

3~ 5.3 μm $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器*

吴文刚 常 凯 江德生 李月霞 郑厚植

(半导体超晶格国家重点实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

H. C. Liu

(*Institute for Microstructural Sciences, National Research Council, Canada*)

摘要 本文报道我们率先研制出的 3~ 5.3 μm $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器的制备和性能。该探测器具有光伏特征, 77K 温度、 $\pm 7\text{V}$ 外偏压下的 500K 黑体探测率达到约 $1.0 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 并且, 与 1-2 子带间跃迁相对应的光电流峰值响应波长可随外偏压在中红外 (3~ 5.3 μm) 波段作适当调谐。运用平面波展开法, 依据样品的阱、垒结构参数, 计算了 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱 1-2 子带间跃迁的 Stark 效应, 其结果与相应的实验观测结果符合得很好。

PACC: 7240, 7830, 7320

1 引言

量子阱红外探测器有响应带宽较窄 (通常为 1~ 2 μm) 的特点, 因此, 利用量子阱子带间跃迁的 Stark 效应^[1], 通过调节外加偏压以实现器件光电流峰值响应波长在某个大气窗口内或两个大气窗口间转移, 是增强量子阱红外探测器在实际应用中红外对抗能力的一种有效方法。非对称台阶量子阱子带间跃迁的 Stark 效应有如下特点^[1, 2]: 垂直于材料生长平面, 中小强度的电场分量即可引起大数值的 Stark 移动, 方向相反的电场分量将分别导致 Stark 蓝移和红移。这些特点使得非对称台阶量子阱结构很适合用来制作光电流峰值响应波长可调谐的红外探测器。

目前, 对 $\text{GaAs}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器已多有研究^[3~ 5], 但用该系材料制作的这类器件因量子阱阱深较浅而只能工作在 8~ 12 μm 波段。在实际应用特别是军事应用中, 对透过中红外 (3~ 5.3 μm) 大气窗口的红外辐射的探测非常重要。我们选用能实现较深阱深的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱结

* 中国科学院院长基金资助项目

吴文刚 男, 1966 年出生, 博士后, 现从事量子阱红外探测器及相关物理问题的研究
江德生 男, 1940 年出生, 研究员, 博导, 从事低维结构物理和半导体光学性质的研究
1997-07-07 收到, 1997-10-28 定稿

构率先研制出了工作在 3~ 5.3 μm 波段的红外探测器

2 材料与器件制备

用分子束外延(MBE)系统在半绝缘 GaAs 衬底上生长 32 周期的窄阱内 δ 掺杂的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱结构 优化设计使得这种量子阱的基态位于窄阱中,第一激发态位于宽阱口附近而成为准束缚态 这种设计经证明不仅能削弱基态电子的热电离发射或热辅助隧穿对暗电流的贡献,起到减小暗电流的作用,而且第一激发态与势垒导带底会形成共振,有利于光电子的纵向输运,不牺牲探测器的响应率 X 射线双晶衍射测量结果显示,生长出的样品结构良好,符合设计要求 MBE 生长的上述多量子阱区被夹在上、下两层 n^+ -GaAs 之间

单元 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器为直径 200 μm 的台面形式,它采用通常的光刻、III-V 湿法腐蚀工艺制成 在台面顶部和底部的 n^+ -GaAs 层上蒸上 Au/GeNi,通过合金形成良好的顶、底电极欧姆接触 虽然非对称台阶量子带间跃迁的选择定则较对称方阱的有所放宽^[1, 6],我们仍采用背面斜角入射方式 光入射斜面是在外延衬底上进行机械研磨和抛光制成的

3 器件性能测试分析

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器的器件性能体现在光电流响应、暗电流、黑体探测率等几个主要方面,其观测结果具有关联性

图 1(a) 和 (b) 是该探测器在 77K 温度下不同外偏压状态的光电流响应谱,图中在约 2348 cm^{-1} 位置处出现的谱线凹陷,经验明是测量系统光路中大气内 CO_2 的吸收造成的 通过与样品的红外吸收谱及依据样品结构参数计算出的量子阱能级位置的比较,发现光电流谱中在与 1-2 子带间跃迁相对应的位置(1995 cm^{-1} 附近)上有响应信号 从图 1 可以看到,不加外偏压时,该信号就比较强,这说明 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱结构的 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 势垒区存在内建电场,光电子在这一电场作用下纵向漂移并最终被电极所收集才形成了光电流 优化的结构设计使得在势垒顶部作定向漂移的光电子借助量子阱第一激发态与 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 势垒导带底的共振,从一垒区直接进入下一垒区 当在探测器顶电极上施加较小正偏压(相对于探测器底电极)时,光电流响应信号减弱,即光电流减小,它说明外加正偏压所产生电场的方向与 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 势垒区内建电场的方向相反 但是,随着正偏压值逐渐增大, $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 势垒的能带将从向一方倾斜转化为平带,再转化为向相反方向倾斜 相应地,如图 1 所示,上述光电流响应信号先逐渐减弱到基本消失,接着又显著增强,直至光电子在 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 势垒层中漂移速度的饱和导致光电流的饱和^[7] 值得注意的是,正偏压下当光电流响应信号由减弱转向增强时,光电流的方向已发生了改变 相反,外加负偏压时, $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 势垒的能带的倾斜方向始终不变,倾斜度却不断提高(电场得到加强),上述光电流响应信号始终在增强,直至同样因光电子漂移速度的饱和而趋于饱和 图 1 充分证明了所研制的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器具有光伏特征

