

文章编号:1001-9014(2006)01-0006-04

短波红外 InGaAs/InP 光伏探测器系列的研制

张永刚, 顾溢, 朱诚, 郝国强, 李爱珍, 刘天东

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

摘要:采用气态源分子束外延方法及应用有源区同质结构及较薄的组分渐变 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 缓冲层, 研制了波长扩展的 InGaAs/InP 光伏探测器系列, 其室温下的截止波长分别约为 1.9 μm , 2.2 μm 和 2.5 μm . 对此探测器系列在较宽温度范围内的性能进行了细致表征, 结果表明在室温下其 R_0A 乘积分别为 765, 10.3 和 12.7 Ωcm^2 , 比室温降低 100K 时其暗电流和 R_0A 可改善约 3 个量级. 瞬态特性测量表明此探测器系列适合高速工作, 实测响应速度已达数十 ps 量级.

关键词:光伏探测器; 短波红外; InGaAs; 气态源分子束外延

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A

FABRICATION OF SHORT WAVELENGTH INFRARED InGaAs/InP PHOTOVOLTAIC DETECTOR SERIES

ZHANG Yong-Gang, GU Yi, ZHU Cheng, HAO Guo-Qiang, LI Ai-Zhen, LIU Tian-Dong

(State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: Using homo-junction structure and relative thin linear graded $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ as the buffer layer, extended wavelength InGaAs/InP photo detector series with cut-off wavelength of about 1.9, 2.2 and 2.5 μm at room temperature were grown by using GSMBE, and their performances over a wide temperature range were extensively investigated. Results show that at room temperature their R_0A products are 765, 10.3 and 12.7 Ωcm^2 respectively. Cooling down 100K from room temperature, about three orders of improvement could be obtained for the dark current and R_0A product. Transient measurements show that those detectors are quite suitable for high speed applications, and their response speed is scores of ps.

Key words: photovoltaic detector; short wavelength infrared; InGaAs; GSMBE

引言

短波红外(1~3 μm)波段的光电探测器及其阵列在红外遥感^[1]、夜视、温度测量及气体测量等方面都有重要应用. 在此波段上除碲镉汞^[2]和铟化物外,三元系的 InGaAs 也是性能优良的的制作光电探测器的材料. 对于 InGaAs, 由于其具有很好的材料稳定性及良好的抗辐照性能, 并且有更成熟的材料生长和器件工艺技术可资利用, 因此可以期望探测器具有更佳的表现, 特别是在较高的工作温度及强辐照环境下. 采用与 InP 晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料制作的探测器其截止波长约为 1.7 μm , 它们在光通信等领域已得到了广泛应用, 并已充分证明了其优异性能.

为使 InGaAs 探测器的截止波长向长波方向拓展, 即制作所谓波长扩展的 InGaAs 探测器, 就需要增加 InGaAs 中 In 的组分从而使材料的禁带宽度相应减小. 例如, 要将 InGaAs 探测器的截止波长从 1.7 μm 扩展至 1.9, 2.2 或 2.5 μm , 就需要使 In 的组分从 0.53 增加至 0.6, 0.7, 或 0.8, 这会使 InGaAs 和 InP 衬底间有 +0.5%, +1.16% 和 +1.85% 这样大的晶格失配. 在此情况下为保证良好的材料质量从而防止探测器性能劣化, 就必须引入合适的缓冲层结构. 用氢化物气相外延(HVPE)^[1,3,4,5]或金属有机物气相外延(MOVPE)^[6-8]方法制作的具有不同缓冲层及有源结构的波长扩展 InGaAs 探测器已有一些报道, 对其性能也进行了充分评估, 但采用分子束外延方法制作这样的探测器仍是一个挑战. 与

收稿日期: 2005-04-15, 修回日期: 2005-10-16

Received date: 2005-04-15, revised date: 2005-10-16

基金项目: 国家“973”项目基金(G20000683) 国家“863”项目基金(2002AA313040)

作者简介: 张永刚(1957-), 男, 上海市人, 研究员, 主要研究方向: 化合物半导体光电材料与器件.

