

# 多碱光电阴极灵敏度理论模拟

安迎波<sup>1,2</sup> 徐向晏<sup>1</sup> 孙巧霞<sup>1,2</sup> 曹希斌<sup>1</sup> 温文龙<sup>1</sup> 王俊锋<sup>1</sup> 刘虎林<sup>1</sup>  
卢 裕<sup>1</sup> 田进寿<sup>1</sup> 李晓峰<sup>3</sup> 李燕红<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup> 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710059)

**摘要** 针对多碱光电阴极进行了理论建模和性能模拟, 采用层状模型:  $\text{Na}_2\text{KSb} + \text{K}_2\text{CsSb} + \text{Sb} \cdot \text{Cs}$  偶极层, 讨论了各层厚度、掺杂离子浓度对多碱阴极能带以及光谱响应特性的影响, 结果显示表面  $\text{K}_2\text{CsSb}$  和  $\text{Sb} \cdot \text{Cs}$  两层的 n 型掺杂较高时, 能够有效降低表面亲和势, 有利于光电子的输运以及逸出。  $\text{Na}_2\text{KSb}$  的掺杂离子浓度并非越高越好, 主要原因是掺杂离子浓度影响着内建电场强度与范围, 内建电场增大使电子扩散距离增加, 有更高的几率到达阴极表面, 在掺杂离子浓度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  左右时可获得最高灵敏度。分析了厚度对阴极灵敏度的影响, 对于特定波长入射光, 存在最佳厚度使对应波长的灵敏度最高, 且由于内建电场的影响, 不同掺杂离子浓度会使最佳厚度有所不同, 当内建电场较强时, 阴极的最佳厚度增大。对 700 nm 入射光, 在掺杂离子浓度为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  以及  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时, 最佳厚度分别为 80 nm 和 200 nm。

**关键词** 光电子学; 多碱光电阴极; 掺杂离子浓度; 灵敏度; 电子扩散距离

**中图分类号** O462.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0331001

## Simulation of Multi-Alkali Photocathode Sensitivity

An Yingbo<sup>1,2</sup> Xu Xiangyan<sup>1</sup> Sun Qiaoxia<sup>1,2</sup> Cao Xibin<sup>1</sup> Wen Wenlong<sup>1</sup>  
Wang Junfeng<sup>1</sup> Liu Hulin<sup>1</sup> Lu Yu<sup>1</sup> Tian Jinshou<sup>1</sup> Li Xiaofeng<sup>3</sup> Li Yanhong<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup> Science and Technology on Low-Light-Lever Night Vision Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710059, China

**Abstract** Modeling and simulation of multi-alkali photocathode have been studied. The structure of photocathode is employed with layered model:  $\text{Na}_2\text{KSb} + \text{K}_2\text{CsSb} + \text{Sb} \cdot \text{Cs}$  dipole layer. Effects of the thickness and doping concentration of each layer on the energy band and spectral response character have been discussed. The result shows that when the N-doping concentration in the  $\text{K}_2\text{CsSb}$  and  $\text{Sb} \cdot \text{Cs}$  layers is heavier, it can effectively lower the electron affinity, which will be helpful to the transport and escape of the photoelectron. The doping concentration of  $\text{Na}_2\text{KSb}$  is not that the higher the better, which comes from the effect of doping concentration on build-in electric field intensity and range. The diffuse distance of electron will get further when under higher build-in electric field intensity, which can make electron have higher probability to reach the surface of photocathode. The highest sensitivity is got when doping concentration is about  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Influence of thickness on sensitivity is analysed, for a certain wavelength incident light, there exists the optimum thickness. Under the impact of the build-in electric field, different doping concentrations have the corresponding thickness. With higher build-in electric field, the optimum thickness enhanced, meanwhile. For 700 nm incident light, when doping concentration is  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  or

**收稿日期**: 2013-09-06; **收到修改稿日期**: 2013-11-01

**基金项目**: 国家自然科学基金(11274377)

**作者简介**: 安迎波(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事超快诊断技术、光电成像技术方面的研究。

E-mail: aybbobo@163.com

**导师简介**: 徐向晏(1973—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事超快诊断技术、光电成像技术等方面的研究。

E-mail: xuxy@opt.ac.cn

$10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , the optimum thickness is 80 nm or 200 nm, respectively.

