

# GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器的光电流谱

黄醒良 沈文忠 陆卫 穆耀明 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家实验室, 上海, 200083)

**摘要** 测量了 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器在零偏压、小偏流和大偏压等条件下的光电流谱, 并结合理论计算的光跃迁能量讨论了光电流谱的多峰结构和异常增强特性:

**关键词** 多量子阱, 红外探测器, 光电流谱, 禁戒跃迁.

## 引言

GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器 (以下简称探测器) 的光电流谱描述了器件的光电响应的频谱特性, 并且光电流谱的线形和精细结构还与多量子阱材料 (以下简称材料) 的能带结构、光激发电子及其输运过程相关<sup>[1]</sup>. 我们曾详细报道了器件随温度、偏置和光照等条件的变化特性<sup>[2]</sup>. 本文报道器件在液氮温度下零偏压、小偏流和大偏压下的光电流谱实验结果, 并结合转移矩阵法计算的子带间光跃迁的能量分布<sup>[3]</sup>, 讨论器件的光电流谱多峰结构和异常增强特性.

## 1 实验

实验用材料 (样品 #G123) 是在 VG80H MBE 系统上生长的, 其结构为 50 周期的 GaAs (5.2 nm)/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As (30 nm) 多量子阱, 阱的中部 4.1 nm 和上下电极层的设定 Si 掺杂浓度均为  $n^+ = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 势垒高  $H_b = 0.226 \text{ eV}$ <sup>[2]</sup>.

将材料光刻制作  $200 \mu\text{m} \times 280 \mu\text{m}$  的线列台面 (相邻元件的中心距离为  $220 \mu\text{m}$ ), 同时光刻和蒸镀直径  $\phi 150 \mu\text{m}$  的上电极和宽  $300 \mu\text{m}$  的条形下电极. 经合金化、 $45^\circ$  磨角和 In 球熔焊等工艺<sup>[2]</sup>, 制备出 12 元线列探测器并移装到液氮金属杜瓦瓶中.

实验是在 Nicolet 800 型傅里叶光谱仪上进行的. 把杜瓦瓶放到光谱仪的样品室并对好光路, 用电流调节器给器件加偏置<sup>[2]</sup>, 用 EG&G 5209 型锁相放大器前置放大光电信号并传输到光谱仪的数据处理系统. 选择适当的测试参量进行测量, 得到器件的光电流谱.

## 2 实验结果

### 2.1 12 元线列器件的光电流谱

图 1 为 12 元线列器件 (样品 MD92-7-1) 在偏流  $I_b = 50 \text{ nA}$  下的光电流谱的峰值波长、半高宽和相对峰值强度. 线列器件的各元件的峰值波长 ( $\lambda_p \approx 6.95 \mu\text{m}$ ) 和半高宽 ( $\Delta\lambda \approx 0.55 \mu\text{m}$ ) 基本相同, 表明该器件和材料具有较好的均匀性. 个别元件 (如第 10、11 和 12 元) 的相对峰值强度较小, 可能与制备过程导致的各元件性能差异和入射光传输等不均匀相关. 该线列器件在  $50 \text{ nA}$  下直接测得 (没有扣除系统噪声<sup>[2]</sup>) 的平均探测率  $D_B^* \approx 3 \times 10^8 \text{ cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ , 与同一材料制备的单元器件在此测量条件下的  $D_B^*$  值相接近<sup>[2]</sup>.

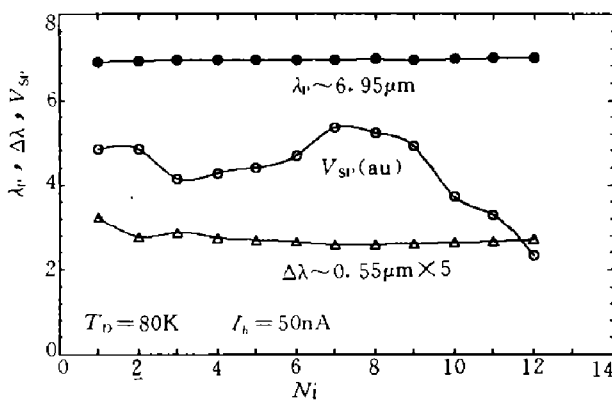


图 1 12 元线列器件的光电流谱的峰值波长、相对峰强和半高宽

Fig. 1 The peak wavelength, relative response at the peak and FWHM of the photocurrent spectra of a 12-element array

