

新型 GaAs/GaAlAs 非对称量子阱 红外光电导探测器

史衍丽 邓军 杜金玉 沈光地

(北京工业大学,北京市光电子技术实验室,北京,100022)

尹洁

(华北光电技术研究所,北京,100015)

TN215

摘要 提出一种新型 GaAs/GaAlAs 子带间光吸收的红外光电导探测机理,利用 MOCVD 系统进行器件材料的生长,研制了 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 的台面形式单管,测到了明显的红外光电流信号及阱间共振隧穿效应造成的负阻震荡现象,对器件的性能测试结果表明,器件的光电流响应和信噪比随着阱数增加而增加,器件噪声比常规 GaAs/GaAlAs 量子阱红外探测器低一个数量级。

关键词 GaAs/GaAlAs 非对称量子阱红外探测器,负阻震荡,光电流,信噪比。

神化家

A NEW TYPE OF ASYMMETRICAL GaAs/GaAlAs QUANTUM WELL INFRARED PHOTOCONDUCTOR *

SHI Yan-Li DENG Jun DU Jin-Yu SHEN Guang-Di

(Beijing Optoelectronic Technology Laboratory,
Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

YIN Jie

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract A new type of mechanism of asymmetrical GaAs/GaAlAs quantum well infrared photoconductor was proposed based on the novel idea of the intersubband transition due to infrared radiation. The detectors with an area of $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ grown by MOCVD were fabricated. The peak of negative conductance and large infrared absorption were observed. It was found experimentally that the photocurrent signal and the signal-to-noise ratio of the detectors increase with the number of the wells, and the noise of the detectors is one order of magnitude smaller than the conventional GaAs/GaAlAs multi-quantum well detectors.

Key words asymmetrical GaAs/GaAlAs quantum well infrared detectors, negative conductance oscillation, photocurrent, signal-to-noise ratio.

引言

量子阱红外探测器是近几年发展起来的一种新型红外探测器,是目前红外传感技术的发展方向,它具有响应速度快,量子效率高,可变波长,热稳定性和均匀性好等优点,在军事和民用方面占有重要地位,已成为国际上极为重视的高技术研究前沿课题^[1~3]。常规 GaAs/GaAlAs 量子阱光电导红外探测器的探测基于量子阱

内子带间电子或空穴的跃迁,其响应波长由阱宽和垒高决定,器件结构生长后,响应波长也就固定;响应带宽窄,约 $1\mu\text{m}$;另外,该类器件由其物理机理决定了器件响应率与阱数无关;且为低场输运,响应速度不是很快;暗电阻小,暗电流大^[3~4]。针对常规 GaAs/GaAlAs 量子阱光电导红外探测器存在的以上不足之处,我们提出了一种新型中远红外 GaAs/GaAlAs 光电导红外探测器的新结构,器件具有大光电流、超高速响应和低暗电流

等特点^[4];另外,采用不同的器件结构设计,可制成窄响应带宽,但响应波长可随外加偏置电场进行调制的器件,或宽响应带宽^[5](约 $5\sim 10\mu\text{m}$)两类器件.本文报道了对窄带宽电压调谐型新型 GaAs/GaAlAs 光电导红外探测器的研制.通过对 $200\times 200\mu\text{m}$ 的台面形式单管的测试,观测到了明显的红外光电流信号及阱间共振隧穿效应造成的负阻震荡现象,测试结果表明,器件的光电流响应和信噪比随着阱数增加而增加.

1 器件原理

新型 GaAs/GaAlAs 光电导红外探测器的基本结构单元如图 1 所示,其中包括三层: p^+ -GaAs, n^+ -GaAs 和 $i\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层, n^+ -GaAs 作为吸收层,夹于 p^+ -GaAs 和 $i\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 之间,从图 1 中可看到 p^+ -GaAs 与 n^+ -GaAs 之间构成较大的势差,可使到达其界面的电子获得很大的动能,从而以很高的速度飞过结构,被集电极收集,使器件具有超高速的响应.另外根据器件操作机理,基于此结构,通过对器件进行不同的结构设计,可获得宽带宽型探测器和响应波长可调制型探测器两类器件.若 n^+ -GaAs 势阱很薄,阱中能级形成量子化能级,则阱中的电子吸收了红外辐射后发生子带间的跃迁,由于阱宽随外加偏压变化而发生变化,故器件响应波长也将随外加偏压变化而变化;而若 n^+ -GaAs 势阱很宽,阱中的电子由于自由载流子吸收,可获得宽至 $5\sim 10\mu\text{m}$ 的响应带宽.