**Key words** optoelectronics; multi-alkali photocathode; doping concentration; sensitivity; electron diffuse distance

**OCIS codes** 310.6845; 240.6310; 230.5160

## 1 引 言

多碱光电阴极(简称多碱阴极)灵敏度较高,目前国际上已经达到  $960 \mu\text{A}/\text{lm}$ 。虽然灵敏度低于 GaAs 阴极,但多碱阴极制作工艺简单、真空度要求低、成本相对低廉,并且可以在平面或曲面玻璃等透明窗口表面上制作,因此在光电倍增管、像增强器等真空光电器件中得到广泛应用;由于响应速度极快( $10^{-13} \sim 10^{-14} \text{ s}$ ),在超快诊断领域也有着不可替代的地位<sup>[1-3]</sup>。美国芝加哥大学、阿贡国家实验室近年在大面积皮秒探测器(LAPPD)的研发工作中,正在进行 8 inch(1 inch=2.54 cm)球形光电倍增管高性能多碱阴极制作的工艺研究;日本滨松公司的大量探测器、条纹相机均采用多碱阴极。

根据三步光电发射模型,多碱阴极光电发射过程分为阴极膜层吸收光子并激发电子跃迁;光电子从激发位置扩散到真空界面;电子克服表面势垒逸出三个过程。为了提高多碱阴极的效率,应该减少上述三个过程中的能量损失,以往采用的方法<sup>[4]</sup>包括:

- 1) 使用高纯的材料,减小杂质散射复合几率,增大光电子扩散长度;
- 2) 优化阴极厚度,使阴极光吸收与电子输运长度之间取得较好的权衡;
- 3) 优化材料组份及其制作工艺,减少阴极晶格缺陷,降低电子在输运过程中的散射几率;
- 4) 优化激活工艺,降低表面亲和势;
- 5) 阴极衬底上制作增透层,减少入射光反射损失,增加光吸收<sup>[5]</sup>;
- 6) 使透过阴极未吸收的光子再次被吸收。

尽管经过多年研究,但到目前为止,对多碱阴极的确切组分、结构及光电发射物理机理仍然没有明确的结论,而在工艺中过度依赖于以往的经验,理论方面的研究鲜有报道,理论对工艺指导不足,这严重阻碍了多碱阴极性能的提高。分析阴极参量对性能的影响,并进行理论优化非常必要。

本课题组对多碱光电阴极性能进行了理论建模及模拟研究。通过对各层厚度、掺杂离子浓度对多碱阴极能带和光谱响应特性的影响进行分析讨论,并进行相应的优化,从而获得灵敏度的提升,为实际的工艺改进提供理论参考。理论模拟通过

Crosslight 半导体仿真软件 APSYS 进行。本文中,暂且只考虑内量子效率,即光吸收激发光电子、电子输运至阴极发射面的过程(未逸出)中的效率。输运至发射面的电子中,能量高于表面势垒的电子将有较大的几率逸出表面进入真空而发射。因此所研究的内量子效率直接影响外量子效率,关于光电子逸出界面向真空发射的问题将另作研究。

## 2 多碱阴极厚度对灵敏度的影响

光电阴极分为反射式阴极和透射式阴极,出于实际应用中光路设置的原因,多碱阴极大多为透射式阴极。作为透射式阴极使用时,光由衬底一侧入射,经过衬底入射至阴极膜层,在阴极中被吸收并激发光电子,光电子输运至阴极-真空界面,能量较高的可以克服表面势垒向真空发射。在阴极膜层中不同位置被吸收的光辐射产生的电子,其输运至发射界面的距离不同,阴极的最佳厚度应该权衡考虑光吸收和光电子的扩散距离。如图 1 所示,其中  $E_v$  为真空能级,  $E_-$  为导带底,  $E_F$  为费米能级,  $E_+$  为价带顶,  $E_A$  为电子亲和势。

