

# In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 光电探测器量子效率的理论仿真分析

李丹妮 徐英添\* 徐 莉 邹永刚 张 贺 李 洋 赵 鑫 马晓辉 侯林宝

长春理工大学, 吉林 长春 130022

**摘要** 研究了材料参数对 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 光电探测器量子效率的影响。分析发现量子效率的变化主要取决于入射光的方向, P区与N区载流子浓度以及各区的表面复合速度和厚度。当光从P区入射时, P区载流子的表面复合速度、载流子浓度以及厚度对量子效率均产生极大的影响。N区材料参数对量子效率也有轻微的影响。在高载流子浓度范围内( $n > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), 表面复合速度和厚度是主要影响因素。当光从N区入射时, 载流子浓度  $n < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时, N区表面复合速度为影响量子效率的主要因素; 而当载流子浓度  $n > 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时, 对量子效率产生影响的主要因素为材料厚度。

**关键词** 探测器; 光电探测器; In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As; 量子效率; 材料参数

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1204002

## Theoretical Simulation Analysis the Quantum Efficiency of In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As Photodetectors

Li Danni Xu Yingtian Xu Li Zou Yonggang Zhang He Li Yang Zhao Xin  
Ma Xiaohui Hou Linbao

Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Influence of material parameters on quantum efficiency of In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As photodetector is presented. The results show that the quantum efficiency mainly depends on the direction of incident light, the carrier concentrations of P-region and N-region, and the surface recombination velocities and the thickness of each region. When light is injected from P-side, the surface recombination velocity, carrier concentration and thickness of P-region have significant impact on the quantum efficiency. The material parameters of N-region have slight impact on quantum efficiency. Under condition of high carrier concentration ( $n > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), the surface recombination velocity and thickness are major factors. When light is injected from N-side, the surface recombination velocity of N-region is the major factor of quantum efficiency, if the carrier concentration is less than  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; the material thickness is the major factor of quantum efficiency, if the carrier concentration is more than  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

**Key words** detectors; photodetectors; In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As; quantum efficiency; material parameters

**OCIS codes** 040.5570; 020.5580; 140.5965

## 1 引 言

所有物体均发射与其温度和特性相关的热辐射, 环境温度附近物体的热辐射大多位于红外波段。红外辐射向人们提供了客观世界的丰富信息, 充分利用这些信息是人们追求的目标。将不可见的红外辐射转换成可测量信号的器件就是红外探测器。In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 与 InP 具有相同的晶格常数, 其在室温下的能带宽度为 0.73 eV, 相对应的截止波长为  $1.70 \mu\text{m}^{[1-3]}$ 。应用 InGaAs( 铟镓砷) 化合物制成的光伏探测器在近红外的应用已经引起人们广泛的关注, 如光纤通信, 光谱分析与遥感以及人眼安全距离测距等<sup>[4-8]</sup>。目前, 关于量子效率和材料特征参数之间关系的报告较少。本文应用计算机模拟对 InGaAs 光伏型红外探测器的材料参数和器件结构进行了系统的分析。详细地分析和研究了探测器量子效率性能参数与半导体材料参数之间的关系。

收稿日期: 2015-5-12; 收到修改稿日期: 2015-7-16

基金项目: 吉林省重大科技成果转化项目(20130303017GX)、吉林省重点科学技术研究项目(20140204028GX)

作者简介: 李丹妮(1982—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: 8669979@qq.com

\*通信联系人。E-mail: xuyingtian\_007@aliyun.com

## 2 理论分析

图1为  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  同质结探测器的结构,为探测器的一维模型,入射光可以分别从P区和N区注入。

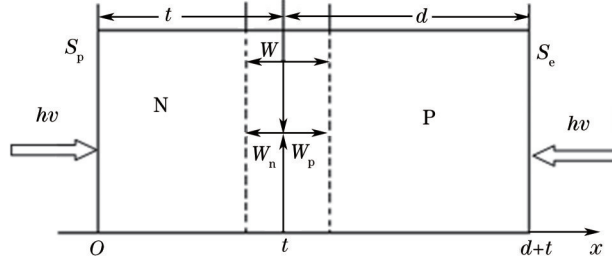


图1 InGaAs探测器的简单结构

Fig.1 Simple structure of InGaAs detector

分析量子效率主要有五个基本方程<sup>[9]</sup>:两个电流密度方程,两个分别代表P区与N区的电子和空穴的连续性方程以及泊松方程。当入射光从N区注入时,不同区的光电流密度也不同,它们由(1)式给出<sup>[10]</sup>:

$$J_{n,ph} = \frac{\alpha q L_h (1-r) \Phi}{(\alpha^2 L_h^2 - 1)} \left\{ \frac{(r_h + \alpha L_h) \exp[-\alpha(t - W_n)] \left[ r_h \operatorname{ch}\left(\frac{t - w_n}{L_h}\right) + \operatorname{sh}\left(\frac{t - w_n}{L_h}\right) \right] - \alpha L_h \exp[-\alpha(t - W_n)]}{r_h \operatorname{sh}\left(\frac{t - w_n}{L_h}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{t - w_n}{L_h}\right)} \right\}, \quad (1)$$

$$J_{p,ph} = \frac{\alpha q L_c (1-r) \Phi}{(\alpha^2 L_c^2 - 1)} \exp[-\alpha(t + W_p)] \left\{ \alpha L_c + \frac{(r_c - \alpha L_c) \exp[-\alpha(d - W_p)] - \left[ r_c \operatorname{ch}\left(\frac{d - w_p}{L_c}\right) + \operatorname{sh}\left(\frac{d - w_p}{L_c}\right) \right]}{r_c \operatorname{sh}\left(\frac{d - w_p}{L_c}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{d - w_p}{L_c}\right)} \right\}, \quad (2)$$

$$J_{dr,ph} = q \Phi (1-r) \left\{ \exp[-\alpha(t - W_n)] - \exp[-\alpha(t + W_p)] \right\}, \quad (3)$$

式中  $J_{n,ph}$ ,  $J_{p,ph}$ , 以及  $J_{dr,ph}$  分别代表N区、P区和耗尽区的光电流密度。 $\alpha$ 、 $\Phi$ 、 $r$  分别代表了吸收系数、光通量和反射系数。 $r_i = L_i S_i / D_i$ , 下角标  $i$  为  $e$  或  $h$ 。 $L$ 、 $S$ 、 $D$  分别表示扩散长度、表面复合速度和扩散系数。

在稳态下,总电流密度  $J_{ph}$  与总量子效率  $\eta$  的关系如(4)式所示<sup>[11]</sup>:

$$J_{ph} = \eta q \Phi, \quad (4)$$

式中  $J_{ph}$  为  $J_{n,ph}$ ,  $J_{p,ph}$ ,  $J_{dr,ph}$  的总和。

P区、N区和耗尽区的量子效率都可推导得到,即:

$$\eta_n = \frac{\alpha L_h (1-r)}{(\alpha^2 L_h^2 - 1)} \left\{ \frac{(r_h + \alpha L_h) \exp[-\alpha(t - W_n)] \left[ r_h \operatorname{ch}\left(\frac{t - w_n}{L_h}\right) + \operatorname{sh}\left(\frac{t - w_n}{L_h}\right) \right] - \alpha L_h \exp[-\alpha(t - W_n)]}{r_h \operatorname{sh}\left(\frac{t - w_n}{L_h}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{t - w_n}{L_h}\right)} \right\}, \quad (5)$$

$$\eta_p = \frac{\alpha L_c (1-r)}{(\alpha^2 L_c^2 - 1)} \exp[-\alpha(t + W_p)] \left\{ \alpha L_c + \frac{(r_c - \alpha L_c) \exp[-\alpha(d - W_p)] - \left[ r_c \operatorname{ch}\left(\frac{d - w_p}{L_c}\right) + \operatorname{sh}\left(\frac{d - w_p}{L_c}\right) \right]}{r_c \operatorname{sh}\left(\frac{d - w_p}{L_c}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{d - w_p}{L_c}\right)} \right\}, \quad (6)$$

$$\eta_{dr} = (1-r) \left\{ \exp[-\alpha(t - W_n)] - \exp[-\alpha(t + W_p)] \right\}, \quad (7)$$

$$\eta = \eta_n + \eta_p + \eta_{dr}, \quad (8)$$

如果光从P区注入,则P区、N区和耗尽区的量子效率与(5)~(7)式相同。但是相应的参数符号应该改变,即  $n \rightarrow p$ ,  $r_e \rightarrow r_h$ ,  $L_e \rightarrow L_h$ ,  $W_p \rightarrow W_n$ ,  $t \rightarrow d$ ,  $p \rightarrow n$ ,  $r_h \rightarrow r_e$ ,  $L_h \rightarrow L_e$ ,  $W_n \rightarrow W_p$ ,  $d \rightarrow t$ 。

### 3 结果与分析

首先,分析光从P区注入时各种材料参数对量子效率的影响。图2所示在不同 $S_c$ 的情况下,量子效率随P区载流子浓度的变化曲线。在模拟计算中,电子和空穴的迁移率分别为 $\mu_e=5000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 和 $\mu_p=400\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ;P区和N区材料的厚度为 $d=5\text{ }\mu\text{m}$ , $t=5\text{ }\mu\text{m}$ ;N区表面的复合速度 $S_p=0$ ;入射光波长 $\lambda=1.63\text{ }\mu\text{m}$ 。结果表明,在 $p=10^{17}\sim 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 范围内,随着表面复合速度增加,量子效率逐步降低;并且,在 $p>10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ,以及 $S_c\leq 10^4\text{ m/s}$ 时,量子效率快速降低。

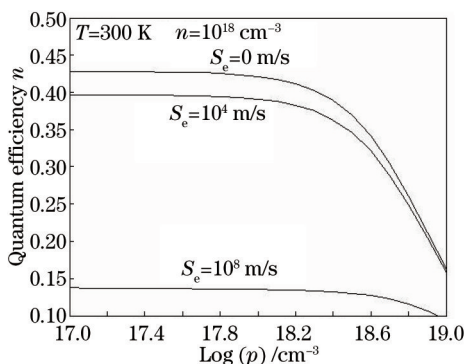


图2 量子效率随P区表面复合速度与载流子浓度的变化( $\mu_e=5000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p=400\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $t=5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ )

Fig.2 Change of quantum efficiency with carrier concentration and surface combination velocity of P-region

$$(\mu_e=5000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}, \mu_p=400\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}, d=5\text{ }\mu\text{m}, t=5\text{ }\mu\text{m}, S_p=0)$$

图3表明了量子效率在不同P区厚度 $d$ 情况下随着载流子浓度的变化。在计算过程中,除了图中所示的参数以外,其他参数与图2中相同。由图可知,当 $p<10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 时,量子效率随着P区厚度 $d$ 的增加而增加,量子效率在 $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的变化比在 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的变化更为明显。为了进一步探讨量子效率和P区厚度的关系,图4给出了在不同 $S_c$ 的条件下,量子效率随厚度的变化曲线。在初始阶段,量子效率随着 $d$ 的增大而增加,并且在不同 $S_c$ 的情况下达到各自的最大值。随后在 $S_c=0$ 的条件下,量子效率趋向于恒定值,但是在其他 $S_c$ 条件下,量子效率都逐渐减小。在 $S_c=0$ ,  $d>9\text{ }\mu\text{m}$ 这一特定条件下,可以得到最高的量子效率。而对于 $S_c\neq 0$ ,只有P区在特定厚度时,量子效率才能得到最大值。图5和图6分别表明了量子效率随着N区参数的变化。结果表明,在N区低载流子浓度时,量子效率主要受 $S_p$ 和 $t$ 的影响。

此外,研究了入射光从N区注入时材料参数对量子效率的影响。除了图中所给的参数,其他参数与光从P区注入时相同。图7表示了以P区厚度和表面复合速度作为参数,量子效率的变化曲线;表面复合速度对量子效率的影响主要出现在P区厚度比较大的情况下。图8表示了对于不同的 $S_c$ ,量子效率和N区载流子浓度二者之间的关系。由图可知,在 $n<10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 时,量子效率主要受到表面复合速度的影响。图9所示为量子效率随

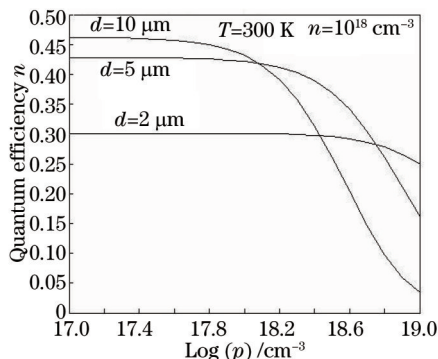


图3 量子效率随载流子浓度和P区厚度的变化( $\mu_e=5000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p=400\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $t=5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ ,  $S_c=0$ )

Fig.3 Dependence of quantum efficiency on carrier concentration and thickness of P-region ( $\mu_e=5000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p=400\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $t=5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ ,  $S_c=0$ )

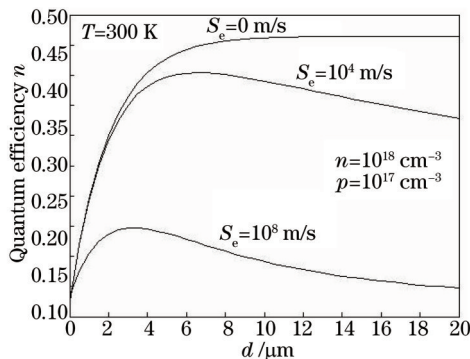


图4 量子效率与P区厚度以及P区表面复合速度之间的关系( $\mu_e=5000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p=400\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $t=5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ )

Fig.4 Relation between quantum efficiency and P-region thickness with surface combination velocity of P-region as a parameter ( $\mu_e=5000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p=400\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $t=5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ )

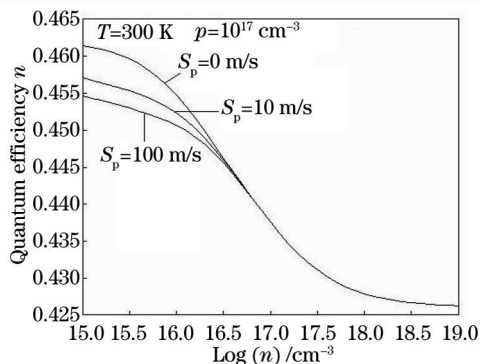


图5 量子效率随载流子浓度和N区表面复合速度的变化 ( $\mu_e = 5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $t=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_e=0$ )

Fig.5 Change of quantum efficiency with carrier concentration and surface combination velocity of N-region ( $\mu_e = 5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $t=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_e=0$ )

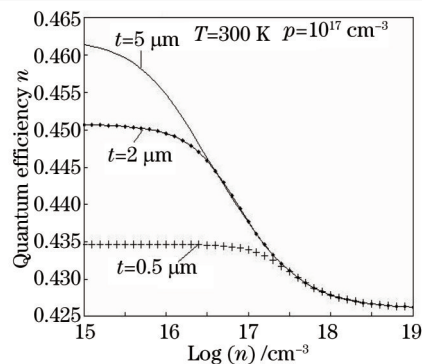


图6 量子效率随载流子浓度与N区厚度的关系曲线 ( $\mu_e = 5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ ,  $S_e=0$ )

Fig.6 Dependence of quantum efficiency on carrier concentration and thickness of N-region ( $\mu_e = 5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ ,  $S_e=0$ )

N区载流子浓度和厚度  $t$  的变化趋势。从图中可以看到,量子效率的变化情况比较复杂,在  $n > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时,量子效率随  $t$  的增加而降低。根据以上的模拟分析可以得到如下结论:在相同的参数情况下,光从P区入射时的量子效率要比光从N区入射时的量子效率高。这是因为光生载流子的传输主要是少数载流子的扩散作用产生

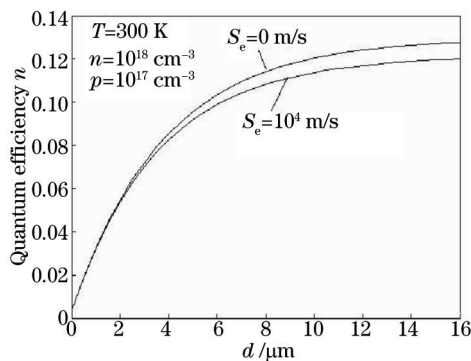


图7 P区厚度和表面复合速度对量子效率的影响 ( $\mu_e = 5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $t=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ )

Fig.7 Relation between quantum efficiency and P-region thickness with  $S_e$  as a parameter when the light comes from N-region ( $\mu_e = 5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $t=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ )

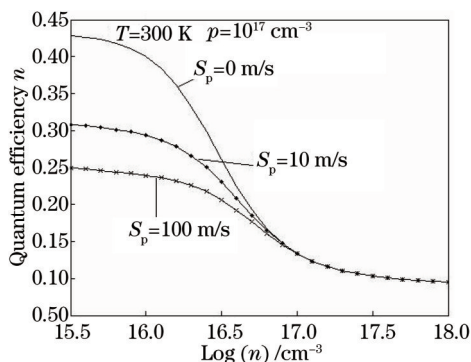


图8 光从N区入射时,量子效率与N区载流子浓度、表面复合速度的关系曲线 ( $\mu_e = 5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $t=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_e=0$ )

Fig.8 Change of quantum efficiency with carrier concentration and surface combination velocity of N-region when the light comes from N-region ( $\mu_e = 5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $t=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_e=0$ )

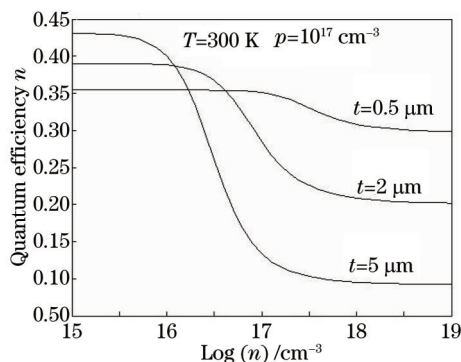


图9 光从N区入射时,量子效率与N区载流子浓度、厚度的关系曲线 ( $\mu_e = 5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ ,  $S_e=0$ )

Fig.9 Dependence of quantum efficiency on carrier concentration and thickness of N-region when the light comes from N-region ( $\mu_e = 5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $d=5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p=0$ ,  $S_e=0$ )

的。通常情况下, P区电子的扩散长度要比P区的厚度大, 并且电子的寿命也很长。这使得复合的概率相对较小, 因为P区电子得到充分扩散, 而不是迅速产生载流子复合, 使得更多的载流子到达有源区, 进而提高了量子效率。但是, N区空穴的扩散长度与N区的厚度接近, 并且空穴的寿命相对较短, 这使得空穴没有到达P—N结之前, 多数的空穴就已经复合掉了, 于是到达有源区的载流子数量比较少, 进而量子效率比较低。换句话说, 当光从P区入射, 在P区的准中性区内, 光充分的吸收; 而当光从N区入射时, 在N区光就先开始减弱, 这使得到达P区的光较少, 吸收也相对较少一些。因此降低了量子效率。

