

# 双梯度掺杂漂移机制 InP/ GaP 光二极管

李果华<sup>1,3</sup> 孙艳宁<sup>2</sup> 严 辉<sup>3</sup> Aristo Yulius<sup>2</sup> Jerry M Woodall<sup>2</sup>

(1 江南大学理学院光信息科学与技术系, 无锡 214122)

(2 耶鲁大学电子工程系, New Haven CT 06520, USA)

(3 北京工业大学量子材料实验室, 北京 100022)

**摘要:** 设计了双梯度掺杂漂移机制 InP/ GaP 光二极管, 研究了由于晶体不匹配所造成的缺陷以及这些缺陷对器件性能的影响. 结果表明 InP/ GaP 光二极管具有很好的光谱响应和抗辐射特性, 特别是在短波方向有高于 80% 的内量子效率. 这说明在双梯度掺杂漂移机制结构中使用晶格不匹配的衬底时, 外延晶体中所产生的缺陷对器件性能的影响较小, 器件在有大量缺陷和复合中心存在的情况下仍然可以具有较好的光电特性, 从而为在强辐射带轨道运行的航天器使用太阳能电池以及 InP/ Si 器件技术提供了很好的设计依据.

**关键词:** InP; 漂移机制; 光二极管; 太阳能电池

**PACC:** 7280E; 7360F

**中图分类号:** TN312<sup>+</sup>.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2005)02-0354-03

## 1 引言

由于 InP 材料具有高载流子迁移率, 对大于其禁带宽度的光子的吸收系数很大以及出众的抗辐射能力<sup>[1]</sup>, 因此在太阳能电池、光探测器、HB T (hetero-junction bipolar transistor) 和 HEMT (high electron mobility transistor) 等光电器件方面有重要应用. 但 InP 材料也存在一些弱点妨碍其得到更迅速和更广泛的应用, 如机械强度低、质量密度大以及价格昂贵等. 因此, 很多研究都集中在将 InP 器件外延或“移植”到诸如 Si 这样廉价的衬底上, 以克服上述缺点. 由于 Si 与 III-V 族化合物半导体的晶格常数不匹配, 因此研究较多地集中在如何减少由于晶格不匹配而产生的大量缺陷<sup>[2,3]</sup>. 此外, 对于一些特殊用途, 如航天器用太阳能电池, 还要解决 Si 与 III-V 族化合物半导体在热胀系数上存在较大差异而带来的问题<sup>[4]</sup>. 本文试图从另外一个角度出发, 着重对器件本身设计的改进来从根本上提高器件的内在质量, 使其较少受到由于晶格不匹配而产生的大量缺陷对器件性能的影响. 由于 GaP 与 Si 晶格匹配, 我们期望用 GaP 作为 Si 和 InP 之间的缓冲层. 作为第一步, 我们以 GaP 为衬底, 研究由于这种晶格不匹配所造成的缺

陷的情况以及这些缺陷对器件性能的影响.

## 2 设计思路

图 1 是漂移机制 InP/ GaP 光二极管的结构示意图. 采用 MBE (分子束外延) 技术在结的两侧梯度掺杂, 结的上侧采用的是 0.2 μm 厚  $10^{16} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$  的梯度 Si 掺杂, 从而在上侧可获得 200 ~ 300nm 的 n 型漂移场区, 在这个区域中存在高达  $10^4 \text{V/cm}$  的漂移场. 在通常的扩散机制 p-n 结二极管中, 光生载流子的收集有两种情形: 一是光生载流子产生在 p-n 结区, 二是光生载流子距离结区要小于载流子的扩散长度, 否则就不能被结电场收集. 由于载流子的扩散长度受晶格质量影响较大, 因此如果晶格缺陷较多则会由于光生载流子被缺陷俘获而将大大影响光生载流子的收集率, 从而严重影响器件的性能. 而在本设计的漂移机制 InP/ GaP 光二极管中, 产生在较宽的漂移场区的少数载流子能够更有效和更快地被漂移场收集. 由于漂移机制二极管收集少数载流子的机制并不依赖于载流子的扩散长度, 因此光生载流子在足够大的漂移电场作用下以较大的漂移速度被输运. 可以近似考虑载流子作匀加速直线运动来做一估算. 在  $10^4 \text{V/cm}$  加速场中, 载流子的加速

度  $a = eE/m \quad 1.75 \times 10^{17} \text{ m/s}^2$ , 取漂移距离为 250nm, 则载流子只需几皮秒即可在被缺陷俘获之前到达结的另一侧, 从而对光电流的产生做出贡献. 由于这个原因, 漂移机制二极管较少受到晶格缺陷的影响. 这也使得本器件具有较好的抗辐射能力, 这对于未来运行在 3000km 强辐射轨道<sup>[5]</sup>的航天器用太阳能电池是非常重要的.