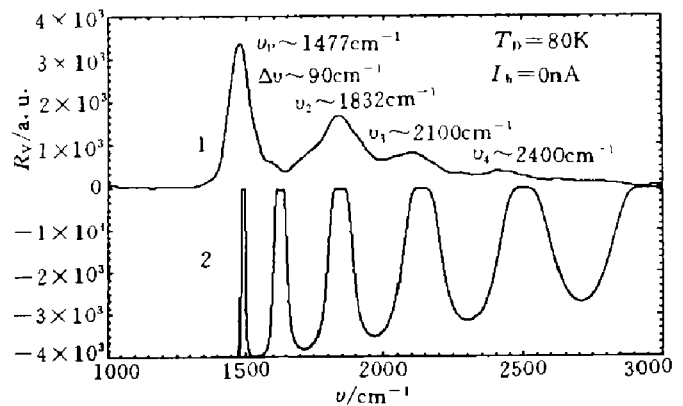


图 2 器件在零偏压下的光电流谱和理论计算光跃迁转移谱

Fig. 2 The photocurrent spectrum of a detector at zero bias and the transfer spectrum of transition of theoretical calculation

### 2.2 零偏压下的光电流谱

在图 2 中, 曲线 1 为线列器件的 1 号元件 (e1) 在零偏压下的光电流谱 (测量时分辨率为  $4 \text{ cm}^{-1}$ , 扫描次数为 64, 并经光滑处理); 曲线 2 是用转移矩阵方法计算得到的传输系数与基态到高激发能态的跃迁能量差 ( $E - E_1$ ) 的关系<sup>[3]</sup>. 实验曲线在约  $1500$ 、 $1800$ 、 $2100$  和  $2400 \text{ cm}^{-1}$  的 4 个峰结构, 应该分别对应于理论计算的  $E_1 \rightarrow E_2$ 、 $E_1 \rightarrow E_4$ 、 $E_1 \rightarrow E_5$  和  $E_1 \rightarrow E_6$  的子带间光跃迁.  $E_1 \rightarrow E_3$  的光跃迁对应于较弱的峰肩胛 (约  $1590 \text{ cm}^{-1}$ ). 4 个峰结构的峰强比依次为  $1:0.50:0.24:0.11$  (近似  $\propto 2^{-n}$ ). 相邻峰的峰能量差依次为  $355$ 、 $285$  和  $300 \text{ cm}^{-1}$ , 并与计算的对应峰值能量的差值基本相符. 4 个峰结构的半高宽依次增大, 也半定量地与计算结果相似.

### 2.3 小偏流下的光电流谱

图 3 是 e1 在小偏流下的光电流谱. 随着偏流的增大, 第 1 主峰强度迅速增大, 峰肩胛 ( $1590 \text{ cm}^{-1}$ ) 也随之稍微增大, 但到较高能态的光电流强度增长较慢, 并且峰形结构弱化成很宽的高频带尾. 图 4 是从图 3 处理得到的第 1 主峰的峰值波长、半高高宽和相对峰

值强度与偏流的关系. 在 0~80 nA 范围内, 第 1 主峰的相对峰值强度近似随偏流线性增大, 但其峰值波长和半高宽变化很少.

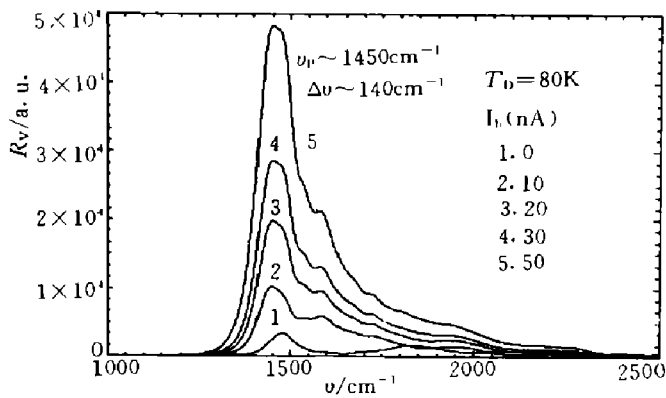


图 3 器件 e1 在小偏流下的光电流谱  
Fig. 3 The photocurrent spectra of the detector e1 at small bias current