根据以上分析, $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 势垒区内建电场的方向指向器件顶电极,其强度估计不低于 5kV/cm (因为使光电流降为零并开始反向所须加的正偏压值约为 0.7V,此偏压几乎全

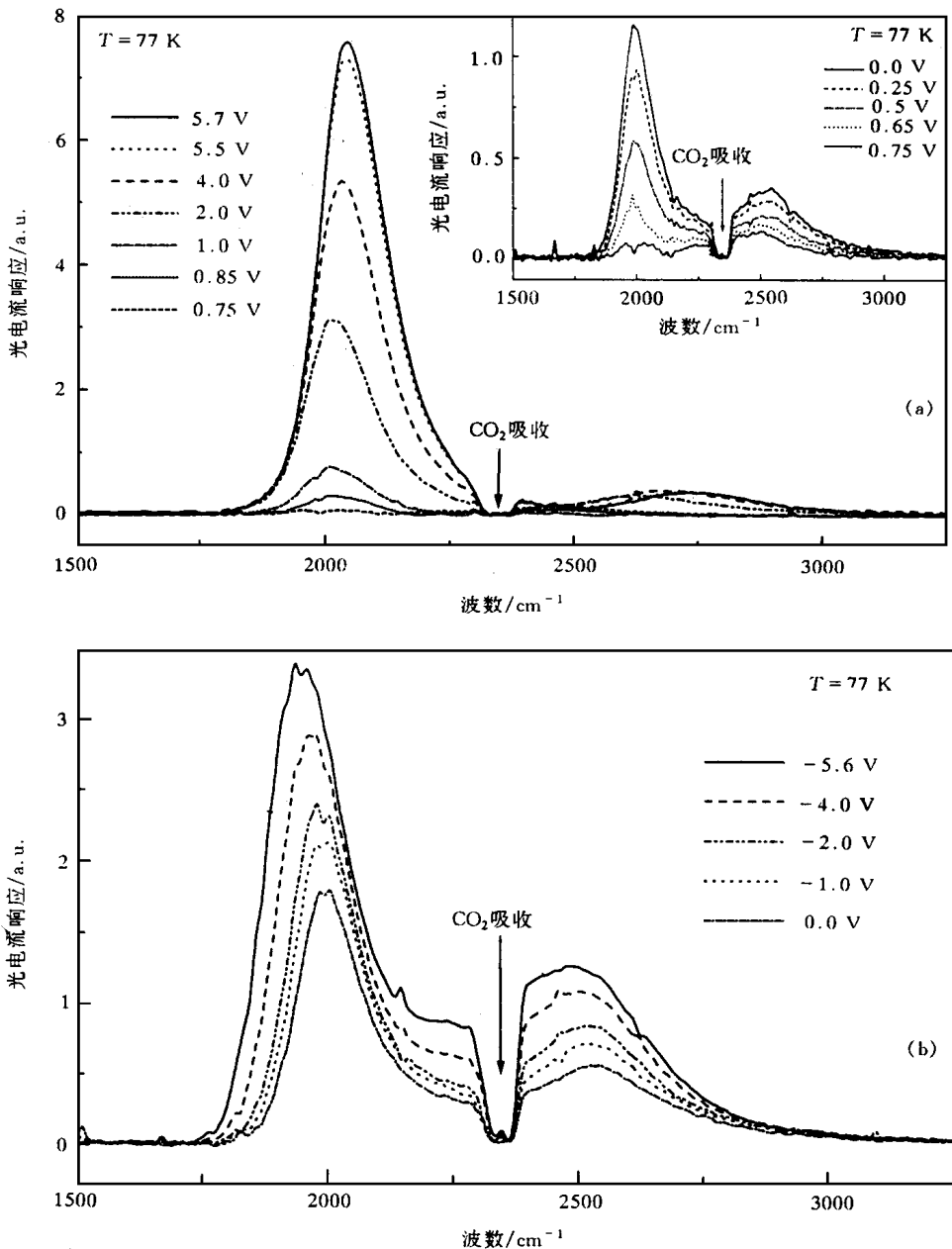


图 1 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器
在 77K 温度下不同外偏压状态的光电响应谱

(a) 外偏压 0~5.7V; (b) 外偏压 0~-5.6V.

