

AlGaN 基共振腔增强的 p-i-n 型紫外探测器^{*}

姬小利¹ 江若璿^{1,†} 周建军¹ 刘斌¹ 谢自力¹ 韩平¹ 张荣¹ 郑有焘¹ 龚海梅²

(1 南京大学物理系 江苏省光电功能材料重点实验室, 南京 210093)

(2 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200080)

摘要: 设计了目标探测波长为 320nm 的 AlGaN 基共振腔增强的 p-i-n 型紫外光电探测器, 共振腔由分别作为底镜和顶镜的 AlN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N 布拉格反射镜和空气/GaN 界面组成, 有源区 p-GaN/i-GaN/n-Al_{0.38}Ga_{0.62}N 被置于腔内. 该结构采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法在蓝宝石衬底和 GaN 模板上外延生长得到. 光谱响应测试显示了正入射时该器件在波长 313nm 处出现响应的选择增强, 零偏压下响应度为 14mA/W.

关键词: 紫外探测器; 共振腔增强; AlGaN; 分布布拉格反射镜; 传递矩阵方法

PACC: 7865P; 6855; 7340L

中图分类号: O472+.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)12-1957-04

1 引言

从上世纪 90 年代起, Kishino 等人^[1,2]开展了对共振腔增强(resonant-cavity-enhanced, RCE)探测器(photodetectors, PDs)的研究. RCE 探测器是将器件有源区置入一个 Fabry-Perot 共振腔中, 使满足共振条件的光响应得到增强, 而非共振光的响应受到抑制, 从而达到可选择波长和窄光谱响应的目的. 这对波分复用系统是至关重要的. 另外, 由于光在腔内多次反射, 所以用很薄的一个吸收区就可以获得很高的量子效率, 这样就减少了光生载流子的输运时间, 从而提高了响应速度和响应带宽. Ünlü 等人^[1~7]成功地制备了高性能的红外波段 GaAs 基 RCE 探测器, 并应用于光通信的波分复用系统. 随着 GaN 基材料和光电器件的研究进展, 人们开展了对 AlGaN 基紫外 RCE 探测器的研究. Kishino 等人^[8,9]报道了第一个 AlGaN 基的 RCE MSM 型探测器, Biyikli 等人^[10,11]报道了 RCE Schottky 型探测器. 但是, 到目前为止, 关于 AlGaN 基 RCE 探测器的报道仍很少^[8~12], 器件性能还很不理想, 有待于进一步改进. 由于高 Al 组分 AlGaN 材料的生长比较困难, 目前文献所报道的结果仅限于用低 Al 组分 AlGaN 材料可以实现的波段大于 340nm 的探测. 同时由于 p 型掺杂与激活比较困难, 所报道的结构只有 MSM 和 Schottky 型, 而 pn 结型 AlGaN 基 RCE 探测器尚未见报道.

本文设计并制备了中心波长在 320nm 的 Al-

GaN 基 RCE p-i-n PD, 对其光吸收和光电响应特性进行了测试分析.

2 器件结构与模拟

我们设计了一个正面光照的中心波长在 320nm 的 AlGaN 基 RCE p-i-n PD, 其外延结构见图 1. Al_{0.3}Ga_{0.7}N/AlN DBR 和空气/GaN 界面, 分别作为底镜和顶镜, 形成一个共振腔. 由以前的实验结果^[13]和基于传递矩阵方法(transfer matrix method, TMA)的数值模拟, 可得出一个 40.5 周期 Al_{0.3}Ga_{0.7}N/AlN (30.8nm/36.9nm) DBR, 其在中心波长 320nm 处的反射率为 93%, 半高宽为 12nm^[14,15]. 光在空气/GaN 界面的反射率为 20%. 将有源区 p-GaN/i-GaN/n-Al_{0.38}Ga_{0.62}N 置于腔中. 重掺杂的 p⁺ 和 n⁺ 层用于形成欧姆接触. GaN 吸收层总厚度设为 60nm, 以满足 $R_t = R_b \times \exp(-2\alpha d)$ 要求^[1], 其中 R_t, R_b 分别是前镜和后镜的反射率, d 是吸收层厚度, $\alpha = 0.013\text{nm}^{-1}$ 是 GaN 在 320nm 处的光吸收系数^[16]. n 型 Al_{0.38}Ga_{0.62}N 层兼作间隔层, 总厚度设为 555nm, 形成 $5\lambda_0$ 腔. 图 2 显示了 TMA 模拟的该结构的吸收(A)和反射(R)谱. 在共振波长 320nm 处, 腔内的光吸收, 也即光学量子效率高达 97%, 相应地, 该波长处反射率几乎降至零, 从而在底 DBR 高反射区中心形成反射的陡降. 值得注意的是, 因为底 DBR 反射率很高导致透射率很小, 因此吸收率 A 近似地等于 $1 - R$.

