

光电器件

AlInGa_N/ GaN PIN 紫外光电探测器的研制

黄 瑾, 洪灵愿, 刘宝林, 张保平

(厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005)

摘 要: 用 AlInGa_N 四元合金代替 AlGa_N 作为 PIN 探测器的有源层, 研制出 AlInGa_N PIN 紫外探测器。详细介绍了该器件的结构设计和制作工艺, 并对器件进行了光电性能测试。测试结果表明, 器件的正向开启电压约为 1.5 V, 反向击穿电压大于 40 V; 室温 - 5 V 偏压下, 暗电流为 33 pA, 350 nm 处峰值响应度为 0.163 A/W, 量子效率为 58%。

关键词: AlInGa_N/ GaN; PIN 光电探测器; 紫外光电探测器

中图分类号: TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 5868(2008)05 - 0669 - 04

Development on AlInGa_N/ GaN PIN Ultraviolet Photodetectors

HUANG Jin, HONG Ling-yuan, LIU Bao-lin, ZHANG Bao-ping

(Dept. of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, CHN)

Abstract: Using AlInGa_N instead of AlGa_N as the source film of a photodetectors, an AlInGa_N-based PIN UV photodetector was developed. Its device structure and fabrication processing are introduced in detail. Measurement results show that its turn-on voltage is about 1.5 V, and $V_{BR} > 40$ V; under - 5 V bias voltage at room temperature, the dark current is about 33 pA; the peak responsivity can reach 0.163 A/W at 350 nm, and the quantum efficiency is 58%.

Key words: AlInGa_N/ GaN; PIN photodetector; ultraviolet photodetector

1 引言

GaN 基三元合金 Al_xGa_{1-x}N 材料是波长范围连续的直接带隙半导体, 随材料 Al 组分的变化其带隙在 3.4 ~ 6.2 eV 连续变化, 带隙变化对应波长范围为 200 ~ 365 nm, 覆盖了地球上大气臭氧层吸收光谱区 (230 ~ 280 nm), 是制作太阳盲区紫外光探测器的理想材料。AlGa_N 基宽禁带半导体探测器作为新一代紫外探测器^[1], 在军事和民用上都有重要的应用, 受到国内外的广泛重视。

目前, AlGa_N/ GaN 材料和器件结构仍存在诸多有待解决的问题: (1) 作为有源区的 AlGa_N 与作为衬底的 GaN 材料之间晶格失配, 导致外延层位错

密度较高和紫外探测器的暗电流较大; (2) p 型掺杂 Mg 的激活能很大, 其激活率很低, p 型 AlGa_N 材料带隙宽、功函数高, 空穴浓度低, 从而难于获得良好的金属与 p 型半导体接触 (欧姆接触); (3) 结构的优化设计, 例如减少表面光反射率, 优化有源层厚度, 提高器件的量子效率, 从而提高其光响应度等。

针对这些困难, 我们提出了以下几个改进措施: (1) 用晶格常数和禁带宽度可以独立变化的 AlInGa_N 四元合金代替 AlGa_N 作为探测器的 i 层; (2) 在 p 型 AlInGa_N 材料上再生长一层 p 型 GaN 材料, 用于提高与金属接触层的半导体的空穴浓度, 有利于形成良好的欧姆接触; (3) 采用 Ni/Au 双层作为 p 电极, 形成了良好的金属与半导体欧姆接触。本文通过对 AlInGa_N/ GaN PIN 紫外光电探测器的研究, 详细介绍了其结构设计和制作工艺, 以及其器件的测试结果。

收稿日期: 2007 - 12 - 03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60276029); 国家“863”计划项目 (2004AA311020, 2006AA032409); 福建省科技项目和基金项目 (2006H0092, A0210006, 2005HZ1018).

2 问题分析和解决方案

目前,紫外光电探测器一般采用 AlGaIn/GaN 结构。随着 AlGaIn 中的 Al 组分增加及响应波长的减小,AlGaIn 和 GaN 之间的晶格失配变大,应力增大,大大限制了 AlGaIn/GaN 结构的器件性能,特别是其暗电流和响应度。但是,AlInGaIn 四元合金的禁带宽度 E_g 和晶格常数却可以独立变化,使我们有可能调整禁带宽度到所需要的数值,同时保持较低的位错密度,从而降低暗电流。图 1 中的虚线代表了晶格常数与 GaN 一致的 AlInGaIn 的禁带宽度的变化范围,如果用 AlInGaIn 四元合金做有源区,就可以解决晶格失配所带来的问题。

四元合金 $Al_x In_y Ga_z N$ 晶格常数 a 随组分的变化关系可表示为^[3]

$$a_{Al_x In_y Ga_z N} = x a_{AlN} + y a_{InN} + z a_{GaN} \quad (1)$$

式中, $x + y + z = 1$ 。 $Al_x In_y Ga_z N$ 带隙随组分的变化关系可表示为^[4]

$$Q(x, y, z) = \left[xy T_{12} \left(\frac{1-x+y}{2} \right) + yz T_{23} \left(\frac{1-y+z}{2} \right) + xz T_{13} \left(\frac{1-x+z}{2} \right) \right] / (xy + yz + xz) \quad (2)$$

式中, $T_{ij}(\cdot) = B_j + (1 - \cdot) B_i + b_{ij} (\cdot - \cdot)$, $i, j = 1, 2, 3$ 分别代表 AlN, InN, GaN, B 代表二元合金的禁带宽度, b 代表三元合金的弯曲系数, $b_{12} = -5$; $b_{23} = -4.5$; $b_{13} = -1$ 。

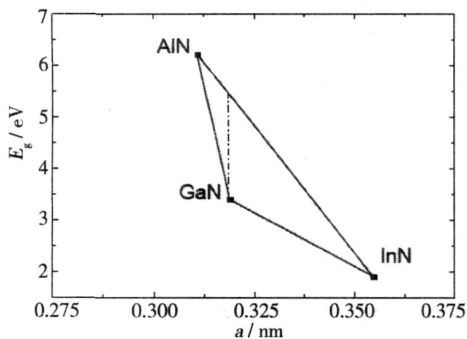


图 1 纤锌矿结构的 GaN 基材料的禁带宽度与晶格常数的关系

如果 $a_{Al_x In_y Ga_z N} = a_{GaN}$, 即 AlInGaIn 与 GaN 晶格匹配。把表 1 的各项参数带入式(1),得到 $x = y = 4.47 - 1$ 。那么,与 GaN 晶格匹配的 AlInGaIn 的禁带宽度范围从 3.39 eV (GaN) 到 4.67 eV ($Al_{0.817} In_{0.183} N$), 相应的波长从 365 nm (GaN) 到 266 nm ($Al_{0.817} In_{0.183} N$)。这一波段正好处于日盲

区域,是紫外光探测器的理想探测波段。

表 1 纤锌矿结构的 GaN 基材料的禁带宽度和晶格常数^[2]

参数	GaN	AlN	InN
a / nm	0.318 9	0.311 2	0.353 3
c / nm	0.518 6	0.498 2	0.569 3
E_g / eV	3.39	6.20	1.90

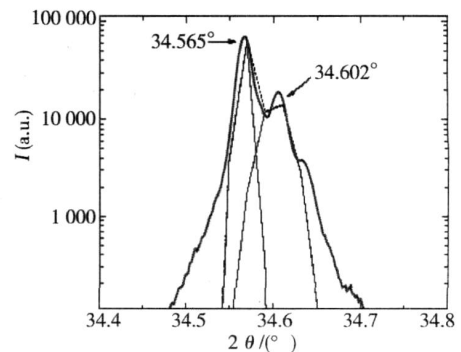
3 实验结果及分析

3.1 样品结构生长及材料性能

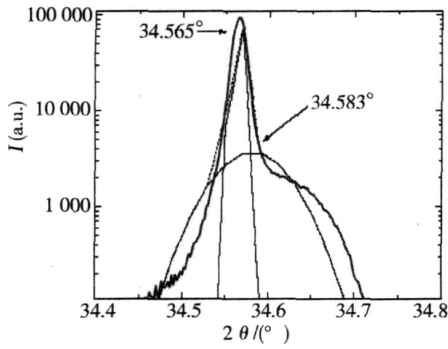
本研究使用中国科学院半导体所用 MOCVD 系统生长的 AlInGaIn 材料。样品 A 是我们研制 PIN 型紫外光电探测器的总体结构。先在 $Al_2 O_3$ 衬底上生长 GaN 缓冲层,再生长 3 μm 掺 Si 的 n-GaN, 然后是 0.2 μm 的未掺杂的 i-AlInGaIn, 再生长 0.2 μm 的掺 Mg 的 p-AlInGaIn, 最后生长 0.1 μm 的掺 Mg 的 p-GaN 作为欧姆接触层。为了研究中间的未掺杂的 AlInGaIn 层和 p 型 AlInGaIn 层的性质,我们又分别生长了样品 B 和样品 C。样品 B 是先在 $Al_2 O_3$ 衬底上生长 GaN 缓冲层,再生长 3 μm 掺 Si 的 n-GaN, 最后生长 0.1 μm 未掺杂的 i-AlInGaIn。样品 C 是先在 $Al_2 O_3$ 衬底上生长 GaN 缓冲层,再生长 3 μm 掺 Si 的 n-GaN, 最后生长 0.1 μm 掺 Mg 的 p-AlInGaIn。

分别对样品 B, C 做了 X 光三晶衍射实验。图 2(a)、(b) 分别是样品 B 和 C 的 X 光三晶衍射谱。图 2(a) 中的 34.565 的峰是 GaN (0002) 峰, 34.602 的峰是 AlInGaIn (0002) 峰。图 2(b) 中的 34.565 的峰是 GaN (0002) 峰, 34.583 的峰是 AlInGaIn (0002) 峰。

由此,计算出样品 B 和 C 的晶格常数列于表 2 中。从计算结果可以看出样品 B 和样品 C 中 AlInGaIn 与 GaN 晶格常数基本匹配。

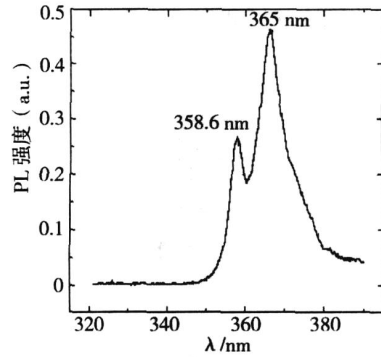


(a) 样品 B



(b) 样品 C

图2 样品的 X光三晶衍射谱



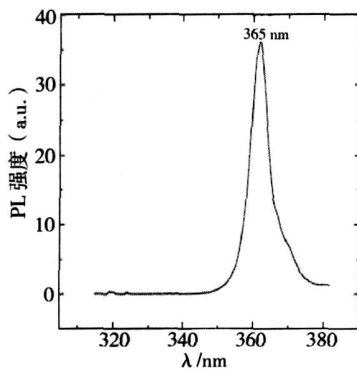
(c) 样品 A

图3 样品的室温(300 K) PL 谱

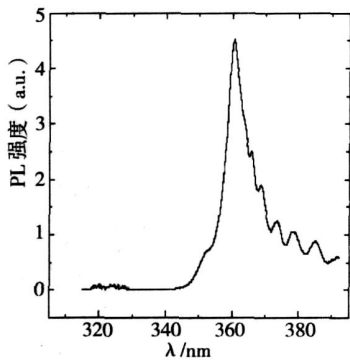
表2 样品 B和 C的晶格常数

样品	$c_{\text{GaN}} / \text{nm}$	$c_{\text{AlInGa}} / \text{nm}$	$\frac{c}{c_{\text{GaN}}} / \%$
B	0.518 50	0.518 00	0.096
C	0.518 50	0.518 31	0.037

为了分析 AlInGaN 材料的组分,对样品进行 PL 谱测量。对比图 3(a)、(b)、(c) 得出,在图 3(c) 中,358.6 nm 的发光峰为 p-AlInGaN 的带边发射;365 nm 的发光峰为 GaN 的带边发射;i-AlInGaN 的发光峰基本与 GaN 的发光峰重合。计算得出 p-AlInGaN 的禁带宽度 $E_g = 3.46 \text{ eV}$ 。