部用来抵消总厚度约 $1.26\ \mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 势垒层中的内建电场), 而量子阱区相应内建电场的方向则指向衬底。这个内建电场可认为是 MBE 生长过程中引入的不对称性导致的^[8]。

图 1 所示的光电流谱中, 存在峰值位置在 $2486\text{cm}^{-1}\sim 2745\text{cm}^{-1}$ 、半宽较宽的响应峰, 我们指认此峰是该量子阱的基态到阱上面的能量连续态的跃迁的贡献

利用运算放大器电路测量了 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器在 77K 温度下的暗电流。零偏压下,暗电流不为零,大小约 $2 \times 10^{-10}\text{A}$ (直流测量回路的本底电流在 10^{-12}A 量级),直到外偏压加至 0.5~ 0.75V (对于不同的器件单元而略有差别)时,暗电流才趋于零。不加外偏压时,暗电流不是由基态电子依次在阱间的直接隧穿形成,而是基态电子经热电离发射或热辅助隧穿到达势垒顶部后,受 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 势垒区内建电场的推动在整个多量子阱区纵向运输的结果。运输过程与上述光电子的类似,因此,所

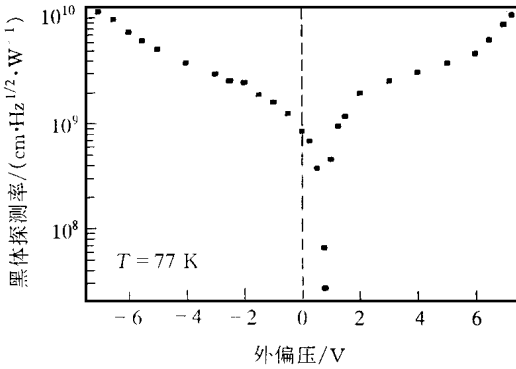


图 2 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器在 77K 温度下不同外偏压状态的黑体探测率

观测到的暗电流特性,不仅证实了根据光电流响应谱对器件有源区内建电场情况的分析,同时也说明了对于光伏型器件,与其工作温度有关的基态电子的热电离发射和热辅助隧穿可以成为零偏压下其暗电流的重要来源

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器在 77K 温度下不同外偏压状态的黑体探测率的测量结果示于图 2。零偏压下,500K 黑体探测率约为 $0.85 \times 10^9 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。正偏压加至 0.5~ 0.75V,500K 黑体探测率达到最低;当外偏压为 $\pm 7\text{V}$ 时,500K 黑体探测率提高到 $1.0 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 左右,这一指标已基本满足实用化要求。

结合图 1,不难得出结论:实际应用时,该探测器适合于工作在较大的正或负偏压状态,因为这时不仅器件的黑体探测率高,而且其光电流响应强。

4 子带间跃迁的 Stark 效应

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器在不同外偏压下与 1-2 子带间跃迁相对应的归一化光电流响应谱,可用来观测该跃迁的 Stark 效应。零偏压下,光电流峰值响应波长约在 $5\mu\text{m}$;外加正偏压时,该峰值波长逐渐减小,对应于 1-2 子带间跃迁的 Stark 蓝移;外加负偏压时,该峰值波长逐渐增大,对应于 1-2 子带间跃迁的 Stark 红移。当外偏压在约 $\pm 6\text{V}$ 的范围内调节时,光电流响应峰峰值位置大致在 $1945\text{cm}^{-1} \sim 2045\text{cm}^{-1}$ 的区域内相应变动,对应于十几个 meV 的 1-2 子带间跃迁的 Stark 移动。图 3 中的离散数据点表示的是根据上述探测器归一化光电流谱分析得到的光电流响应峰峰值位置与器件有源区电场强度的实验关系,即实测到的 1-2 子带间跃迁的 Stark 效应。

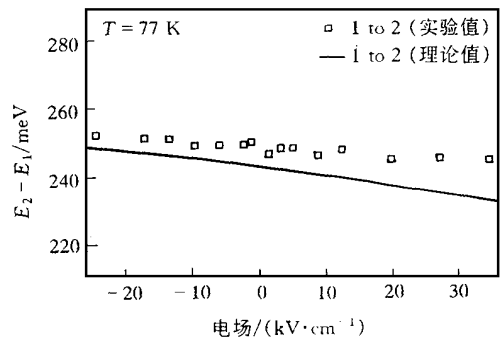


图 3 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱 1-2 子带间跃迁的 Stark 效应

对非对称台阶阱等复杂形状量子阱的束缚态子带间(包括束缚态子带到准束缚态子带)的电场下跃迁行为进行理论计算,比较便

利的是运用平面波展开法,即在周期性边界条件下对 Schrodinger 方程中的电子波函数做正交平面波基集展开^[9, 10]

$$\Psi_e(z) = \frac{1}{\sqrt{L_z}} \sum_m a_m e^{ik_x x} e^{ik_y y} e^{ik_z z + iK_m z} \quad (1)$$

式中 z 表示超晶格多量子阱结构的生长方向; L_z 表示超晶格多量子阱结构的周期长度; a_m 为线性组合系数; K_m 是倒格矢。在有效质量包络函数理论的框架下,将式(1)代入 Schrodinger 方程,就得到可直接用于数值求解的久期方程

$$|H_{mm} - \delta E_{mm}| = 0 \quad (2)$$

依据方程(2),并选用对样品进行 X 射线双晶衍射测量所得到的阱、垒结构参数,计算了 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱 1-2 子带间跃迁的 Stark 效应。计算结果如图 3 实线所示,它与相应的实验观测结果符合得很好。

暗电流测量实验表明,在 77K 温度下,该探测器阻抗超过 200M Ω ,耐压大于 $\pm 20\text{V}$ 。可以预计,若进一步提高器件外加偏压的绝对值,上述 1-2 子带间跃迁的 Stark 移动至少能达到几十个 meV,从而实现相对应的光电流峰值响应波长随外加偏压在 $3\sim 5.3\mu\text{m}$ 波段作较大范围调谐。

5 结论

我们首次研制出了 $3\sim 5.3\mu\text{m}$ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 非对称台阶量子阱红外探测器,实现了与 1-2 子带间跃迁相对应的光电流峰值响应波长随外加偏压在中红外($3\sim 5.3\mu\text{m}$)波段的可调谐。该器件光电流响应、暗电流、黑体探测率等主要性能参数已接近实用化要求。

参 考 文 献

- [1] Y. J. Mii, R. P. G. Kasunasiri, K. L. Wang *et al*, Appl Phys Lett, 1990, **56**: 1986
- [2] P. F. Yuh and K. L. Wang, IEEE J. Quantum Electron., 1989, **25**: 1671
- [3] E. Martinet, F. Luc, E. Rosencher *et al*, Appl Phys Lett, 1992, **60**: 895
- [4] S. R. Parihar, S. A. Lyon, M. Santos *et al*, Appl Phys Lett, 1989, **55**: 2417
- [5] A. Fraenkel, A. Brandel, G. Bahir *et al*, Appl Phys Lett, 1992, **61**: 1341
- [6] Y. J. Mii, K. L. Wang, R. P. G. Kasunasiri *et al*, Appl Phys Lett, 1990, **56**: 1046
- [7] B. F. Levine, C. G. Bethea, G. Hasnain *et al*, Appl Phys Lett, 1990, **56**: 851
- [8] 张耀辉,江德生,夏建白,等,半导体学报, 1996, **17**: 151
- [9] J. B. Xia and K. Huang, Acta Phys Sin, 1988, **37**: 1; Chin. Phys., 1989, **9**: 303
- [10] B. F. Zhu, Phys Rev., 1988, **B38**: 13316

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ Asymmetric Step Quantum Well Mid-Infrared (3~ 5.3 μm) Detectors

Wu Wengang, Chang Kai, Jiang Desheng, Li Yuexia and Zheng Houzhi

*National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*

H. C. Liu

Institute for Microstructural Sciences, National Research Council, Canada

Received 7 July 1997, revised manuscript received 28 October 1997

Abstract For the first time, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ asymmetric step quantum well mid-infrared (3~ 5.3 μm) detectors are fabricated successfully. The devices display both photovoltaic-type response and bias-controlled modulation of the peak position of the photocurrent response ascribed to the 1-2 intersubband transitions (ISBT) in the quantum wells. The black-body detectivity (D_{bb}^*) reaches to about $1.0 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ at 77K under a bias of $\pm 7\text{V}$. By expanding the electron wave function in terms of normalized plane wave basis within the framework of the effective-mass envelope-function theory, the Stark effects of the 1-2 ISBT in the asymmetric step wells are calculated. The obtained results agree well with the corresponding experimental measurements.

PACC: 7240, 7830, 7320