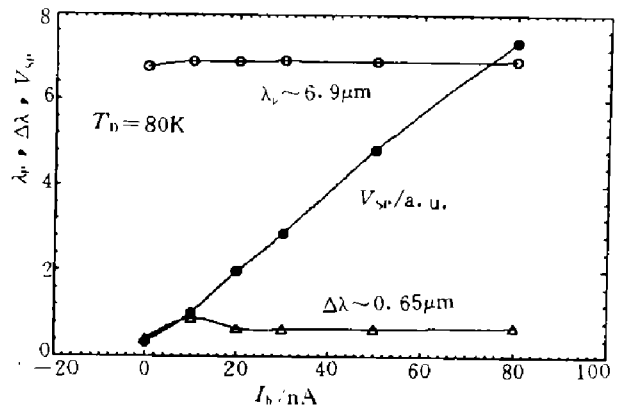


图 4 器件 e1 在小偏流下的光电流谱的峰值波长、相对峰强和半高宽  
Fig. 4 The peak wavelength, relative response at the peak and FWHM of the photocurrent spectra of the detector e1 at small bias currents

### 2.4 大偏压下的光电流谱

图 5 是 5 号元件 (e5) 在大偏压下的光电流谱. 随着偏压的增大, 只看到 1 个峰结构和不太明显的肩胛隆起, 并且谱线的相对强度在高频侧下降稍慢. 图 6 是由图 5 处理得到的峰值波长、半高宽和相对峰值强度与偏压的关系. 在 -6~8 V 范围内峰值波长随偏压的变化很小. 偏压从 0 增大到 8 V 时, 半高宽从约 0.5  $\mu\text{m}$  逐渐增大到 1.2  $\mu\text{m}$ , 相对峰值强度  $V_{SP}$  在 0 至  $\pm 1$  V 时较小, 这与多量子阱处于弱场区有关. 在  $\pm 1$  至  $\pm 4$  V 范围  $V_{SP}$  近似随偏压线性变化, 对应于多量子阱子带能量位置的系列错开和光电响应增大. 在 5 至 8 V 时因光电流趋于饱和而器件的电阻不断减小, 使  $V_{SP}$  近似随偏压线性减

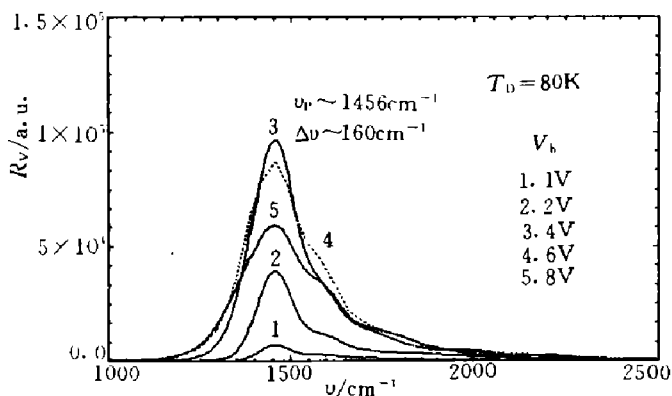


图 5 器件 e5 在大偏压下的光电流谱  
Fig. 5 The photocurrent spectra of the detector e5 at large bias voltage