0.2 $\mu\text{m}$ , n-InP graded doping $10^{20} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
0.5 $\mu\text{m}$ , p-InP, $10^{17} \text{ cm}^{-3}$
0.5 $\mu\text{m}$ , p <sup>+</sup> -InP graded doping, $10^{17} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
0.5 $\mu\text{m}$ , p <sup>++</sup> -InP, $10^{19} \text{ cm}^{-3}$
0.01 $\mu\text{m}$ , p <sup>++</sup> -InP delta doping, $10^{20} \text{ cm}^{-3}$
0.5 $\mu\text{m}$ , undoped GaP
n <sup>+</sup> GaP substrate

图 1 漂移机制 InP/ GaP 光二极管结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of drift dominated InP/ GaP photodiodes

此外, 通常的器件由于费米能级钉扎 (Fermi level pinning) 在器件表面产生一个反向带弯, 这个带弯的厚度可达 10 ~ 100nm. 它使得光生载流子向远离结的方向运动, 这在大多数器件中会大大降低器件对短波长 (蓝-紫外) 光的响应. 该器件表面高达  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  的掺杂浓度使得这个反向带弯区域小于 5nm, 从而该二极管可望在蓝-紫光波长方向有较好的响应.

### 3 结果与讨论

图 2 是本器件的载流子浓度分布的 ECV (电化学 CV) 图, 该图表明在 n-InP 区 200nm 范围内的梯度掺杂是成功的.

图 3 是 InP/ GaP 光二极管的 AFM (atomic force microscopy) 图, 该图表明 InP 层的外延质量相当好, 表面粗糙厚度只有 2.48nm.

图 4 是漂移机制 InP/ GaP 太阳能电池的光谱响应. 由图可见, 经强度为  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  1MeV 电子的辐射后, 其量子效率几乎没有改变, 这证实了我们前面对该设计抗辐射能力的分析, 也证实了漂移机制不依赖于载流子扩散长度的结论. 由图还可见, 漂移机制光电池对短波长光子 (< 400nm) 的内量子效率高 于 80%, 外量子效率高 于 40%. 图中长波长方向响

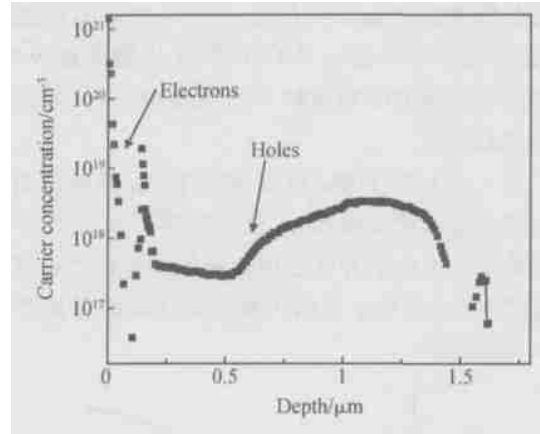


图 2 漂移机制 InP/ GaP 光二极管载流子浓度分布的 ECV 图  
Fig. 2 ECV carrier concentration profile of InP/ GaP photodiodes

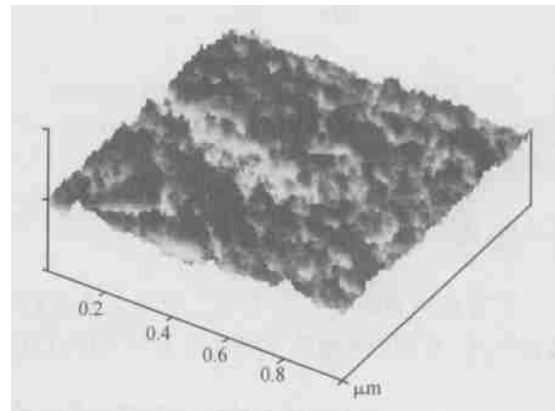


图 3 漂移机制 InP/ GaP 光二极管的 AFM 图 表面平整度为 2.48nm.

Fig. 3 AFM image of InP/ GaP photodiode with surface roughness 2.48nm

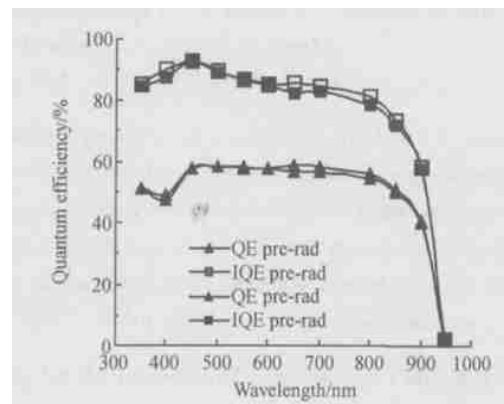


图 4 漂移机制 InP/ GaP 电池辐射前后的光谱响应  
Fig. 4 Quantum efficiency versus wavelength for drift dominated InP cells before and after irradiation

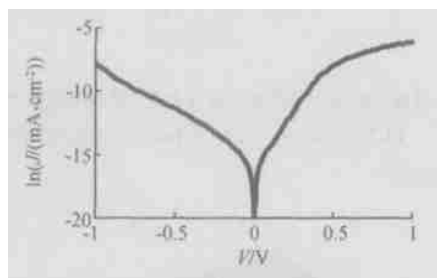


图 5 漂移机制 InP/ GaP 光二极管的暗电流-电压特性

Fig. 5 Dark  $\ln I$ - $V$  for drift dominated InP/ GaP photodiodes

应的下降是因为长波长的光子具有较强的穿透能力,这些光子在靠近 InP/ GaP 界面的地方被吸收,而这里有较多的缺陷和较小的漂移电场,从而使得量子效率较低。

图 5 是本器件的暗电流-电压特性.漏电流随着反向偏压的增加而增加,二极管的理想因子为 2. 这些结果反映了由于外延层中的缺陷而造成的再复合电流的存在,这对于晶格失配约达 8% 的异质外延是不可避免的。

## 4 结语

实验结果表明 InP/ GaP 光二极管具有很好的光谱响应,特别是在短波方向有高于 80% 的内量子

效率,这说明漂移机制器件在有大量缺陷和复合中心存在的情况下仍然可以具有较好的光电特性. 其原因是因为在一个较强的漂移电场存在的条件下,光生载流子的输运很快,几个皮秒时间内,在被缺陷俘获之前即可到达结的另一端对光电流做出贡献. 特别值得注意的是漂移机制器件对辐射不敏感. 所有这些为强辐射带航天器用太阳电池的设计以及 InP/ Si 器件技术提供了很好的依据。

## 参考文献

- [ 1 ] Yamaguchi M, Ando K. Mechanism of radiation resistance of InP solar cells. *J Appl Phys*, 1988, 63(11): 5555
- [ 2 ] Kostrzewa M, Regreny P, Besland M P, et al. High quality epitaxial growth on new InP/ Si substrate. *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, 2003: 325
- [ 3 ] Fathimulla A, Abrahams J, Hier H, et al. Growth and fabrication of InGaAs/ InAlAs HEMTs on bonded and etch-back InP on Si. *Second International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, 1990: 57
- [ 4 ] Crumbaker T E, Hafich M J, Robinson G Y. Heteroepitaxy of InP on Si: variation of electron concentration and mobility with depth. *Second International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, 1990: 131
- [ 5 ] Sun Y, Woodall Jerry M, Freeoul J L, et al. Radiation hard and gravimetric efficient thin film InP solar cells. *Proceeding of the 29th Photovoltaic Specialists Conference*, 2002: 994

## Investigation of Double Graded Doping Drift Dominated InP/ GaP Photodiodes

Li Guohua<sup>1,3</sup>, Sun Yanning<sup>2</sup>, Yan Hui<sup>3</sup>, Aristo Yulius<sup>2</sup>, and Jerry M Woodall<sup>2</sup>

(1 Department of Optical Information Science and Technology, School of Science, Southern Yangtze University, Wuxi 214122, China)

(2 Department of Electrical Engineering, Yale University, New Haven CT 06520, USA)

(3 Quantum Materials Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** A double graded doping drift dominated InP/ GaP photodiode is designed and the affections of the dislocations, which are resulted from the mismatch between the epitaxial layer and the substrate, to the device characterizations are studied. The results show the InP/ GaP photodiode has very good spectrum response and strong radiation resistance. Particularly it has the inner quantum efficiency over 80%. This means the device performance is less affected by dislocations in crystal that come from the crystal mismatch because of the use of the double graded doping drift dominated structure. The results will be helpful for the design of solar cells used in strong radiation orbits and InP/ Si device technology.

**Key words:** InP; drift dominated mechanism; photodiodes; solar cells

**PACC:** 7280E; 7360F

**Article ID:** 0253-4177(2005)02-0354-03