2 材料生长和器件制备

根据泊松方程和薛定谔方程的自恰计算,我们设计了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的 Al 组分值 $x=0.45$, GaAs、GaAlAs 禁带宽度差对应为 376meV , 响应峰值位于 $10\mu\text{m}$ 的两个周期的器件 CID01, 其相应的结构参数如

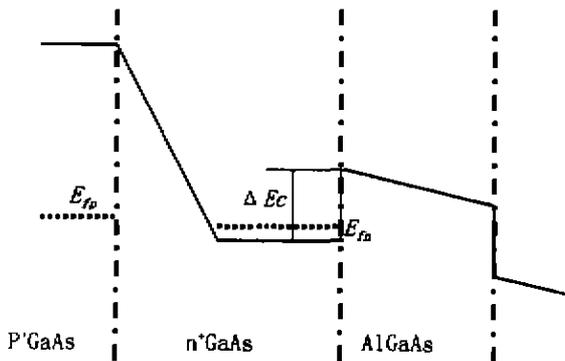


图 1 器件工作状态下的导带图
Fig. 1 Schematic diagram of the conduction band edge under the reverse bias

下: p^+ -GaAs、 n^+ -GaAs 的掺杂浓度分别为 $4e+18\text{cm}^{-3}$ 和 $7e+19\text{cm}^{-3}$, p^+ -GaAs、 n^+ -GaAs 和 $i\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的宽度分别为 10nm 、 30nm 和 50nm , 其中上下两个电极均为 $2e+18\text{cm}^{-3}$ 的 n^+ -GaAs; 为便于比较, 还设计了除周期数不同外, 其它结构参数都一样的三个周期的器件 CID02.

利用 AIXTRON 200 MOCVD 系统进行材料的生长, 外延材料的质量是制成高性能器件的关键, 在材料生长过程中, 采用 TEM 和 REM 等多种分析来调整材料生长条件, 以获得高质量的外延材料. 通过光刻和湿法腐蚀工艺制成 $200\times 200\mu\text{m}$ 的台面形式单管, 蒸发 Au/Ge/Ni 合金, 并在适当条件下退火以形成欧姆接触, 并采用 45° 斜面入射. 器件制备工艺流程要进行合理设计, 精确控制台面腐蚀深度, 使恰好到达 n^+ -GaAs 型区域, 确定最优化合金条件以形成良好的欧姆接触电极.

3 测试结果与分析

采用富里叶变换红外光谱仪测试了两个器件 77K 温度的光谱响应(见图 2), 器件 CID01 的响应峰值位于 $9.93\mu\text{m}$ 处, 而器件 CID02 的响应峰值位于 $9.87\mu\text{m}$, 而且 CID02 的吸收明显高于 CID01, 与理论计算的 $10\mu\text{m}$ 的响应吻合较好, 同时也表明 MOCVD 生长的材料的重复性较好.

在室温和 77K 温度下对两个器件都观察到了明显的负阻震荡现象, 图 3 为无光照 300K 及 77K 温度下器件 CID01 的正向伏安特性曲线(指上电极为正, 下电极为负), 图 3 中 300K 峰谷比平均为 3.5, 这表明获得了所需要的均匀的高掺杂隧道材料. 图 4 和图 5 为 77K 温度下器件 CID01 和 CID02 的负向伏安特性曲线(指上电极为负, 下电极为正, 暗电流取对数坐标), 如在图 4、5 中所显示的, 器件 CID01 在电压为 2.95V (暗电流为 11.44nA) 处暗电流开始增加, 对 CID02 器件在约 4.5V (暗电流为 31.72nA) 处暗电流开始增加, 从下面的器件响应偏置关系中可看到, 他们与最佳工作偏置吻合较好. 另外两个器件在工作范围内暗电流都很小, 为几十 nA 数量级, 与器件设计的机理是一致的.

利用 EG&G5210 锁相放大器在 77K 温度、800K 黑体和 1000Hz 调制频率的测试条件下检测了器件的电流响应和噪声信号, 两个器件都测到了明显、稳定的红外信号, 图 6 表示了器件 CID01 和器件 CID02 的电流、噪声信号和信噪比与偏置的关系. 从图 6 可看到, 器件 CID01 在 2.95V 处信噪比最大, 为 506.0, 对应的峰

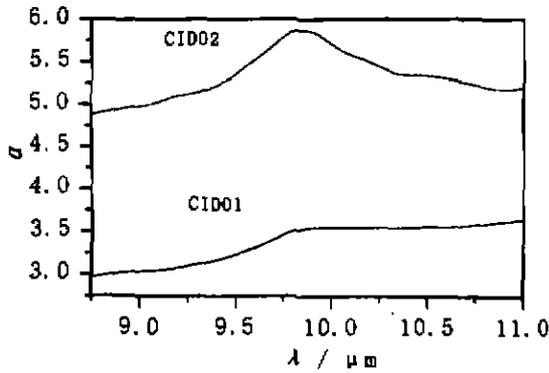


图 2 77K CID01, cid02 响应光谱曲线
 Fig. 2 The absorption spectra versus wavelength of samples CID01 and CID02 at 77K

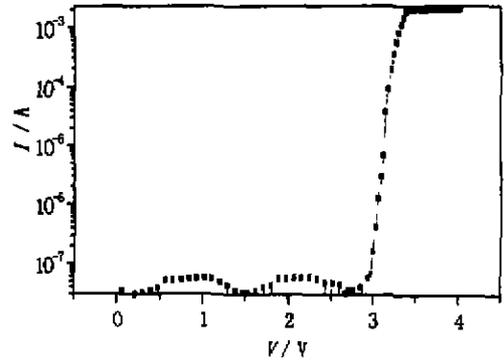


图 4 77K CID01 反向 I-V 曲线
 Fig. 4 The I-V characteristic curve of sample CID01 at 77K for reverse bias

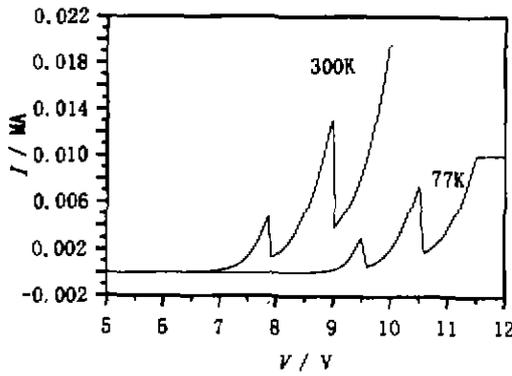


图 3 77K, 300K CID01 正向 I-V 曲线
 Fig. 3 The I-V characteristic curves measured at 77K and 300K for sample CID01 under forward bias

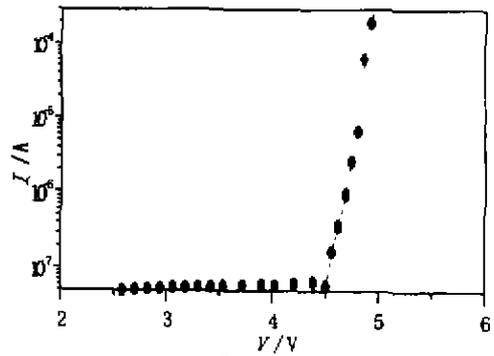


图 5 77K CID02 反向 I-V 曲线
 Fig. 5 The I-V characteristic curve of sample CID02 at 77K for reverse bias

值光电流为 96pA, 器件 CID02 在 4.5V 处信噪比最大, 为 1264.9, 对应的峰值光电流为 260pA, 两个器件的噪声电流皆为 0.20pA/(Hz)^{1/2}, 这表明器件 CID02 的峰

值光电流比器件 CID01 提高 2 倍多, 信噪比即探测率也提高 2 倍(见图 7), 这是新结构探测器优于常规量子阱探测器非常重要的一点, 对于常规量子阱红外探测

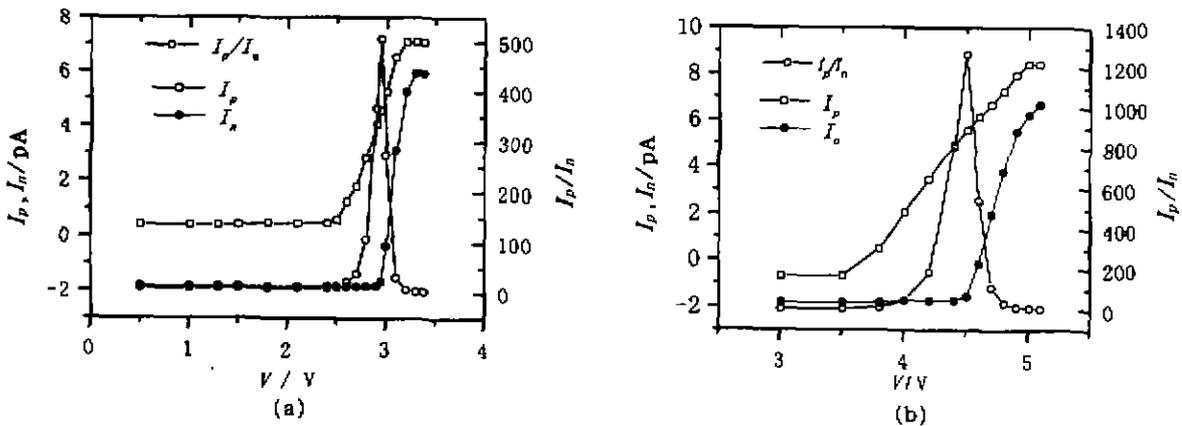


图 6 77K CID01 和 CID02 光电流、噪声电流和信噪比与反向偏置的关系
 (a) CID01 (b) CID02

Fig. 6 Plot of the measured photocurrent I_p , noise current I_n , and the signal-to-noise ratio vs reverse bias at 77K (a) for CID01 (b) for CID02

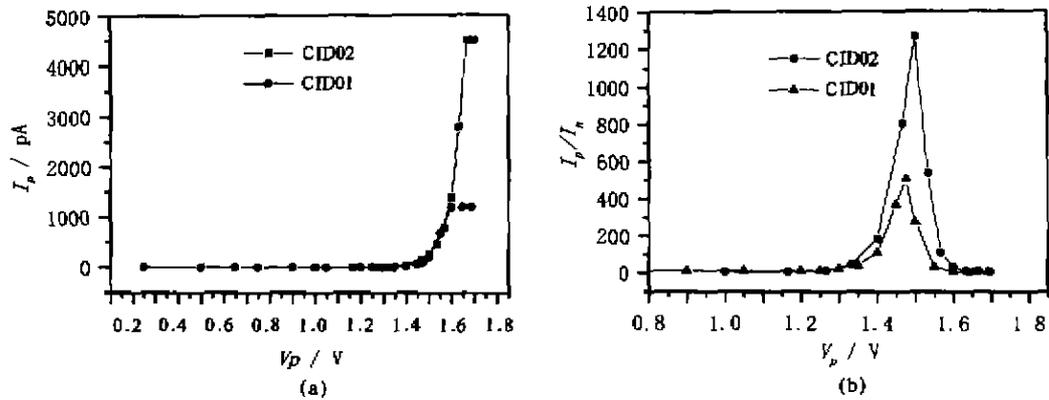


图7 77K相同场强度下CID01和CID02的光电流和信噪比较

(a) 光电流 (b) 信噪比较

Fig. 7 Comparison between CID01 and CID02 under the same electric field at 77K

(a) the photocurrent (b) the signal-to-noise ratio

器,其光电流并不随阱数而增加^[3~4].图7显示了两个器件在相同场强 V_p (即单位周期所加的电压)下的光电流、信噪比较,从图7中可见,随着阱数增加,器件光电流及信噪比明显提高,这对于制备大光电流的高性能中远波段红外探测器将具有很大的应用潜力.

4 结语

提出了一种基于GaAs/GaAlAs系子带间吸收的新结构中远红外探测器,利用MOCVD系统进行高质量材料的生长,研制了 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 的台面形式单管,测到了明显的红外光吸收及阱间共振隧穿效应造成的负阻震荡现象,对器件的性能测试结果表明,器件的光电流响应和信噪比随着阱数增加而增加,这对于制备大光电流高响应的高性能中远波段红外探测器将具有极大的应用潜力.

致谢 特别感谢北京市光电子技术实验室工作人员韩金茹、董欣、刘莹、王丽森、周静等在器件制备过程中给予的大力协助,以及邹得恕研究员及其他老师有益的讨论.

REFERENCES

- [1] West L C, Eglash S J. First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well, *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**(12): 1156-1158
- [2] Manasreh M O. *Semiconductor Quantum Wells and Superlattice for Long-wavelength Infrared Detectors*, Boston and London: Artech House, 1992: 55-106
- [3] Levine B F. Quantum-well infrared photodetectors, *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(8): 1-40
- [4] LI Ning, LI Na, LU Wei, et al. Development of 64×64 GaAs/AlGaAs MQW long-wave infrared FPAs, *J. Infrared Millim. Waves* (李宁, 李娜, 陆卫, 等. 64×64 元 GaAs/AlGaAs 多量子阱长波红外焦平面研制, *红外与毫米波学报*), 1999, **18**(6): 427-430
- [5] CHENG Xing-Kui, HUANG Bo-Biao, XU Xian-Gang, et al. Intersubband infrared absorption in GaAs/AlGaAs multi-quantum well grown by MOCVD, *J. Infrared Millim. Waves* (程兴奎, 黄柏标, 徐现刚, 等. MOCVD 生长 GaAs/AlGaAs 多量子阱子带间红外吸收特性, *红外与毫米波学报*), 1994, **13**(1): 33-36