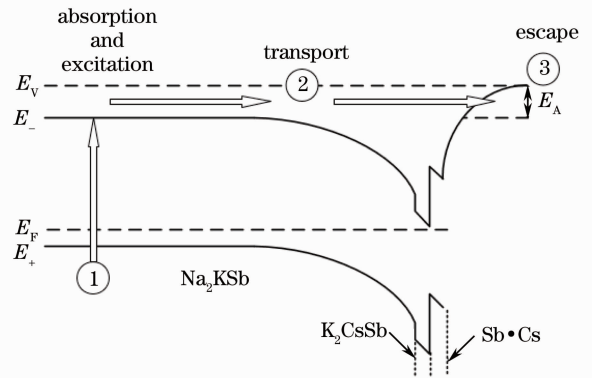


图 1 多碱阴极能带结构及三步发射示意图

Fig. 1 Energy band structure of multi-alkali photocathode and the three step model

多碱阴极对光辐射的吸收系数随波长增加近似呈指数下降。传统的  $S_{20}$  阴极厚度在 40 nm 左右,其短波响应较高,长波响应较低。因为短波吸收系数大,薄的阴极即有较大的吸收,且输运距离短,大部分光电子可以扩散到阴极表面并逸出。而长波吸收系数较低,需要较厚的阴极才能获得较大的光吸收,而且光电子输运至界面的距离长,效率低。

后来发展的多碱阴极如 S<sub>25</sub>, Super S<sub>25</sub> 等,厚度在 100 nm 以上,通过增加厚度来提高长波响应。但是短波激发的光电子更靠近衬底-阴极界面,需要运输较长的距离才能逸出真空,在运输的过程中会受到各种散射机制的影响而降低光电子扩散长度,致使光电子逸出几率降低,因此短波响应降低<sup>[6]</sup>,如图 2 所示,其中  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  分别表示短波和长波入射光及电子运输长度。因此通过折中考虑阴极吸收过程和扩散过程,可获得最佳厚度,使阴极灵敏度较高,并可根据不同的入射光波长调整厚度,获得所需的光谱匹配峰值灵敏度波长。

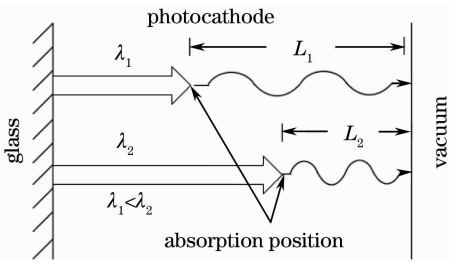


图 2 阴极吸收位置与跃迁距离示意图  
Fig. 2 Diagram of the absorption position and transition distance

### 3 模型建立

一般认为,多碱阴极是由以 Na<sub>2</sub>KSb(Cs)膜层为主构成的多晶结构半导体阴极,典型厚度在 100 nm 左右,立方晶格结构,晶格常数为 0.7727 nm,最大量子产额 30%左右,属于 p 型直接带隙半导体<sup>[3,7]</sup>。关于多碱阴极的结构模型,存在几种不同的观点,而且多碱阴极并不能看作是一块组分均匀的化合物,其结构由制作过程中多种成分蒸发化合的工艺过程以及与基底的反应决定。经过几十年的研究,实验上仍不能完全确定其具体结构。现在普遍较为接受的结构模型为层状结构:Na<sub>2</sub>KSb + K<sub>2</sub>CsSb + Sb·Cs 偶极层,其吸收层为重掺杂铋的 Na<sub>2</sub>KSb,使其为 p 型,表面层为一定厚度(1~3 nm)的富铯 K<sub>2</sub>CsSb 和 Sb·Cs 偶极层,K<sub>2</sub>CsSb 为 n 型半导体,能带自内向外向下弯曲,这种情况降低了电子亲和势,有利于电子的逸出。由此建立的结构模型如图 3 所示。