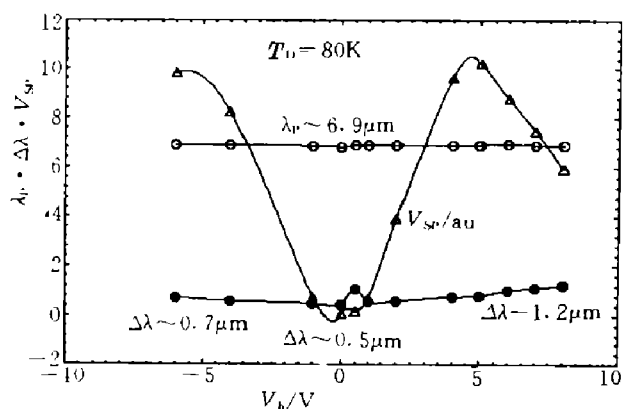


图 6 器件 e5 在大偏压下的光电流谱的峰值波长、相对峰强和半高宽  
Fig. 6 The peak wavelength, relative response at the peak and FWHM of the photocurrent spectra of the detector e5 at large bias voltages

小<sup>[2]</sup>. 由于在大偏压下半高宽逐渐增大, 所以器件在黑体光响应极大时的偏压值 (约 7.0 V) 高于器件在光电流谱峰值极大时的偏压值 (约 4.5 V)<sup>[2]</sup>.

## 2.5 异常光电流谱

图 7 是 e1 在正偏压下的光电流谱. 在 2 V 偏压时, e1 的主峰 (约 1440  $\text{cm}^{-1}$ ) 与 e5 的很相似, 只是其肩胛 (约 1570  $\text{cm}^{-1}$ ) 有较明显隆起, 并形成较大的半高宽 (约 270  $\text{cm}^{-1}$ ). 在 4 V 偏压时, 主峰漂移到约 1420  $\text{cm}^{-1}$ , 肩胛 (约 1550  $\text{cm}^{-1}$ ) 明显增大与主峰形成双峰结构, 并且又有明显的另一肩胛隆起 (约 1750  $\text{cm}^{-1}$ ), 因而形成更大的半高宽 (约 350  $\text{cm}^{-1}$ ). 在 8 V 偏压时形成了明显的 3 峰结构, 3 个峰的峰位 (峰值 a.u.) 分别为 1400  $\text{cm}^{-1}$  (0.321)、1580  $\text{cm}^{-1}$  (0.341) 和 1710  $\text{cm}^{-1}$  (0.239), 半高宽增大到 510  $\text{cm}^{-1}$  (因出现多峰结构和半高宽异常增大而被称为异常光电流谱).

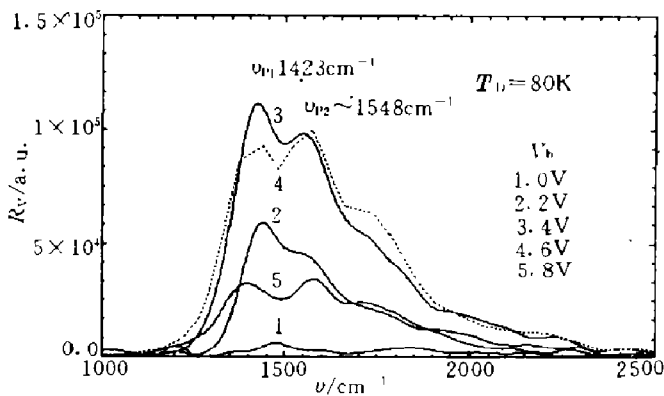


图 7 器件 e1 在正偏压下的异常光电流谱  
Fig. 7 The abnormal photocurrent spectra of the detector e1 at forward bias voltages

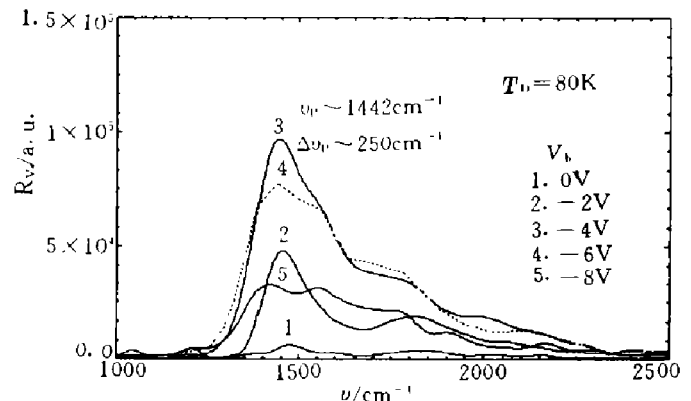


图 8 器件 e1 在反偏压下的异常光电流谱  
Fig. 8 The abnormal photocurrent spectra of the detector e1 at reverse bias voltages

图 8 是 e1 在负偏压下的光电流谱. 在 -2 V 偏压时, 主峰 (约 1450  $\text{cm}^{-1}$ ) 旁边还没有明显的肩胛隆起, 但在约 1820  $\text{cm}^{-1}$  有一宽峰. 在 -4 V 和 -6 V 偏压时, 与正偏压时相似, 只是在约 1550  $\text{cm}^{-1}$  的肩胛隆起稍弱而未形成分立峰. 在 -8 V 偏压时也形成了 3 峰结构, 3 个峰的能量位置 (峰值 a.u.) 分别为 1420  $\text{cm}^{-1}$  (0.329)、1560  $\text{cm}^{-1}$  (0.313) 和 1770  $\text{cm}^{-1}$  (0.214), 半高宽也达到约 480  $\text{cm}^{-1}$ .

## 3 讨论

在零偏压下观察到光电流谱结构, 表明多量子阱内部可以存在不对称的能带结构或内建电场, 使器件在零偏压下有较强的光伏效应, 这可能与材料生长时阱两侧界面附近的实时生长条件、界面粗糙度和 Si 杂质在高温时的扩散差异相关<sup>[4]</sup>. 光电流谱存在多峰结构, 表明电子从多量子阱的基态到其势垒以上量子阱扩展态都可发生光跃迁 ( $\Delta n > 1$ ). 随着电子能量的增大, 电子从较强的 2 维势阱束缚态逐步过渡到准 3 维导带内的自由载流子状态<sup>[5]</sup>.

在图 3 中, 光电流谱相邻峰之间可以观察到响应低谷, 表明整个光电流谱是由多个分

立的光电流谱峰叠加而成的, 而理论曲线给出的响应低谷还要深一些 (峰谷比较大), 势垒以上的扩展子能带可以有一定交叠和相互作用, 并随着阱束缚作用的弱化而使子带展宽. 因  $E_1 \rightarrow E_3$  仍具有较强的 2 维光跃迁特性, 所以形成明显的峰肩. 从图 3 中的 4 个峰结构的峰值能量 (1477:1832:2100:2400) 和峰强 (1:0.50:0.24:0.11) 可求得由两相邻峰值构成的指数  $s$  ( $V_{SP} = \nu^{-s}$ ) 依次为 3.22、5.38 和 5.84,  $s=3.22$  (较低能量的 2 个大峰对应的  $s$ ) 与电子受电离杂质散射时自由载流子的吸收指数 3.5 相接近 (阱中高掺杂 Si 电离杂质的散射)<sup>[6]</sup>. 而用较高能量峰值计算的  $s$  值较大, 这可能是因光激发电子寿命随能量增大变短并弛豫到较低量子数的子能带, 使光电流谱峰与光吸收谱峰的相对强度规律有别.

在大偏压和光激发电子扫出时, 电子的平均漂移长度  $L_e$  趋于  $0.5L$  ( $L$  为多量子阱区域的宽度). 大偏压时第 1 主峰强度的极大值 (约  $1.0 \times 10^5$ ) 约为其在零偏压时 ( $3.4 \times 10^3$ ) 的 30 倍, 因多量子阱为 50 周期, 所以零偏压时第 1 主峰的平均漂移长度  $L_{e1}$  约为 1 个量子阱周期  $L_a$ . 由于多量子阱的垒宽  $L_b$  比阱宽  $L_w$  大得多, 只要光激发到势垒以上的电子的平均漂移长度大于  $0.5L_w$ , 电子在内建电场作用下从阱区漂移到垒区后, 就可从垒区上滑过  $L_a$  的等效平均漂移长度  $L_{eq}$ . 随着能量的增大, 光激发电子的寿命减小, 因而电子的  $L_{en}$  逐渐减小. 零偏压时因各个峰对应的真实  $L_{en}$  都在  $L_w$  和  $L_b$  之间, 各个峰对应的  $L_{eq}$  都约为  $L_b$ , 所以各个峰强的相对差异较小而可以观察到多峰结构. 随着偏流的增大, 因第 1 主峰电子的寿命较长, 电子的  $L_{e1}$  (上限为  $0.5L$ ) 和光电流强度近似随偏流线性增大. 但肩峰  $E_1 \rightarrow E_3$  的电子的寿命较短, 电子的  $L_{e2}$  只达到几个  $L_a$  (或不足  $L_a$ ), 所以对应的光电流增长不多而形成峰肩. 更高激发态的电子  $L_{en}$  就更短了, 因而光电流增长更少, 形成了高频带尾.

