

背照式高量子效率 AlGa_xN 日盲紫外探测器设计

赵文伯, 周 勋, 李艳炯, 申志辉, 罗木昌

(重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘 要: 高量子效率、高 UV/VIS 抑制比、宽的光谱响应范围、快的响应速度是 AlGa_xN 紫外探测器设计追求的主要目标。为了获得适宜于紫外焦平面阵列的探测器结构, 结合 MOCVD 外延材料生长的特点, 采用模拟计算与实验相结合的方法, 设计了背照式高量子效率 AlGa_xN 日盲探测器。详细介绍了背照式 Al_xGa_{1-x}N-pin 紫外探测器结构参数设计的依据和设计过程, 并给出了设计结果, 通过工艺实验, 对设计结果进行了优化。应用设计结果进行了器件试制, 经测试试制器件, 其峰值响应波长为 270 nm, 光谱响应范围为 250~282 nm, 峰值量子效率达到了 57%(0 V), 实验表明取得了比较理想的设计结果。

关键词: 高量子效率; AlGa_xN; 日盲紫外探测器

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)12-3358-05

Design of back-illuminated solar-blind AlGa_xN photodetectors with high quantum efficiency

Zhao Wenbo, Zhou Xun, Li Yanjiong, Shen Zhihui, Luo Muchang

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China)

Abstract: High quantum efficiency, high UV/VIS rejection ratio, fast response and wide spectral response are the main objects for the design of AlGa_xN photodetectors. To obtain suitable detector structure for UV focal plane array, combining with the characteristics of epitaxial materials grown by MOCVD, a design of back-illuminated solar-blind AlGa_xN photodetectors with high quantum efficiency was demonstrated based on simulations and experiments. The design basis and process of the Al_xGa_{1-x}N-pin photodetectors were introduced in detail, and then the design was optimized by experiments. Moreover, the photodiodes were fabricated according to the design, and the performance of device was also presented, exhibiting high peak unbiased EQE of 57% at 270 nm, responding to the spectral range between 250 nm and 282 nm. It is indicated that an optimal design is achieved.

Key words: high quantum efficiency; AlGa_xN; solar-blind UV photodetectors

收稿日期: 2013-04-04; 修订日期: 2013-05-08

作者简介: 赵文伯(1966-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光电子器件方面的研究。Email: zhwb89@sina.cn

0 引言

Al₂Ga₁₋₂N 紫外探测器有光导型 (PC)、pin 型、肖特基势垒型(SBD)、金属-半导体-金属型(MSM)、双极晶体管型(HBT)等结构。由于 pin 型探测器工作电压低、输入阻抗高、宽带宽、线性度好、噪声低、紫外光/可见光(UV/VIS)抑制比高,调整 i 层厚度可以满足不同的应用需要,适宜于制作紫外焦平面,所以得到了广泛地应用^[1]。

正确合理的探测器结构设计可以得到期望的高水平的器件。文中结合 MOCVD 外延材料生长的特点,对背照式 Al₂Ga₁₋₂N-pin 探测器结构参数进行了详细的分析设计,并通过工艺实验对设计的结构参数进行了验证,在工艺实验过程中,对结构参数进行了优化。试制器件表明获得了比较理想的设计结果。设计的背照式日盲紫外 Al₂Ga₁₋₂N-pin 将主要用于紫外焦平面阵列的研究。

1 器件结构

采用的器件结构如图 1 所示,为背照式 Al_xGa_{1-x}N 异质结台面 pin 结构。高温 AlN 作为探测器外延材料生长的模板,非掺杂 Al₂Ga₁₋₂N(UID-Al₂Ga₁₋₂N)作为窗口层,n⁺-Al_yGa_{1-y}N 作为 n 面电极接触层,i-Al_xGa_{1-x}N^x(实际为非掺杂)作为光吸收层,p-Al_xGa_{1-x}N 作为非日盲光生载流子的阻挡层,p-GaN 作为 p 面电极接触层。

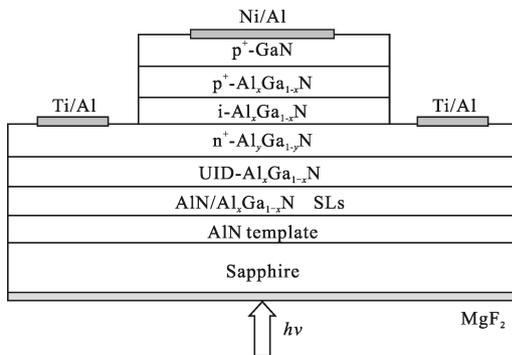


图 1 AlGa_xN 紫外探测器结构图

Fig.1 Schematic structure of AlGa_xN ultraviolet detector

器件的光谱响应范围主要由 n⁺-Al_yGa_{1-y}N 和 i-Al_xGa_{1-x}N 层(包括 p-Al_xGa_{1-x}N 层)的铝组分确定,入射光中波长小于开启波长(cut on)的紫外光被窗口

层滤掉,波长大于截止波长(cut off)的紫外光透过进入吸收层。如果调整 n⁺-Al_yGa_{1-y}N 和 i-Al_xGa_{1-x}N 的铝组分可以分别调节器件短波方向及长波方向的开启截止波长。尽可能增大 n⁺-Al_yGa_{1-y}N 与 i-Al_xGa_{1-x}N 的铝组分差,可以扩展器件的光谱响应范围,从而使器件可以接收更多的光信号。

2 器件结构设计

高量子效率、高 UV/VIS 抑制比、快速响应时间、宽光谱响应范围是紫外探测器设计追求的主要目标。Al_xGa_{1-x}N 紫外探测器设计的主要工作就是确定 pin 各层的 Al 组分、厚度和载流子浓度。

2.1 Al 组分的确定

设定器件响应 260~280 nm 的日盲紫外光,依据此条件并结合 MOCVD 生长 Al_xGa_{1-x}N 材料的特点来确定 Al_xGa_{1-x}N-pin 各层的 Al 组分。

Al_xGa_{1-x}N 材料 Al 组分与其禁带宽度、响应波长的关系见图 2,此曲线由图中的公式求得^[2]。器件要响应 260~280 nm 的日盲紫外光,根据计算,n⁺-Al_yGa_{1-y}N 的 Al 组分应为 0.59 (y=0.59),i-Al_xGa_{1-x}N 和 p-Al_xGa_{1-x}N 的 Al 组分应为 0.45(x=0.45)。

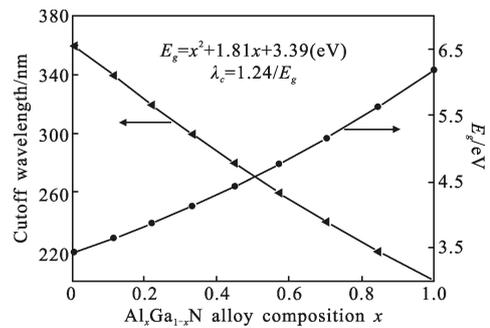


图 2 Al_xGa_{1-x}N 材料 Al 组分与其禁带宽度、响应波长的关系

Fig.2 Relationship between Al composition of Al_xGa_{1-x}N alloy with band gap and wavelength

计算得到的 Al 组分值转化为三甲基铝(TMAI)和三甲基镓(TMGa)的流量,得到气相 Al 组分。MOCVD 生长 Al_xGa_{1-x}N 材料后,用 X 射线衍射仪倒易空间图检测外延材料的 Al 组分,得到固相 Al 组分,利用固相 Al 组分分凝系数修改 TMAI 和 TMGa 的流量。经过多次工艺参数修改可以获得所需要 Al 组分的外延材料。

设计过程中,希望器件的光谱响应范围尽可能

的宽,为此可以提高 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 的 Al 组分。但是在现有的蓝宝石衬底上异质外延技术条件下,难以生长出低缺陷密度、高 Al 组分、重掺杂的 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 外延材料。拓展器件光谱响应范围的有效方法是采用 $Al_zGa_{1-z}N/Al_yGa_{1-y}N/Al_xGa_{1-x}N$ 多量子阱吸收层。

Al 组分设计时还需要考虑异质结和极化效应。 $p-GaN/p-Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ 异质结导带有 0.7 eV 的带阶(能带结构与电场分布见图 3);另外,在该异质界面存在强烈的极化效应,极化效应使异质结势垒升高^[3],并感生出相对应的二维空穴气。异质结带阶和极化效应都有效地阻挡了 $p-GaN$ 中光生载流子(非日盲光生电子)流向耗尽区,极大地提高了器件的抑制比。所以 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 的 Al 组分一般不低于 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 的 Al 组分。