模拟考虑衬底折射率对入射光的影响,取衬底为折射率 1.47 的玻璃。光由玻璃衬底一侧入射,经过玻璃后部分被阴极吸收,未被吸收的部分透过阴极。

三种材料的禁带宽度和电子亲和势<sup>[3,7]</sup>如表 1 所示。

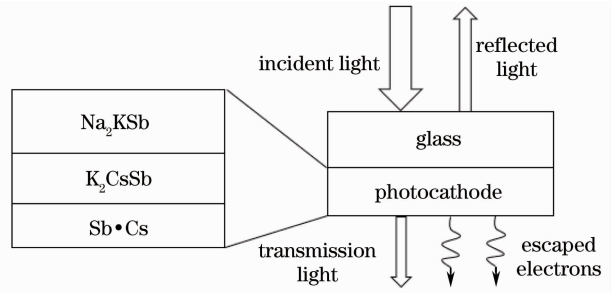


图 3 透射式多碱阴极结构模型  
Fig. 3 Structure model of transmission mode multi-alkali photocathode

表 1 阴极各层禁带宽度及亲和势  
Table 1 Energy gap and electron affinity of the photocathode materials

	Band gap /eV	Electron affinity /eV
Sb·Cs	1.67	0.47
K <sub>2</sub> CsSb	1.0	1.1
Na <sub>2</sub> KSb	1.0	1.0

Na<sub>2</sub>KSb、K<sub>2</sub>CsSb 的折射率  $n$  以及消光系数  $k$  已有文献<sup>[8-10]</sup>报道,由此可以计算复折射率系数以及吸收系数。

复数折射率  $n_c = n + ik$ ,复数介电常数  $\epsilon_c = n_c^2 = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ , $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  分别为介电常数的实部和虚部, $\epsilon_1 = n^2 - k^2$ , $\epsilon_2 = 2nk$ ,吸收系数为  $\alpha = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda}$ 。

吸收系数是光子能量  $h\nu$  的函数,假设总体吸收系数为

$$\alpha = a(h\nu - E_g)^b + c, \quad (1)$$

式中  $a, b, c$  为常量,对吸收系数进行拟合,如图 4 所示。

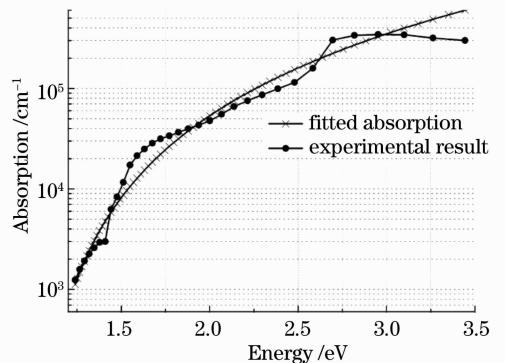


图 4 拟合吸收值与实验测定值对比  
Fig. 4 Comparison of the fitted absorption and experimental result

多碱阴极的性能对工艺非常敏感,其成分、结构也较为复杂,不同工艺制作的阴极其吸收系数可能有较大差异,这里的吸收系数只作为参考。

在 APSYS 软件中,采用二维有限元方法,以漂移-扩散模型和电子、空穴的电流连续方程为基础,联合泊松方程,用牛顿迭代法求解非线性方程,获得器件的电学与光学特性。

电流连续方程为

$$\nabla \cdot J_n - \sum_j R_n^j - R_{sp} - R_{st} - R_{au} + G_{opt}(t) = \frac{\partial n}{\partial t} + N_D \frac{\partial f_D}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot J_p + \sum_j R_p^j + R_{sp} + R_{st} + R_{au} - G_{opt}(t) = -\frac{\partial p}{\partial t} + N_A \frac{\partial f_A}{\partial t}, \quad (3)$$

泊松方程为

$$-\nabla \cdot \left( \frac{\epsilon_0 \epsilon_{dc}}{q} \nabla V \right) = -n + p + N_D(1 - f_D) - N_A f_A + \sum_j N_{ij}(\delta_j - f_{ij}), \quad (4)$$