## 4 结 论

理论分析了  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  光电探测器量子效率受到载流子浓度, 表面复合速度, P、N区厚度以及入射光方向等因素的影响。选择最佳的材料参数和从P区注入入射光可以获得更高的量子效率。分析结果表明, 当光从P区入射时, 在  $n < 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时, 量子效率主要受  $S_s$  和  $t$  的影响。当  $S_s \neq 0$  时, 适当的厚度  $d$  可以获得更高的量子效率。

## 参 考 文 献

- 1 Jin Lufan, Zhang Yating, Wang Haiyan, *et al.*. Acceleration aging of InGaAs PIN photoelectric detectors[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1008002.  
金露凡, 张雅婷, 王海艳, 等. InGaAs PIN 光电探测器的加速老化研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1008002.
- 2 Liu Yang, Li Lin, Qiao Zhongliang, *et al.*. Optical characteristics of 1.06  $\mu\text{m}$  InGaAs/GaAs quantum well grown by MOCVD [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1106001.  
刘 洋, 李 林, 乔忠良, 等. MOCVD 生长 1.06 $\mu\text{m}$  波段 InGaAs/GaAs 单量子阱材料的发光特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1106001.
- 3 Xu Yingtian, Li Ying, Long Beihong, *et al.*. Studying the influence of material parameters on quantum efficiency of In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As photovoltaic detector[J]. Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications, 2012, 6(11-12): 1009-1014.
- 4 Yuan Huibo, Li Lin, Qiao Zhongliang, *et al.*. Optical characteristics of GaAsP/GaInP quantum well grown by metal-organic chemical vapor deposition[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5):0506002.  
苑汇帛, 李 林, 乔忠良, 等. MOCVD 生长 GaAsP/GaInP 量子阱材料的发光特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0506002.
- 5 Duan Xiaofeng, Huang Yongqing, Ren Xiaomin, *et al.*. High-efficiency InGaAs/InP photodetector incorporating SOI-based concentric circular subwavelength gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(10): 863-865.
- 6 Liu Shaoqing, Han Qin, Zhu Bin, *et al.*. Tunable metamorphic resonant cavity enhanced InGaAs photodetectors grown on GaAs substrates [J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(3): 38501.
- 7 Zhao Fang, Zhang Yunyan, Song Jingjing, *et al.*. High internal quantum efficiency blue light-emitting diodes with triangular shaped InGaN/GaN multiple quantum wells [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(1): 66-72.  
赵 芳, 张运炎, 宋晶晶, 等. 具有三角形 InGaN/GaN 多量子阱的高内量子效率的蓝光 LED[J]. 发光学报, 2013, 34(1): 66-72.
- 8 Li Guobin, Chen Changshui, Liu Songhao. The effects of In content on the LED photoelectric performance InGaN/GaN [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(9): 1233-1239.  
李国斌, 陈长水, 刘颂豪. In 含量对 InGaN/GaN LED 光电性能的影响[J]. 发光学报, 2013, 34(9):1233-1239.
- 9 Zhao Xu, Miao Guoqing, Zhang Zhiwei, *et al.*. Structural design and optimization of novel composite cap extended wavelength InGaAs infrared detector[J]. Chinese Journal Luminescence, 2015, 36(1):75-79.  
赵 旭, 缪国庆, 张志伟, 等. 新型复合盖层延伸波长 InGaAs 红外探测器结构优化设计[J]. 发光学报, 2015, 36(1):75-79.
- 10 Wang Hongpei, Wang Guanglong, Qiu Peng, *et al.*. Design and characteristics analysis of single photon detector based on quantum-dot field effect transistor [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0118001.  
王红培, 王广龙, 邱 鹏, 等. 量子点场效应晶体管单光子探测器的设计与特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0118001.
- 11 Lian Ruikai, Li Lin, Fan Yaming, *et al.*. Effects of AlN buffer layer thickness and Al pre-treatment on properties of GaN/Si(111) epilayer [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0106001.  
廉瑞凯, 李 林, 范亚明, 等. 预辅 Al 及 AlN 缓冲层厚度对 GaN/Si(111) 材料特性的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0106001.

栏目编辑: 刘丰瑞