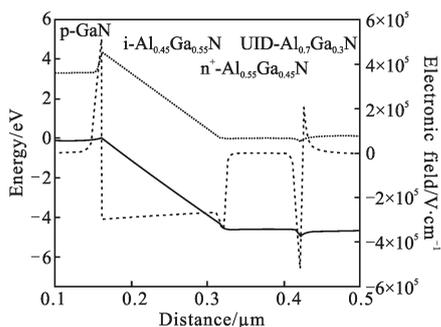


图 3 考虑极化效应时 $Al_xGa_{1-x}N$ -pin 能带结构与电场分布图

Fig.3 Schematic diagram of $Al_xGa_{1-x}N$ -pin energy band and electronic field under polarization effect

2.2 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 层参数的确定

$n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 的参数主要依据材料生长情况、载流子收集效率、横向电阻、欧姆接触确定。 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 为重掺杂层,其中只有在靠近吸收层一个扩散长度内的光生载流子才能够进入耗尽区成为有效信号输出,其他区域光生载流子的寿命很短将很快被复合掉,从而降低了光生载流子的收集效率。据此,要求尽量采用薄的 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 层,薄的 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 层让更多的短波紫外光透过而进入吸收层,使器件响应波长向短波方向扩展。MOCVD 生长的重掺杂 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 层中的缺陷密度相对较高,也要求尽量采用薄的 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 层。但是,器件工作时 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 中的横向电流分量占电流的大部分,要求 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 层具有小的横向电阻,尤其是雪崩探测器(mA 量级电流)和焦平面阵列。在载流子浓度一定的情况下,

要求尽量采用厚的 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 层。器件芯片工艺中 $GaN/Al_xGa_{1-x}N$ 的干法刻蚀深度有 $5\text{ nm}\times 10\text{ nm}$ 甚至更大的偏差,也要求材料有足够的厚度。折中考虑上述因素,确定 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 层的厚度为 $60\text{ nm}\times 200\text{ nm}$ 。

高 Al 组分的 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 欧姆接触困难,整流接触或高的接触电阻都会增加器件的串联电阻。为了实现欧姆接触并获得低的接触电阻率,一般要求 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 的载流子浓度大于 10^{19} cm^{-3} ;为了降低 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 的横向电阻,也要求尽可能提高其载流子浓度;提高 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 的载流子浓度,还可以降低 $Al_zGa_{1-z}N/Al_yGa_{1-y}N$ 异质结价带势垒高度,有助于光生空穴收集传输。但是,高 Al 组分 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 原位掺杂很困难,并且随着掺杂浓度的提高,生长的 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 缺陷密度增加。折中考虑,一般选择 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 的载流子浓度在 10^{18} cm^{-3} 量级。

2.3 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 层参数确定

$i-Al_xGa_{1-x}N$ 层的参数主要依据材料的吸收系数、响应时间、材料生长特点确定。 $Al_xGa_{1-x}N$ 材料吸收系数随 Al 组分变化的模拟曲线参见图 4。从图中可知, $Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ 材料对 270 nm 波长紫外光的吸收系数大于 $1.2\times 10^5\text{ cm}^{-1}$ 。100 nm 厚的 $Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ 将吸收波长小于 270 nm 紫外光的大部分。模拟分析和实验都表明,随着 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 厚度的增加,器件的响应度随之提高,但存在上限,增加到一定厚度后响应度不再增加。这是由于较厚的 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 层无法完全耗尽之故。但是,随着 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 厚度的增加其载流子渡越时间随之增大,电阻也增大,从而使得 RC 时间常数增加,不利于提高器件的响应速度。 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 的厚度一般确定为 $150\text{ nm}\times 300\text{ nm}$ 。

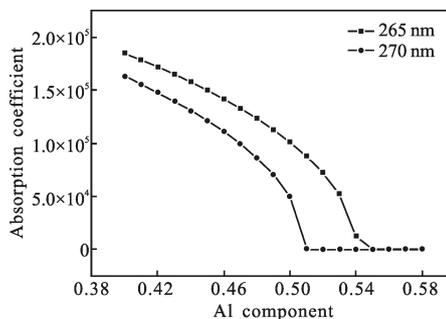


图 4 不同 Al 组分 $AlGaIn$ 材料的吸收系数曲线

Fig.4 Absorption coefficient curves of $AlGaIn$ alloy with different Al composition