式中  $J_n, J_p$  表示电子和空穴电流密度,  $J_n = n\mu_n \nabla E_{fn}, J_p = p\mu_p \nabla E_{fp}, R_n^j, R_p^j$  表示在第  $j$  个深势阱处电子和空穴的复合速率,  $G_{opt}$  为光生率,  $R_{sp}, R_{st}, R_{au}$  分别为自发复合、受激复合、俄歇复合速率,  $n, p$  分别为电子、空穴浓度,  $f_D, f_A$  分别为电子占据施主和空穴占据受主杂质的概率,  $N_D$  为浅施主能级,  $N_A$  为浅受主能级,  $\epsilon_0, \epsilon_{DC}$  分别为真空和直流或低频时的介电常数,  $V$  为电势,  $N_{ij}$  为第  $j$  个肖克利-霍尔(SRH)深势阱的密度,  $\delta_j$  在施主陷阱时为 1, 在受主陷阱时为 0,  $f_{ij}$  为电子占据第  $j$  个深能级势阱的概率。

模型为层状结构,每一层可认为是均匀的,电场全部是只有  $y$  方向分量,  $x$  方向分量为零,即电势函数对  $x$  偏导为 0,  $\frac{\partial V}{\partial x} = 0$ 。阴极无场助偏压,  $V_{y=0} = 0, V_{y=L} = V_{bi} = \int_0^L E(y) dy, L$  为阴极厚度,  $V_{bi}$  为内建电势差,  $E(y)$  为内建电场强度。

## 4 模拟结果及分析

阴极中各层的厚度、掺杂离子浓度对性能有重要影响,下面将通过模拟计算所得的能带结构与量子效率(QE)曲线,讨论这两个参数的影响。

### 4.1 表面层

阴极的表面层包括  $K_2CsSb$  和  $Sb \cdot Cs$  偶极层,这两层的主要作用为弯曲能带、降低表面亲和势,从而提高光电发射效率。

假设  $K_2CsSb$  和  $Sb \cdot Cs$  偶极层的厚度均为 2 nm,当两者的掺杂离子浓度在  $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  范围变化时,随着掺杂离子浓度的增大,能带弯曲度增大,表面亲和势降低,有利于光电子从界面逸出,使灵敏度有一定提升。这一效应可用于扩展长波阈值,使阴极的红外响应增强,扩大器件应用范围。这是由于形成了异质结,结区内建电场产生向下的能带弯曲,降低了有效亲和势<sup>[3]</sup>。

表 2  $K_2CsSb$  不同掺杂离子浓度下的有效亲和势

Table 2 Effective electron affinity at different doping concentrations of  $K_2CsSb$

Parameter	Value				
Doping concentration / $\text{cm}^{-3}$	$10^{16}$	$3 \times 10^{16}$	$10^{17}$	$3 \times 10^{17}$	$10^{18}$
$E_A / \text{eV}$	0.23	0.19	0.17	0.14	0.09

对于表面层的厚度,有几方面的因素需要考虑。表面层要达到一定厚度才能形成 n 型掺杂以及  $Sb \cdot Cs$  偶极层,降低表面亲和势;但表面层较厚时亲和势高,较薄时亲和势低;考虑到缩短光电子输运距离、降低能量损耗,表面层应该较薄。综合考虑以上几个方面的因素,才能充分发挥表面层的作用。根据上面掺杂离子浓度的计算,取  $K_2CsSb$  和  $Sb \cdot Cs$  偶极层掺杂离子浓度为  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,随着  $K_2CsSb$  和  $Sb \cdot Cs$  偶极层厚度从 2 nm 降低至 0.5 nm,能带弯曲量增大,亲和势小幅度增长,综合的等效量子效率有一定提升。但当厚度降低到两者均为 0.5 nm 时,对能带的弯曲作用饱和,表面亲和势增大,使量子效率出现下降趋势。实际工艺中,在较薄薄膜上制作重掺杂难度很大,为了保证铯能够渗入  $K_2CsSb$  层内,形成强 n 型,  $K_2CsSb$  应该具有一定的厚度。根据上面的分析,表面层的整体厚度应在 2 nm 左右,而且  $K_2CsSb$  厚度大于  $Sb \cdot Cs$  偶极层。  $Sb \cdot Cs$  偶极层为最后激活过程所产生的薄膜,厚度仅有几个原子层,会产生很高的势垒,在其厚度较薄时,电子隧穿几率较大,理论计算也证实了这一点。