^{*} 国家重大基础研究(批准号:2006CB6049)和国家自然科学基金(批准号:60676057)资助项目

[†] 通信作者. Email: rljiang@jonline.com

2007-06-06 收到, 2007-07-13 定稿

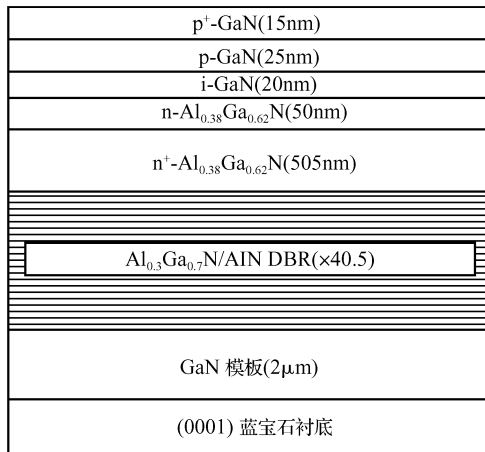


图 1 AlGaIn 基 RCE p-i-n PD 的外延结构示意图

Fig. 1 Epitaxial structure of the designed AlGaIn-based RCE p-i-n photodetector

3 样品制备与测试

我们用金属有机物化学气相淀积(MOCVD)方法,在(0001)蓝宝石衬底上生长了 RCE PD 结构,采用一个 $2\mu\text{m}$ 厚的 GaIn 模板以减少位错和提高表面平整度.晶片在 N_2 气氛中进行在位退火以激活 p 型层.

因为共振腔效应本质上是一个光学效应,在器件制备之前,首先对 AlGaIn-基 RCE PD 外延片的光学特性进行测试.图 3 是其实测反射谱.与模拟的反射谱相比,测量谱的反射陡降不是出现在 DBR 高反射区中心,这显示了实际的生长层厚与设计值有些偏离.然而,底 DBR 的中心反射率为 93%,而该测量谱中最高反射率只有 47% (319nm),由此可以粗略估计,该结构的光吸收效率至少 45%.从反射陡降的位置来看,共振模在 313nm,比设计值小 7nm.

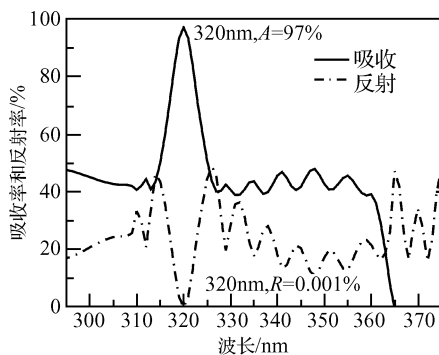


图 2 AlGaIn 基 RCE p-i-n PD 的模拟吸收谱和反射谱

Fig. 2 Absorption and reflectance spectra simulated on the designed AlGaIn-based RCE p-i-n photodetector

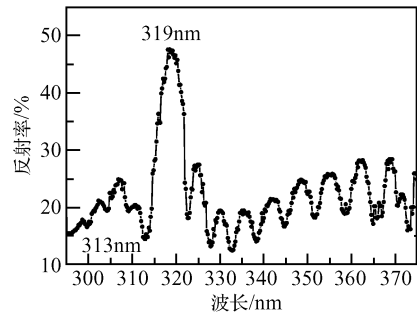


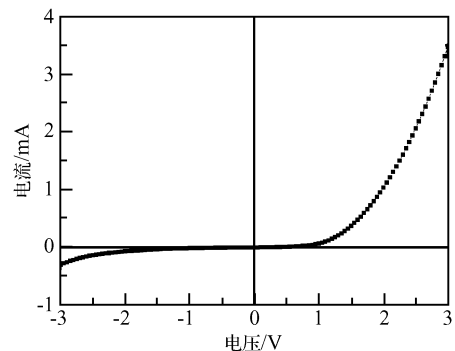
图 3 AlGaIn 基 RCE p-i-n PD 的测量反射谱

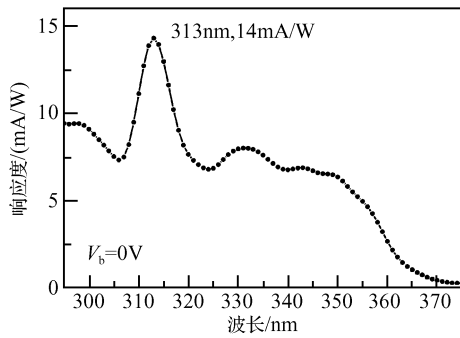
Fig. 3 Reflectance spectrum measured on the AlGaIn-based RCE p-i-n photodetector