理想的探测器要求光子只在 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 层中被

吸收, 因为 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 和 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 的光生载流子向耗尽区的扩散过程对器件的响应速度影响最大, 为此要求尽可能地提高 $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ 和 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 的载流子浓度, 以使 $n^+-Al_xGa_{1-x}N/p-Al_xGa_{1-x}N$ 二者载流子的扩散长度尽可能地减小。同时要求尽可能地降低 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 的背景载流子浓度, 以提高其光生载流子的寿命, 从而提高器件的量子效率。

一般要求 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 吸收层的背景载流子浓度小于 10^{15} cm^{-3} 甚至更低。但是, 现有技术生长的 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 的背景载流子浓度在 10^{16} cm^{-3} 量级。所以 $i-Al_xGa_{1-x}N$ 的载流子浓度由实际的材料生长技术限制。

2.4 p-Al_xGa_{1-x}N/p-GaN 层参数确定

$p-Al_xGa_{1-x}N$ 的参数主要根据对 $p-GaN$ 层光生载流子的阻挡要求、MOCVD 生长材料特点、欧姆接触来确定。如果去掉 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 层, 那么 $p-GaN$ 中的大部分光生载流子(非日盲光生电子)就要扩散进入耗尽区, 极大地降低了器件的抑制比, 所以必须加入 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 层。在不考虑异质结和极化效应的情况下, $p-Al_xGa_{1-x}N$ 的厚度应当大于 $p-GaN$ 层光生电子的扩散长度。但 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 的厚度不能太厚, 因为高 Al 组分 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 材料生长非常困难, 掺杂剂 Mg 的激活率很低(小于 10^{-2}), 材料的缺陷密度很高(大于 10^{11} cm^{-2})。要求尽可能地采用薄的 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 层, 以减小器件的串联电阻和暗电流。一般确定为 $20 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ 。

模拟计算表明, 随着 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 载流子浓度的增加, 器件的抑制比提高非常明显, 参见图 5^[4]。因为空穴浓度的增加, 从 $p-GaN$ 流入 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 的光生电子复合率增加, 电子的扩散长度减小, 更重要的

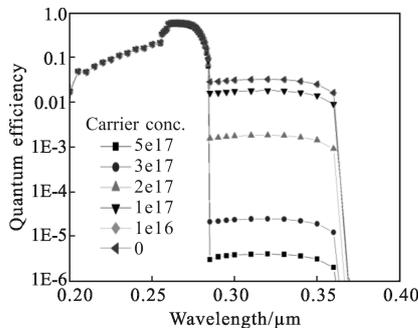


图 5 p-Al_xGa_{1-x}N 空穴浓度对器件抑制比的影响

Fig.5 Hole carrier concentrations of p-Al_xGa_{1-x}N dependence of device rejection ratio

是使 $p-GaN/p-Al_xGa_{1-x}N$ 异质界面的势垒升高(见图 6)^[4], 有效阻挡了 $p-GaN$ 中光生电子流向耗尽区。为了提高器件的抑制比, 应当尽可能提高 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 的载流子浓度, 比较好的条件是大于 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。提高 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 的载流子浓度还可以明显地降低器件的串联电阻。但是, $p-Al_xGa_{1-x}N$ 重掺杂非常困难, 现有 MOCVD 技术生长的 $p-Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ 的载流子浓度只能达到 10^{16} cm^{-3} 量级, 所以, $p-Al_xGa_{1-x}N$ 的载流子浓度也由材料生长技术限制。

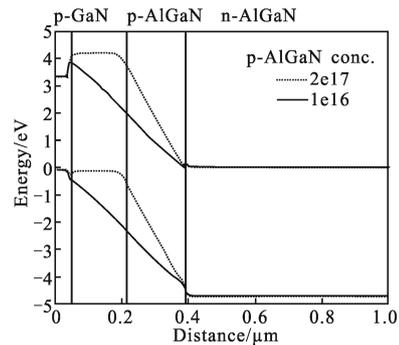


图 6 异质界面势垒与 p-Al_xGa_{1-x}N 空穴浓度的关系

Fig.6 Relationship between heterojunction interface potential barrier with hole carrier concentrations of p-Al_xGa_{1-x}N

加入 $p-GaN$ 层是因为其禁带宽度相对较窄, 有利于实现欧姆接触。对于背照式探测器, 在 $p-Al_xGa_{1-x}N$ 层参数确定的情况下, $p-GaN$ 的厚度可以适当加厚。