HVPE 和 MOVPE 方法相比, MBE 具有更好的控制精度和在线控制手段, 并也已经发展成为适合规模生产的方法. 本文报道了我们采用气态源分子束外延(GSMBE)方法研制的波长扩展 InGaAs/InP 光伏探测器系列, 其室温下的截止波长分别达到 $1.9 \mu\text{m}$ 、 $2.2 \mu\text{m}$ 及 $2.5 \mu\text{m}$, 并对其在很宽温度范围内的性能进行了细致表征.

1 实验

研制不同截止波长的 InGaAs 探测器所用外延材料是在 VG Semicon V80H GSMBE 系统上生长的, 探测器的有源区为同质结结构, 并采用了较薄的缓冲层. 整个外延结构由 $0.5 \mu\text{m}$ 低掺杂 n^- InP 缓冲层(掺杂浓度控制在约 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)、 $1.5 \mu\text{m}$ 低掺杂 n^- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 组分渐变缓冲层(组分 x 分别由 0.53 渐变至 0.6, 0.7 或 0.8, 掺杂浓度控制在约 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)、 $2.5 \mu\text{m}$ 低掺杂 n^- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 光吸收层(组分 x 分别为 0.6, 0.7 或 0.8, 掺杂浓度控制在约 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)以及 $0.5 \mu\text{m}$ 高掺杂 p^+ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (组分 x 分别为 0.6, 0.7 或 0.8, 掺杂浓度控制在约 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 帽层构成. 外延生长采用掺硫的 (100) 正晶向 n^+ InP 衬底, 其载流子浓度约 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$. 此系统中生长的晶格匹配单层低掺杂 n^- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料的室温迁移率大于 $5000 \text{cm}^2/\text{Vs}$. 生长好的外延片具有光亮的表面, 沿 $\langle 011 \rangle$ 和 $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ 方向可观察到在较大正失配情况下的典型布纹结构. 探测器外延材料的结构特性采用 Philips X-pert 四晶衍射仪进行了测量, 组分值与预期相符.

生长好的探测器外延材料采用常规工艺制成台面结构的器件. 首先采用光刻和湿法刻蚀制作具有不同直径的台面结构, 然后用聚酰亚胺进行钝化, 再采用光刻、AuBe/Au 蒸发和剥离工艺制作正面电极, 此后衬底经减薄抛光后蒸发 AuGeNi/Au 背面电极, 合金化后再划成芯片进行封装测试.

探测器的响应光谱采用 Nicolet Magna 760 富利叶变换红外光谱仪测量, 测量中使用 CaF_2 分束器及 Ever-Glo 红外光源. 测量时探测器芯片封装在铜热沉上再置于金属杜瓦瓶的冷头上, 其输出信号直接输入到光谱仪的前置放大器中. 由于采用了液氮制冷的杜瓦瓶, 因此可以分别测量室温(制冷前)及 77K(制冷后)下的响应光谱, 测量时探测器均在零偏压下工作.

探测器的 C-V 特性在室温及 1MHz 的频率下进行, 使用 HP8240A 电容仪, 测量中探测器芯片采用

普通 TO 封装. 探测器在不同温度下的暗电流特性采用 HP4156A 精密半导体分析仪进行测量, 测量中探测器芯片封装于双列直插管壳中再置于氮循环制冷机的冷头上, 在此测量装置上电流测量精度可达 pA 级, 并可在很大温度范围(10K - 350K)内进行连续变温.

为了解探测器的响应速度, 还采用飞秒激光器和高速取样示波器对其瞬态特性进行了测量, 测量时探测器芯片封装于自制的高速 SMA 管壳中. 测量中使用了波长为 $1.53 \mu\text{m}$ 的自锁模光纤激光器, 脉冲宽度在数百飞秒量级, 重复频率为数十 MHz, 取样示波器的频响为 20 GHz, 测量系统的频响主要受示波器频响的限制.

2 结果与讨论

图 1(a) 及图 1(b) 分别示出了探测器在 77K 及室温下的相对响应光谱, 探测器的光敏面直径为 $150 \mu\text{m}$. 由图可见, 对所研制的 In 组分为 0.6, 0.7 和 0.8 的波长扩展 InGaAs 光伏探测器, 其室温下的峰值响应波长分别为 $1.86 \mu\text{m}$, $2.10 \mu\text{m}$ 和 $2.36 \mu\text{m}$, 50% 起峰波长分别为 $1.51 \mu\text{m}$, $1.76 \mu\text{m}$. 和 $1.80 \mu\text{m}$, 50% 截止波长分别为 $1.90 \mu\text{m}$, $2.17 \mu\text{m}$. 和 $2.45 \mu\text{m}$, 在 77K 下, 其峰值响应波长分别蓝移至 $1.68 \mu\text{m}$, $1.92 \mu\text{m}$ 和 $2.12 \mu\text{m}$; 50% 起峰波长分别蓝移至 $1.42 \mu\text{m}$, $1.66 \mu\text{m}$. 和 $1.69 \mu\text{m}$, 50% 截止波长分别蓝移至 $1.72 \mu\text{m}$, $1.95 \mu\text{m}$. 和 $2.17 \mu\text{m}$; 截止波长的温度系数分别为 0.78nm/K , 0.99nm/K 和 1.25nm/K . 在图 1 的响应光谱中, 中心波长约 $1.87 \mu\text{m}$. 和 $1.38 \mu\text{m}$ 附近的响应起伏波动清晰可见, 这是由测量光路上的水汽吸收引起的.

室温下的 C-V 测量结果表明, 对所研制的 In 组分为 0.6, 0.7 和 0.8 的波长扩展 InGaAs 光伏探测器, 零偏压下的电容分别为 11.5pF (65nF/cm^2), 8.5pF (48nF/cm^2) 和 9.2pF (52nF/cm^2), 探测器的光敏面直径为 $150 \mu\text{m}$. 测量结果中包含了管壳和引线等的分布电容约 0.65pF (根据对不同光敏面直径的探测器测量得出). 根据 C-V 测量结果, 对探测器 pn 结光吸收层一侧的载流子浓度分布根据 $N = (1/q\epsilon_0\epsilon_r A^2) [C^3 / (dC/dV)]$ 和 $X_D = \epsilon_0\epsilon_r A/C$ 进行了计算, 载流子浓度均在 $10^{15} - 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 量级, 其中组分 $x = 0.7$ 的探测器浓度最低, 这与材料生长时的掺杂条件是相符的.

图 2(a) 示出了探测器在室温(290K)下的反向 I-V 特性, 图 2(b) 为暗电流随温度变化的测量结果,

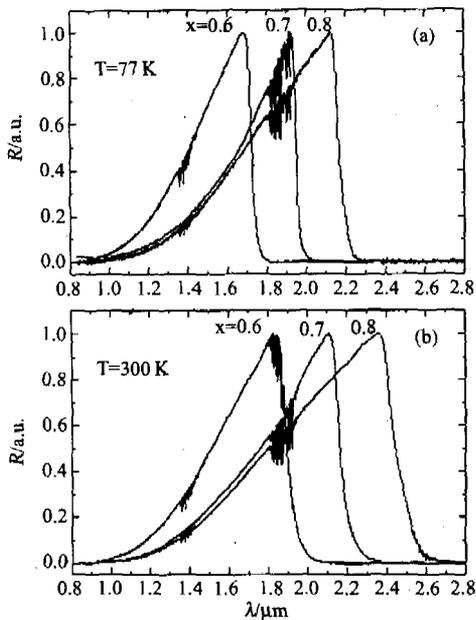


图1 探测器系列在77K及300K下的相对响应光谱测量结果

Fig.1 Measured relative response spectra of the detector series at 77K and 300K

温度范围在150K-350K, 测量时探测器上的反向偏压为50mV, 测量电流范围约7个量级, 探测器光敏面直径为100 μ m. 图3示出了探测器的 R_0A 乘积随温度变化的测量结果, 温度范围在170K-350K. 表1中汇总了室温(290K)及热电制冷可达到的温度(210K)下的主要测量结果, 其中探测器的峰值探测率是根据实测的 R_0A 并假定探测器的外量子效率为0.7得出的计算值.

由图2(a)可见, 对不同In组分的波长扩展InGaAs光伏探测器, 其暗电流随温度的变化表现出相似的特性, 但随In组分的增加暗电流增加明显, 特别是在在较高的反偏压下. 对 $x=0.7$ 和 $x=0.8$ 两种探测器, 其暗电流和 R_0A 值在低偏压下均十分接

表1 探测器系列在290K及210K下的测量结果(暗电流测量反向偏压为50mV, D_{λ}^* 为计算值)

Table 1 Measured performance of the detector series at 290K and 210K (Dark current is measured at reverse bias of 50mV, D_{λ}^* is a calculated value)

	T	I_D	R_0	R_0A	D_{λ}^*
	K	nA	Ω	Ωcm^2	$\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$
$x=0.6$	290	3.28	9.73M	765	2.28E11
	210	0.0097	5.14G	404K	5.58E12
$x=0.7$	290	199	131K	10.3	3.0E10
	210	0.338	59.8M	4.70K	7.2E11
$x=0.8$	290	151	162K	12.7	3.7E10
	210	0.545	39.7M	3.12K	6.6E11

近, $x=0.8$ 的器件甚至稍优于 $x=0.7$, 注意到在材料生长时对 $x=0.8$ 的探测器Si掺杂浓度稍高, 这表明对于工作于零偏压下的光伏探测器, 适当提高光吸收层的掺杂浓度是有利的, 这也与我们的理论分析相符, 对于由不同组分材料构成的不同截止波长的探测器, 其暗电流特性及其产生机制有一定区别, 但在室温及热电制冷温区与材料的禁带宽度相关联的热激发暗电流仍起主导作用, 由图2(b)的测量结果得出, 在210K-350K温度范围内, 对In组分为0.6, 0.7和0.8的波长扩展InGaAs光伏探测器, 其暗电流的热激活能分别为0.488 eV, 0.447 eV和0.404 eV, 这与其材料的禁带宽度减小是一致的. 由测量结果可以看出, 此类探测器随温度降低其性能改善十分明显, 探测器工作温度比室温降低100K时其暗电流和 R_0A 约可改善3个量级, 因此热电制冷对改善其性能是十分有效的. 随着温度继续降低, 其特性改善逐渐趋缓, 表明此后缺陷辅助隧穿机制将逐步起主导作用.

对所研制的波长扩展InGaAs光伏探测器系列的瞬态响应测量表明, 此类探测器可具有很高的频率响应, 其响应速度与常规的光通信波段器件

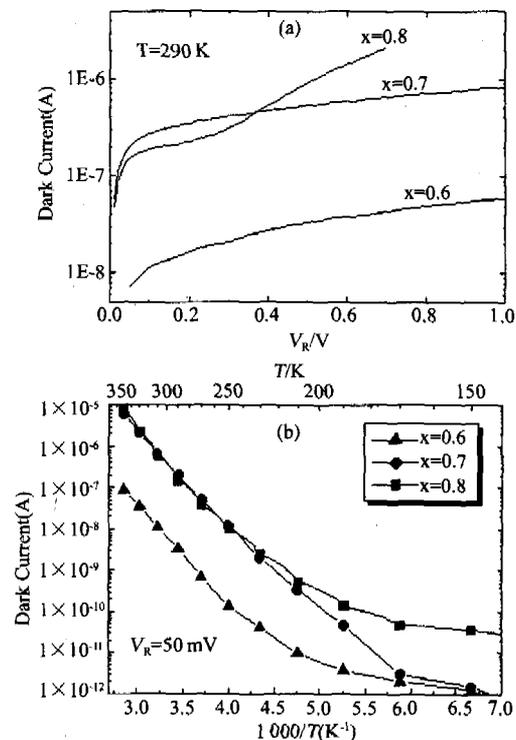


图2 探测器系列在室温下的I-V特性(a)及在50mV反偏压下的暗电流随温度的变化(b)

Fig.2 Measured room temperature I-V characteristics (a) and dark current versus temperature at reverse bias of 50mV (b) of the detector series

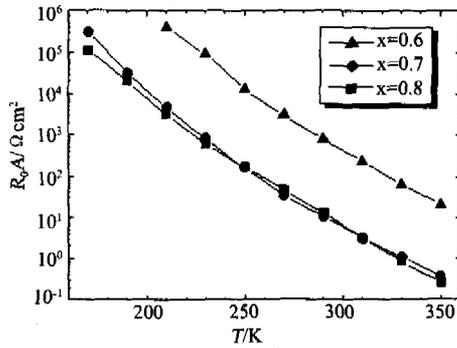


图3 探测器系列的 R_0A 乘积随温度变化的测量结果
Fig.3 Measured dark current versus temperature of the detector series at reverse bias of 50mV

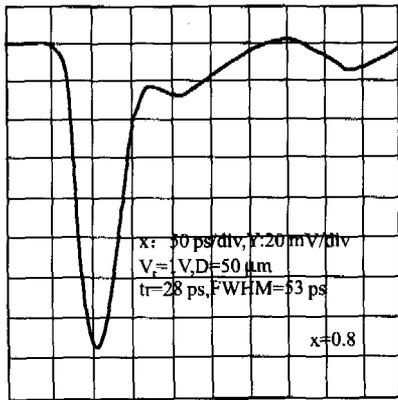


图4 $x=0.8$ (室温截止波长约 $2.5\mu\text{m}$) 的波长扩展 InGaAs/InP 探测器在室温下的瞬态特性测量结果。
Fig.4 Measured room temperature transient response of a $x=0.8$ InGaAs/InP wavelength extended detector (cut-out wavelength about $2.5\mu\text{m}$ at room temperature).

相当。图4为一组分为 $x=0.8$ 的探测器的瞬态响应示波器照片,此探测器的光敏面直径为 $50\mu\text{m}$,器件工作在 1V 反偏压下。由图可见,此器件瞬态响应上升时间为 28ps , FWHM 为 53ps ,扣除测量系统的频响后,探测器的频响可达 10GHz 。

3 结论

采用 GSMBE 方法,用有源区同质结构及较薄

的组分渐变缓冲层研制了波长扩展 InGaAs 光伏探测器系列,其室温下的截止波长分别约为 $1.9\mu\text{m}$, $2.2\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$, R_0A 乘积为 765 , 10.3 和 $12.7\Omega\text{cm}^2$ 。对此探测器系列的温度特性进行了测量表征,结果表明此类探测器十分适合在室温及热电制冷条件下工作,热电制冷温度下其性能可大为改观。瞬态特性测量结果表明此探测器系列可在高速下工作,实测响应速度已达数十 ps 量级。

REFERENCES

- [1] Hoogeveen R W M, van der A R J, Coede P H. Extended wavelength InGaAs infrared ($1.0-2.4\mu\text{m}$) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere[J]. *Infrared Phys. & Tech.*, 2001, **42**:1-16.
- [2] JIA Jia, CHEN Gui-Bin, GONG Hai-Mei, et al. Study on the junctions of SWIR HgCdTe photo diodes at room temperature with laser beam induced current[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (贾嘉,陈贵宾,龚海梅,等. 室温短波碲镉汞结区的 LBIC 方法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1):11-14.
- [3] Makita K, Torikai T, Ishihara H, et al. GaInAs/InAsP pin photodiodes for long wavelength regions ($\lambda > 2\mu\text{m}$) grown by HVPE[J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**:379-380.
- [4] Martinelli R U, Zamerowski T J, Longeway P A. $2.6\mu\text{m}$ InGaAs photodiodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**:989-991.
- [5] Linga K R, Olsen G H, Ban V S, et al. Dark current analysis and characterization of InGaAs/InAsP graded photodiodes with $x > 0.53$ for response to longer wavelength ($> 1.7\mu\text{m}$) [J]. *IEEE J. Lightwave Tech.*, 1992, **10**:1050-1055.
- [6] di Forte-Poisson M A, Brylinski C, di Persio J, et al. GaInAs/InAsP/InP photodiodes for the 1.6 to $2.4\mu\text{m}$ spectral region grown by low pressure MOCVD [J]. *J. Crystal Growth*, 1992, **124**:782-4791.
- [7] Wada M, Hosomatsu H. Wide wavelength and low dark current lattice-mismatched InGaAs/InAsP photodiodes grown by MOVPE [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**:1265-1267.
- [8] D'Hondt M, Moerman I Daele P V, et al. Influence of buffer layer and processing on the dark current of $2.5\mu\text{m}$ -wavelength 2% -mismatched InGaAs photodetectors [J]. *IEE Proc. Optoelectron.*, 1997, **144**:277-282.