器件制备工艺包括 3 个主要的工艺步骤:刻蚀台面、形成 n 型欧姆接触和形成 p 型欧姆接触.首先,用 ICP 刻蚀至重掺的 n^+ -AlGaIn 层,刻蚀深度约 300nm.然后,采用磁控溅射系统淀积 Ti/Al/Ni/Au 多层金属,并在 850°C 快热退火 30s 以形成 n 型欧姆接触.最后,溅射 Ni/Au 至 p^+ -GaIn 层,并在 650°C 退火 1min 以形成 p 型欧姆接触.

形成 p, n 电极层后,采用低噪声探针台和半导体参数分析仪(HP 4156C)进行 I - V 测试,测量结果见图 4,开启电压约 3.0V(该电压处对应的电流为 1mA),零偏压下漏电流为 3.6nA.

采用氙灯、斩波器、单色仪和锁相放大器测量系统,对样品的光响应特性进行测试,然后用标准的紫外增强 Si 探头进行校准.图 5 显示了正入射时在零偏压下测得的 AlGaIn 基 RCE p-i-n PD 的响应谱.约 360nm 处的截止边来源于 GaIn 吸收层的带边吸收.图中显示了 $\sim 313\text{nm}$ 的响应峰,该峰正是由腔效应引起的,腔模 313nm 与图 3 的反射陡降波长一致,而与设计值有一定偏离.313nm 处的响应度为 14 mA/W ,相应的外部量子效率为 5.5%.器件的实际量子效率比光吸收效率低得多,主要原因可能

图 4 AlGaIn 基 RCE p-i-n PD 的 I - V 曲线Fig. 4 I - V characteristic of the AlGaIn-based RCE p-i-n photodetector

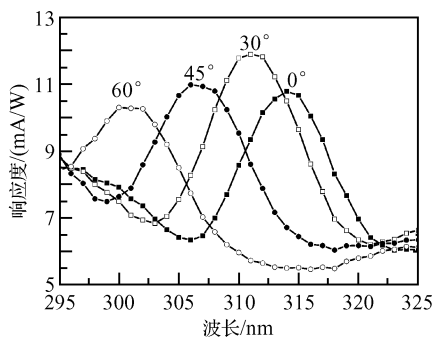
图 5 AlGa_{0.38}N 基 RCE p-i-n PD 的光响应谱Fig.5 Response spectrum of the AlGa_{0.38}N-based RCE p-i-n photodetector

是由载流子复合和 Al_{0.38}Ga_{0.62}N/GaN 界面势垒所致. 各种缺陷导致的载流子复合会降低最终扫出外电路的光生载流子的数目, 同时 AlGa_{0.38}N/GaN 异质结界面电子势垒也会阻碍电子通过. 通过材料生长的精确控制和进一步的结构优化, 有望于提高探测器的响应度.

在斜入射的情况下, 光入射角增加会导致腔内光程差减小, 从而导致腔模蓝移. 我们测量了探测器在不同光入射角下的响应谱, 如图 6 所示, 在入射角分别为 0°, 30°, 45° 和 60° 时, 对应的响应峰波长分别为 314, 311, 306 和 301 nm. 在一定的光入射角范围内, 响应峰值波长发生蓝移但响应度变化不大, 表明改变光入射角是调节探测光波长的一种有效方法.

4 结论

我们设计并制备了目标波长为 320 nm 的以 AlN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N 布拉格反射镜为底镜的 AlGa_{0.38}N 基 RCE p-i-n 型探测器. TMA 模拟给出该器件结构在共振模 320 nm 处的光吸收效率为 97%. 反射谱

图 6 几个不同光入射角下的 AlGa_{0.38}N 基 RCE p-i-n PD 的响应谱Fig.6 Response spectra of the AlGa_{0.38}N-based RCE p-i-n photodetector under different incident angle of light

测量显示其光吸收效率大于 45%. 光谱响应测试显示了该器件具有腔效应所导致的波长选择增强特性, 正入射时在 313 nm 处出现响应峰, 零偏压下响应度为 14 mA/W, 且该器件的探测光波长可通过改变光入射角而在一定范围内调节.