### 4.2 吸收层

多碱阴极的吸收层为多晶结构的 p 型  $Na_2KSb$ ,一般认为提高其单晶性,或者提高单晶(准单晶)的百分比,并对其重掺杂铯,使费米能级的位置移到价带顶附近,可获得最大的光电发射。但随着掺杂离子浓度增大,导致晶格缺陷增加,降低电子寿命,电子迁移率和扩散长度减小,因此需要优化掺杂离子浓度,以获得最大的光电发射。

设表面层  $K_2CsSb$  厚度和  $Sb \cdot Cs$  偶极层厚度均为 1 nm,掺杂离子浓度均为  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,吸收层厚度

100 nm, 掺杂离子浓度从  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  降低到  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时, 能带变化如图 5 所示。随着掺杂离子浓度的降低, 势垒区增大, 内建电场影响范围扩张, 激发的光电子在内建电场作用下会同时做扩散和漂移运动, 电子扩散长度大大增加, 到达阴极表面的几率增大<sup>[11-14]</sup>, 同掺杂离子浓度下阴极内部的内建电场强度值如图 6 所示, 内量子效率变化如图 7 所示( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  与  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时很接近, 图像重叠在一起,  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时效率稍低)。当掺杂离子浓度在  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  左右时获得最大量子效率, 此时内建电场影响达到饱和, 掺杂离子浓度继续降低时量子效率变化很小。

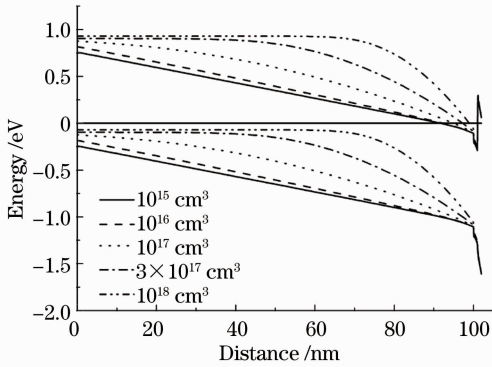


图 5 不同掺杂离子浓度下的能带图

Fig. 5 Energy band diagram at different doping concentrations

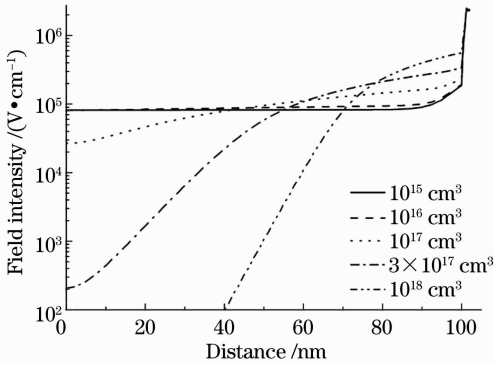


图 6 不同掺杂离子浓度下的内建电场强度

Fig. 6 Build-in electric field intensity at different doping concentrations

前面已经分析了阴极厚度对灵敏度的影响, 设吸收层掺杂离子浓度为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 当吸收层厚度从 40 nm 增加到 120 nm 时, 其内量子效率变化曲线如图 8 所示。基底掺杂离子浓度会改变内建电场, 内建电场增大时, 电子扩散长度增加, 使电子到达阴极表面的几率提升, 相对效率增大。其他条件不变, 改变吸收层掺杂离子浓度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 此时内量子效率随厚度变化曲线如图 9 所示。对比图 8 可得出: 1) 随

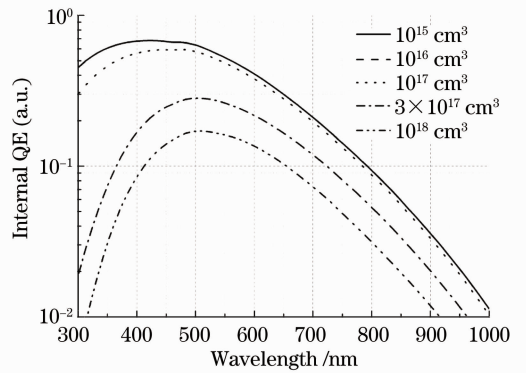


图 7 不同掺杂离子浓度下的内量子效率

Fig. 7 Internal quantum efficiency at different doping concentrations

着阴极厚度的增大, 阴极响应的峰值逐渐“红移”; 2) 对于特定波长的入射光存在最佳厚度使效率最高; 3) 当内建电场增大时, 阴极对应的最佳厚度随之增大。以 700 nm 入射光为例, 掺杂离子浓度为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$

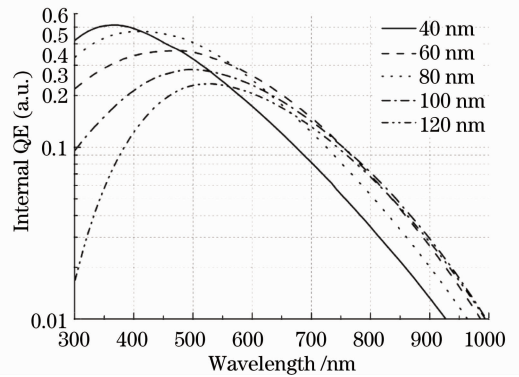


图 8 不同厚度时的内量子效率(掺杂离子浓度为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )

Fig. 8 Internal quantum efficiency at different thicknesses (doping concentration of  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )

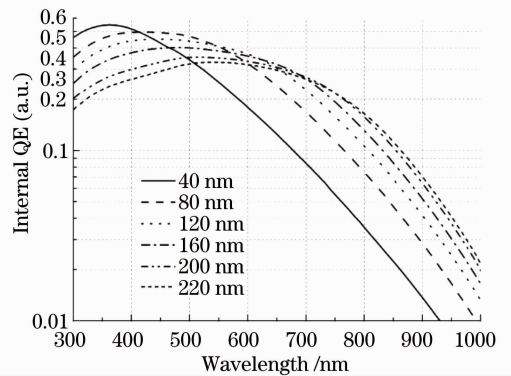


图 9 不同厚度时的内量子效率(掺杂离子浓度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )

Fig. 9 Internal quantum efficiency at different thicknesses (doping ion concentration is  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )

时,阴极厚度为80 nm时的灵敏度最高;当掺杂离子浓度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时,在阴极厚度为 200 nm 时灵敏度最高。因此,如果需提高阴极的长波响应,应该控制掺杂离子浓度,适当增加其厚度,有望提高长波灵敏度。

根据上述理论分析,在多碱阴极制作工艺过程中,需要适量掺杂和控制厚度,以获得最高的相对效率。在分析中,认为阴极各层均匀,各层界限明确。实际工艺制作过程中,钠、钾、铯、铷按照一定工艺流程蒸发,导致阴极内部可能存在多种材料,如  $\text{Na}_3\text{Sb}$ ,  $\text{K}_3\text{Sb}$ ,  $(\text{NaK})_3\text{Sb}$ (表示多种 Na, K 组分和为 3 的化合物),  $\text{Cs}_3\text{Sb}$  等<sup>[3,7]</sup>。一个良好的工艺应该使  $\text{Na}_2\text{KSb}$  的含量最多,其他化合物含量尽量少,晶格尽量完整,同时表面形成低电子亲和势的  $\text{K}_2\text{CsSb}$ 、 $\text{Sb} \cdot \text{Cs}$  偶极发射层。按照目前的工艺,掺杂离子浓度依靠监测光电流变化来大体、模糊地进行,或者依靠经验判断,难以准确控制,因此难以使阴极达到优化的掺杂离子浓度。将来发展的阴极工艺制作方法,应该在掺杂离子浓度监控、膜层厚度生长监控方面予以足够重视和改进,提高控制的精度,有望使阴极性能得到很大提升。

## 5 结 论

建立了多碱光电阴极的物理数值模型,采用  $\text{Na}_2\text{KSb} + \text{K}_2\text{CsSb} + \text{Sb} \cdot \text{Cs}$  偶极层结构模型,针对掺杂离子浓度、厚度两个影响阴极性能较大的参量进行了模拟计算和分析,结果显示,表面层可以降低电子亲和势,而且掺杂离子浓度越高,效果越好,工艺制作过程中应在保证其重掺杂的基础上使表面层尽量薄。

阴极内建电场会随着掺杂离子浓度的变化而变化,激发光电子在内建电场作用下会同时做扩散和漂移运动,扩散距离大大增加。当吸收层掺杂离子浓度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  左右时可以获得最大内量子效率。分析了厚度对阴极灵敏度的影响,计算了阴极厚度在 40 ~ 120 nm 范围内时的内量子效率。对于特定波长入射光,存在最佳厚度使对应波长的灵敏度最高。由于内建电场的影响,不同掺杂离子浓度下最佳厚度不同,当内建电场较强时,电子扩散距离增大,阴极的最佳厚度同时增大。在吸收层工艺制备中,应保证阴极中 Sb 过量,形成适度 p 型掺杂半导体。

## 参 考 文 献

- 1 W E Spicer, A Herrera-Gómez. Modern theory and applications of photocathodes [C]. SPIE, 1993, 2022: 1-16.
- 2 Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Peng Xiang, *et al.*. Design of an X-ray framing camera with wide microstrip line [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0117001.  
蔡厚智, 刘进元, 彭翔, 等. 宽波段 X 射线分幅相机的研制 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0117001.
- 3 Chang Benkang. Multialkali Photocathode [M]. Beijing: Weapons Industry Press, 2011.  
常本康. 多碱光电阴极[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2011.
- 4 Razmick Mirzoyan, Florian Goebel, *et al.*. Enhanced quantum efficiency bialkali photo multiplier tubes [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 572(1): 449-453.
- 5 S W Harmer, P D Townsend, N J Bowring. Enhancement of photomultiplier sensitivity with anti-reflective layers [J]. J Phys D: Appl Phys, 2012, 45(5): 055102.
- 6 Chang Benkang. A study of spectral response characterization on S-25 and new S-25 photocathode [J]. Acta Optica Sinica, 1992, 12(3): 279-283.  
常本康. S-25 与 New S-25 光阴极光谱响应特性的研究[J]. 光学学报, 1992, 12(3): 279-283.
- 7 A H Sommer. Photoemissive Materials, Preparation, Properties, and Uses [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1968. 125-140.
- 8 S Hallensleben, S W Harmer, P D Townsend. Optical constants for the S20 photocathode, and their application to increasing photomultiplier quantum efficiency [J]. Opt Commun, 2000, 180(1-3): 89-102.
- 9 S W Harmer, R Downey, Y Wang, *et al.*. Variation in optical constants between photocathodes [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006, 564(1): 439-450.
- 10 D Motta, S Schonert. Optical properties of bialkali photocathodes [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2005, 539(1-2): 217-235.
- 11 Du Xiaoqing, Chang Benkang, Zou Jijun, *et al.*. High quantum efficiency GaAs photocathode by gradient doping [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(10): 1411-1414.  
杜晓晴, 常本康, 邹继军, 等. 利用梯度掺杂获得高量子效率的 GaAs 光电阴极[J]. 光学学报, 2005, 25(10): 1411-1414.
- 12 Chen Liang, Qian Yunsheng, Chang Benkang, *et al.*. Research on surface photovolt age spectroscopy for exponential doping transmission-mode GaAs photocathodes [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 144-148.  
陈亮, 钱芸生, 常本康, 等. 指数掺杂透射式 GaAs 光电阴极表面光电电压谱研究[J]. 中国激光, 2011, 28(9): 144-148.
- 13 Zhang Yijun, Niu Jun, Zhao Jing. Effect of exponential-doping structure on quantum yield of transmission-mode GaAs photocathodes [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 067301.  
张益军, 牛军, 赵静. 指数掺杂结构对透射式 GaAs 光电阴极量子效率的影响研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 067301.
- 14 Li Biao, Xu Yuan, Chang Benkang, *et al.*. Cleaning of gradient-doping GaN photocathode surface [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0417001.  
李飙, 徐源, 常本康, 等. 梯度掺杂结构 GaN 光电阴极表面的净化[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0417001.

栏目编辑: 韩峰