为了实现低电阻率的欧姆接触, 一般要求 $p-GaN$ 的载流子浓度达到 10^{19} cm^{-3} 量级。但是, $p-GaN$ 掺杂也很困难, 即使载流子浓度达到 10^{19} cm^{-3} 量级, 其材料的质量也将大大降低。一般选择 $p-GaN$ 的载流子浓度为 10^{18} cm^{-3} 。

3 设计优化与器件试制

折中考虑上述各种因素, 利用设计的结构参数并结合 MOCVD 材料生长特点开展材料生长研究, 通过工艺实验反复修改 $Al_xGa_{1-x}N-pin$ 各层材料的结构参数, 最终获得了实用的紫外探测器外延材料结构, 优化后的了的外延材料结构参数见图 7。

在 $Al_xGa_{1-x}N-pin$ 探测器外延材料质量得到保障的条件下, 应用优化了的结构参数进行器件试制。器件以 Ni/Au 和 Ti/Al/Ti/Au 分别作为 p 面电极、n 面电极, 采用 ICP (感应耦合等离子体) 工艺刻蚀 GaN/

AlGa_xN, 采用电子束蒸发工艺淀积 p 面和 n 面电极金属, 并优化了欧姆接触、ICP 刻蚀等工艺条件与参数。器件芯片加工完毕再在其背面的蓝宝石表面蒸镀 MgF₂ 增透膜(270 nm 波长紫外光的透过率可以提高到 98%)。

p ⁺ -GaN	150 nm	1.0×10 ¹⁸ cm ⁻³
p-Al _{0.45} Ga _{0.55} N	80 nm	5.0×10 ¹⁶ cm ⁻³
i-Al _{0.45} Ga _{0.55} N	200 nm	1.0×10 ¹⁶ cm ⁻³
n-Al _{0.55} Ga _{0.45} N	150 nm	2.0×10 ¹⁸ cm ⁻³
UID-Al _{0.7} Ga _{0.3} N	800 nm	
AlN/Al _{0.7} Ga _{0.3} N SLs		
AlN Template		
Sapphire		

图 7 Al_xGa_{1-x}N-pin 探测器结构参数

Fig.7 Al_xGa_{1-x}N-pin detector construction parameter

采用已定标的紫外增强 Si 探测器和光谱测试仪检测试制器件, 其光谱响应曲线见图 8。该器件的

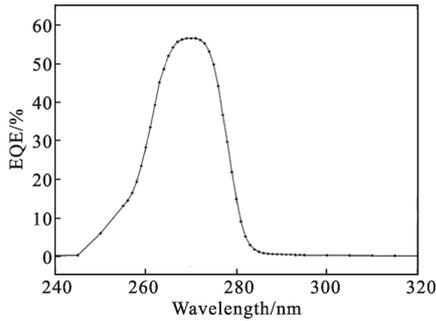


图 8 器件光谱响应曲线

Fig.8 Measured spectral responsivity of the AlGaIn photo-detector

峰值响应波长为 270nm, 光谱响应范围为 250~282nm,

峰值量子效率达到了 57%(0 V)。响应波长范围与设计值相比向短波方向扩展了 10 nm, 这是采用了薄的 n⁺-Al_{0.55}Ga_{0.45}N 的缘故。实验表明取得了比较理想的设计结果。

4 结论

设计了背照式 Al_xGa_{1-x}N-pin 探测器结构参数, 通过器件试制获得了期望的设计结果。器件的峰值响应波长为 270 nm, 光谱响应范围为 250~282 nm, 峰值量子效率达到了 57%(0 V)。

参考文献:

- [1] Monroy E, Omnes F, Calle F. Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, 18(4): R33-R51.
- [2] Reine M B, Hairston A, Lamarre P. et al. Solar-blind AlGaIn 256×256 p-i-n detectors and focal plane arrays[C]// SPIE, 2006, 6119: 6119-1.
- [3] Pulfrey David L, Kuek J J, Leslie M P, et al. High UV/solar rejection ratios in GaN/AlGaIn/GaN P-I-N photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(3): 486-489.
- [4] Huang Xin, Luo Muchang, Zhou Xun. Modeling and simulation of the back-illuminated AlGaIn/GaN based photodetectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2071-2077. (in Chinese)

黄鑫, 罗木昌, 周勋. 背照式 AlGaIn/GaN 基光电探测器的结构设计及性能模拟 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2071-2077.