参考文献

- [1] Kishino K, Ünlü M S, Chyi J I, et al. Resonant cavity-enhanced (RCE) photodetectors. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27: 2025
- [2] Ünlü M S, Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices. *J Appl Phys*, 1995, 78: 607
- [3] Özbay E, Kimukin I, Biyikli N, et al. High-speed >90% quantum-efficiency p-i-n photodiodes with a resonance wavelength adjustable in the 795~835 nm range. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 1072
- [4] Knödl T, Choy H K H, Pan J L, et al. RCE photodetectors based on VCSEL structures. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1999, 11: 1289
- [5] Gökavas M, Dosunmu O, Ünlü M S, et al. High-speed high-efficiency large-area resonant cavity enhanced p-i-n for multimode fiber communications. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2001, 13: 1349
- [6] Emsley M K, Dosunmu O, Ünlü M S. High-speed resonant-cavity-enhanced silicon photodetectors on reflecting silicon-on-insulator substrates. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 14: 519
- [7] Pan Zhong, Li Lianhe, Xu Yingqiang, et al. GaInNAs/GaN multiple-quantum well resonant-cavity-enhanced photodetectors at 1.3 μm. *Chinese Physics Letters*, 2001, 18: 1249
- [8] Kishino K, Yonemaru M, Kikuchi A, et al. Resonant-cavity-enhanced UV metal-semiconductor-metal (MSM) photodetectors based on AlGa_{0.38}N system. *Phys Status Solidi A*, 2001, 188: 321
- [9] Yonemaru M, Kikuchi A, Kishino K. Improved responsivity of AlGa_{0.38}N-based resonant cavity-enhanced UV photodetectors grown on sapphire by RF-MBE. *Phys Status Solidi A*, 2002, 192: 292
- [10] Biyikli N, Kartaloglu T, Aytur O, et al. High-speed visible-blind resonant cavity enhanced AlGa_{0.38}N Schottky photodiodes. *MRS Internet J Nitride Semicond Res*, 2003, 8: 8
- [11] Biyikli N, Kimukin I, Butun B, et al. ITO-Schottky photodiodes for high-performance detection in UV-IR spectrum. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2004, 10: 759
- [12] Li T, Carrano J C, Eiting C J, et al. Design of a resonant-cavity-enhanced p-i-n GaN/Al_xGa_{1-x}N photodetector. *Fiber and Integrated Optics*, 2001, 20: 125
- [13] Ji Xiaoli, Jiang Ruolian, Xie Zili, et al. High reflectivity AlGa_{0.38}N/AlN distributed Bragg reflector for use in ultraviolet region. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(6): 1735
- [14] Brunner D, Angerer H, Bustarret E, et al. Optical constants of epitaxial AlGa_{0.38}N films and their temperature dependence. *J Appl Phys*, 1997, 82: 5090
- [15] Macleod H A. *Thin film optical filters*. 2nd ed. New York: Macmillan, 1986
- [16] Muth J F, Brown J D, Johnson M A L, et al. Absorption coefficient and refractive index of GaN, AlN and AlGa_{0.38}N. *MRS Internet J Nitride Semicond Res*, 1999, 4S1: G5.2

An AlGa_N-Based Resonant-Cavity-Enhanced p-i-n Ultraviolet Photodetector^{*}

Ji Xiaoli¹, Jiang Ruolian^{1,†}, Zhou Jianjun¹, Liu Bin¹, Xie Zili¹, Han Ping¹, Zhang Rong¹,
Zheng Youdou¹, and Gong Haimei²

(1 *Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Photonic and Electronic Materials, Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

(2 *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200080, China*)

Abstract: AlGa_N-based resonant-cavity-enhanced p-i-n photodetectors operating at a wavelength of 320nm were designed. A 40.5-pair AlN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N distributed Bragg reflector and the air/GaN interface, serving as the back and front mirror, respectively, form a resonant cavity. In the cavity there is a p-GaN/ i-GaN/ n-Al_{0.38}Ga_{0.62}N structure. The wafer was fully epitaxial on the sapphire substrate and GaN template by metalorganic chemical vapor deposition. The response spectrum exhibits selective enhancement at 313nm, with a responsivity of 14mA/W under zero bias.

Key words: ultraviolet photodetector; resonant-cavity-enhanced; AlGa_N; distributed Bragg reflector; transfer matrix method

PACC: 7865P; 6855; 7340L

Article ID: 0253-4177(2007)12-1957-04

^{*} Project supported by the Special Funds for National Key Basic Research Plan of China (No. 2006CB6049) and the National Natural Science Foundation of China (No. 60676057)

[†] Corresponding author. Email: rlijiang@jlonline.com

Received 6 June 2007, revised manuscript received 13 July 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics