAs}$  photocathodes with different emission layers [J].

*Applied Optics*, 2016, 55(31): 8732-8737.

[2] Jin M C, Chen X L, Hao G H, et al. Research on quantum efficiency for reflection-mode  $\text{InGaAs}$  photocathodes with thin emission layer [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 8332-8338.

[3] Matsuyama T, Mukai M, Horinaka H, et al. High luminescence polarization of  $\text{InGaAs}-\text{AlGaAs}$  strained layer superlattice fabricated as a photocathode of spin-polarized electron source [J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1 -Regular Papers Short Notes & Review Papers*, 2001, 40(11): 6468-6472.

[4] Yang M Z, Jin M C. Photoemission of reflection-mode  $\text{InGaAs}$  photocathodes after Cs,O activation and recaesiations [J]. *Optical Materials*, 2016, 62: 499-504.

[5] Smirnov K, Medzakovskiy V I, Davydov V V, et al. High sensitive  $\text{InP}$  emitter for  $\text{InP}/\text{InGaAs}$  heterostructures [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 917 (6): 062019.

[6] Sachno V, Dolgyh A, Loctionov V. Image intensifier tube (I2) with  $1.06-\mu\text{m}$   $\text{InGaAs}$ -photocathode [C]//SPIE, 2005, 5834: 169-176.

[7] Escher J S, Gregory P E, Hyder S B, et al. Transferred-electron photoemission to  $1.65\text{ }\mu\text{m}$  from  $\text{InGaAs}$  [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(4): 2591-2592.

[8] Li Jinmin, Guo Lihui, Hou Xun. Theoretical calculation of quantum efficiency for field-assisted  $\text{InP}/\text{InGaAsP}$  semiconductor photocathodes [J]. *Acta Physica Sinica*, 1992, 41(10): 1672-1678. (in Chinese)

[9] Jin M C, Chang B K, Cheng H C, et al. Research on quantum efficiency of transmission-mode  $\text{InGaAs}$  photocathode [J]. *Optik*, 2014, 125(10): 2395-2399.

[10] Li Jinmin, Guo Lihui, Hou Xun. Calculation of time response for field-assisted  $\text{InP}/\text{InGaAsP}/\text{InP}$  semiconductor photocathodes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37(7): 598-601. (in Chinese)

[11] Sun Qiaoxia, Xu Xiangyan, An Yingbo, et al. Numerical study on time response characteristics of  $\text{InP}/\text{InGaAs}/\text{InP}$  infrared photocathode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3163-3167. (in Chinese)

[12] Zou Jijun, Chang Benkang, Yang Zhi. Theoretical calculation of quantum yield for exponential-doping  $\text{GaAs}$  photocathodes [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(5): 2992-2997.

[13] Escher J S, Gregory P E, Maloney T J. Hot-electron attenuation length in  $\text{Ag}/\text{InP}$  Schottky barriers[J]. *Journal of*

- Vacuum Science and Technology*, 1979, 16(5): 1394–1397.
- [14] Su C Y, Spicer W E, Lindau I. Photoelectron spectroscopic determination of the structure of (Cs,O) activated GaAs (110) surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(3): 1413–1422.
- [15] Levinshtein M, Rumyantsev S, Shur M. Handbook Series on Semiconductor Parameters [M]. 2nd ed. London: World Scientific, 1999: 62–88.
- [16] Simon S M. Physics of Semiconductor Devices [M]. New York: Wiley, 1980.
- [17] Levinshtein M, Rumyantsev S, Shur M. Handbook Series on Semiconductor Parameters [M]. 1st ed. London: World Scientific, 1999.
- [18] Jiao Gangcheng, Xu Xiaobing, Zhang Liandong, et al. InGaAs/InP photocathode grown by solid-source MBE [C]// SPIE, 2013, 8912: 891216.
- [19] Chinen Kouyu, Minoru Niigaki, Masahiro Miyao, et al. GaAs transmission photocathode grown by MBE [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1980, 19(11): 703–706.
- [20] Narayanan A A, Fisher D G. Negative electron affinity gallium arsenide photocathode grown by MBE [J]. *Appl Phys*, 1984, 56(6): 1886–1887.
- [21] Bourree L E, Chasse D R, Thamban P L, et al. MBE grown InGaAs photocathodes[C]//SPIE, 2003, 4796: 1–10.
- [22] Jin M C, Chang B K, Guo J, et al. Theoretical study on electronic and optical properties of Zn-doped  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  photocathodes[J]. *Optical Review*, 2016, 23(1): 84–91.
- [23] Guo Jing, Chang Benkang, Wang Honggang, et al. Near-infrared photocathode  $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  doped with zinc: A first principle study[J]. *Optik*, 2016, 127(3): 1268–1271.