(a) 样品 B



(b) 样品 C

根据上面分析可知,与 GaN 晶格匹配的 $\text{Al}_x \text{In}_y \text{Ga}_z \text{N}$ 材料中,Al 组分与 In 组分的比值为 4.47 1,所以我们可以确定 p-AlInGaN 材料的组分为 $\text{Al}_{0.080} \text{In}_{0.018} \text{Ga}_{0.902} \text{N}$ 。

3.2 器件工艺

本文按常规工艺制备了如图 4 所示结构的 PIN 光电探测器。它包括 n-GaN 底层,i-AlInGaN 光吸收层,p-AlInGaN 过渡层,p-GaN 欧姆接触层。 SiO_2 作为器件的保护层和抗反射膜,用 Ti/Al/Ni/Au 作 n 电极,用 Ni/Au 作 p 电极。

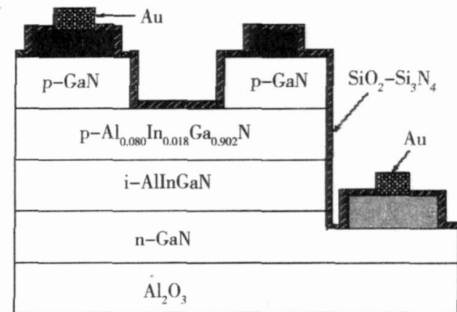
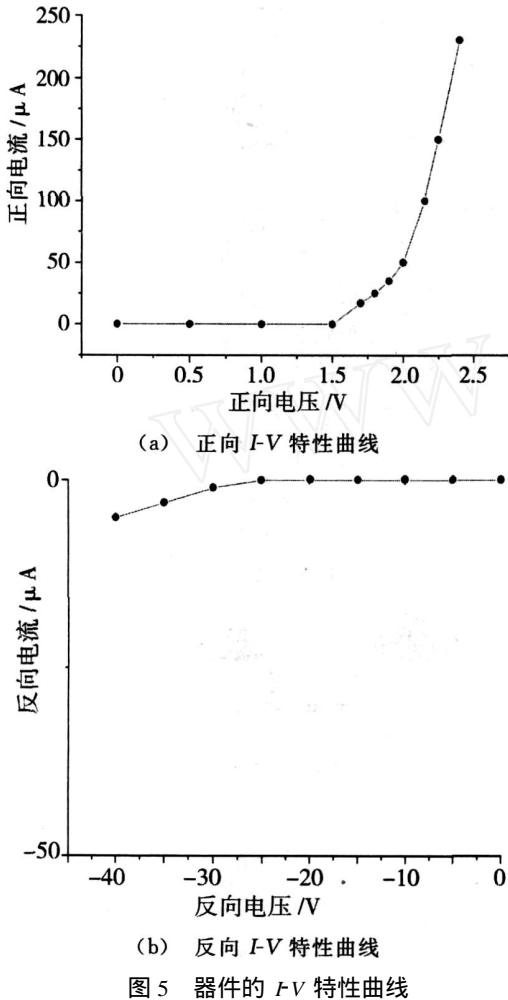


图4 AlInGaN/GaN PIN 结构示意图

试验中对 p 型欧姆接触进行了工艺优化,材料为 K0299 p 型样品。合金温度优化表明 500 °C 下所获得的接触性能最好,比接触电阻为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。随后分别在 K0299 (p-GaN) 样品和 K0294 (p-AlInGaN) 样品上制备了电极,结果 p 型 AlInGaN 的 $I-V$ 特性很差,电阻率很大,难以形成欧姆接触。相比之下,p 型 GaN 的 $I-V$ 特性就好得多,而且形成了欧姆接触。所以我们在 p 型 AlInGaN 层上面生长了一层 p-GaN,用 p-GaN 来做欧姆接触层,降低了电阻率。

4 器件性能测试与分析

图 5(a) 为 AlInGa_N PIN 型紫外探测器在正向偏压下的 $I-V$ 特性曲线,其正向开启电压约为 1.5 V。图 5(b) 为器件在反向偏压下的 $I-V$ 特性曲线,器件的反向击穿电压约为 40 V,表现出较好的硬击穿。由上述可见器件的 $I-V$ 特性良好。



将测试的数据进行处理,得到暗电流和反向偏压关系曲线如图 6。从图 6 可以看出,暗电流随反向偏压增大而增大。在未加偏压时,暗电流在 10^{-12} A 的数量级,在 -5 V 偏压下,暗电流仍然比较小,仅为 3.3×10^{-11} A。

图 7 是在 -5 V 偏压下测试得到的响应光谱。光谱响应范围在 200 ~ 400 nm,实现了紫外探测。AlInGa_N 的禁带宽 $E_g = 3.46$ eV,由公式 $h\nu = E_g$, $\nu = c/\lambda$,可算出 $\lambda = 358.4$ nm。器件对波长大于 358 nm 的入射光响应很小,相对峰值响应接近于零;小于 200 nm 的入射光因为波长短,光吸收系数很大,

被表面复合,无法在外电路中形成光电流^[5]。但从图 7 看出,光谱响应的范围较窄,主要原因有:(1)p-AlInGa_N 层的 Al 组分小,没能形成窗口层;(2)p-AlInGa_N 层太厚,在光达到 i 层前,大部分的光被 p-AlInGa_N 层吸收了。

样品在 350 nm - 5 V 偏压下峰响应为 0.163 A/W,量子效率达到 58%,性能优于 T. N Oder 等人^[6]报道的最大响应度 0.13 A/W @326.8 nm 的 In_{0.02}Al_{0.15}Ga_{0.83}N 紫外光电探测器。最大响应度没有出现在“太阳盲区”250 ~ 300 nm 范围内,主要是因为 i 层的 AlInGa_N 材料的 Al 组分太小,使得 i-AlInGa_N 的禁带宽度与 GaN 的禁带宽度接近。

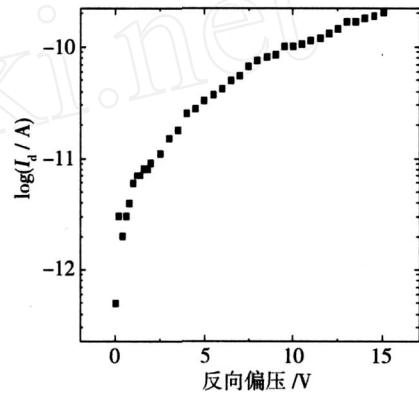


图 6 暗电流和反向偏压关系

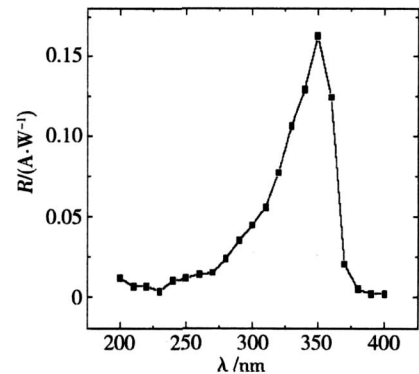


图 7 -5 V 偏压下的响应光谱

5 结论

采用晶格常数和禁带宽度可以独立变化的 AlInGa_N 四元合金代替 AlGa_N 作为探测器的有源层,成功研制出 PIN 紫外光电探测器。通过 PL 谱测量和 X 射线衍射实验,计算出生长的 p-AlInGa_N 材料的组分为 Al_{0.080}In_{0.018}Ga_{0.902}N,与 GaN 材料的晶格失配率仅为 0.037%。

(下转第 708 页)

品温度和环境温度慢慢趋于一致,即趋于热平衡时,电阻变化缓慢且阻值降低较小。

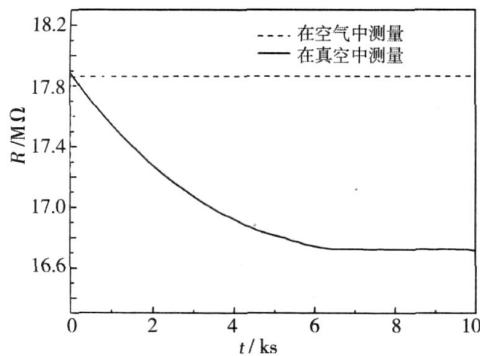


图6 样品B在空气中和真空中的电阻测量结果

4 结论

采用 PECVD 法制备的掺硼氢化非晶硅薄膜,其电阻值随测试时间呈现上升趋势,经 XPS 分析发现薄膜中存在氧化现象。光照条件下,样品光电阻上升幅度增加,长时间的光照会导致 S-W 效应出现,分析表明光照会引起材料中弱 Si - Si 键的断裂,导致悬挂键缺陷态产生。掺硼氢化非晶硅的电阻在退火前后均呈现波动现象,是由于随机电报噪声的存在。通过对样品在真空中和空气中电阻测量,证实在真空中材料焦耳热作用更显著,另外空气的对流也对材料温度变化产生影响。

参考文献:

[1] Spear W E, Lecomber P G. Substitutional doping of amorphous silicon [J]. Solid State Communication, 1975, 17(9): 1193-1196.

(上接第 672 页)

合金温度优化表明 500℃ 合金退火下所获得的 p 型欧姆接触性能最好,比接触电阻为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。I-V 特性显示,器件正向开启电压为 1.5 V 左右,反向击穿电压为 40 V;在 -5 V 偏压下,暗电流为 $3.3 \times 10^{-11} \text{ A}$;样品在 350 nm 下的最大响应度为 0.163 A/W,量子效率为 58%,显示出了良好的器件特性。

参考文献:

[1] Litton C W, Schreiber P J, Smith G A, et al. Design requirements for high-sensitivity UV solar blind imaging detectors based on AlGaIn / GaIn photodetector arrays: A review [J]. Proc. SPIE, 2001, 4454: 218-232.

[2] Kelly M J. Model amorphous semiconductor structures: tight-binding s-band electronic structure [J]. J. Non-crystalline Solids, 1975, 18(1): 55-64.

[3] Ching W Y, Lin C C, Guttman L. Structural disorder and electronic properties of amorphous silicon [J]. Phys. Rev. B, 1977, 16: 5488-5498.

[4] Budianu E, Purica M. Optical improved structure of polycrystalline silicon-based thin-film solar cell [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2002, 72 (1-4): 223-229.

[5] Tsuda S, Sakai S, Nakano S. Recent progress in a-Si solar cells [J]. Appl. Surface Science, 1997, 113: 734-740.

[6] Woditsch P, Koch W. Solar grade silicon feedstock supply for PV industry [J]. Solar Energy Materials and Solar Cell, 2002, 72(1): 11-26.

[7] Pernet P, Felder R. Optimization of amorphous silicon solar cells on polymer film substrates [C]. 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Spain: Barcelona, 1997: 2339-2342.

[8] 张春红, 张志谦, 曹海琳, 等. 聚酰亚胺/纳米 SiO₂ 杂化膜的制备和表征 [J]. 材料科学与工艺, 2006, 14(6): 642-645.

[9] 陈治明. 非晶半导体材料与器件 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 63.

[10] 何宇亮, 陈光华, 张仿清. 非晶半导体物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989. 172.

作者简介:

杨利霞 (1985 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为光电传感器用硅基薄膜敏感材料。

E-mail: lee4963 @163. com

[2] Levinshtein M E, Rumyantsev S L. 先进半导体材料性能与手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[3] McIntosh F G, Boutros K S, Roberts J C, et al. Growth and characterization of AlInGaIn quaternary alloys [J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 68 (1): 40-42.

[4] Aumer M E, LeBoeuf S F, McIntosh F G, et al. High optical quality AlInGaIn by metalorganic chemical vapor deposition [J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 75: 3315.

作者简介:

黄瑾 (1983 -), 女, 福建人, 硕士研究生, 主要从事 GaN 基材料和器件的研究。

E-mail: yehehuangjin0207812 @hotmail. com