在 4 V 偏压时, e1 的肩比 e5 明显隆起, 并形成较大的半高宽, 但 e1 的峰值强度还与 e5 接近, 即异常增强并不弱化原有的光电响应. 到  $\pm 8$  V 时 e1 形成了由 3 个峰组成较宽半高宽的光电响应, 并且在  $2000 \text{ cm}^{-1}$  以上的光电流值也比 e5 更大. 与图 2 的理论曲线比较可知 e1 的 3 个大峰分别对应于  $E_1 \rightarrow E_2$ 、 $E_1 \rightarrow E_3$  和  $E_1 \rightarrow E_4$ , 其中较高频的 2 个峰 (包括高频带尾) 为异常光电流增大. 从  $\pm 8$  V 时在  $1600 \sim 2000 \text{ cm}^{-1}$  的光电流强度变化趋势可估算出  $s \approx 6$ , 这约为电离杂质的散射光跃迁的 2 倍. 由于从光谱仪入射到器件的光强在此频谱范围变化不大, 所以大偏压下光电流谱的异常增强, 可能是多量子阱在强场下倾斜和电激活 (e1 异常可能是被大电流冲击过), 导致子带增宽和子带间禁戒跃迁的部分解除以及吸收的活化增强. 这种异常的光谱响应增强有利于提高器件的热成像特性, 因而有可能通过优化材料的结构设计、外场激活和工作状态等条件来提高多量子阱红外探测器的光电响应特性.

## 4 结论

在 GaAs/AlGaAs 多量子阱中, 随着电子能量的增大, 电子从较强的阱束缚态逐步过渡到 3 维导带态, 因而子带间的禁戒跃迁逐步被解除而成为允许跃迁. 当存在较小的内建电场时, 零偏压下电子的平均漂移长度在  $0.5L_w$  和  $L_a$  之间都对应于  $L_a$  的等效平均漂移长度, 因而可观察到光电流谱的多峰结构. 随着偏流的增大, 第 1 主峰强度线性增大, 但

较高跃迁能量峰增长较慢而相对弱化. 在大偏压和电激活情况下, 因子带增宽和禁戒跃迁的部分解除以及吸收的活化增强, 可能会使器件的光谱响应异常增强和增宽, 并有可能通过人为增强和增宽光电流谱来提高多量子阱红外探测器的光电响应特性.

**致谢** 实验中得到本实验室的褚君浩、唐文国、刘普霖、蔡琤、蒋伟、梁洁和史国良等同事以及中国科学院表面物理国家实验室周小川先生的大力支持和协作, 作者在此表示衷心的感谢.

### 参考文献

- 1 Levine B F *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1992,71(10):5130-5135
- 2 黄醒良, 方晓明, 陆卫, 等. *红外与毫米波学报*, 1993,12(4):301-308
- 3 Jian-Ping Peng *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1993,73:989
- 4 Schneider H *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1992,60(12):1471-1473
- 5 沈学础. *半导体的光学性质*, 北京: 科学出版社, 1992.
- 6 方俊鑫, 陆栋主编. *固体物理学(下册)*. 上海: 上海科学技术出版社, 1981. 107

## STUDY OF PHOTOCURRENT SPECTRUM OF GaAs/AlGaAs MULTIPLE QUANTUM WELL INFRARED DETECTORS

Huang Xingliang Shen Wenzhong Lu Wei Mu Yaoming Shen Xuechu

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** The photocurrent spectra of GaAs/AlGaAs multiple quantum wells infrared detectors under zero bias, small current and large bias were measured, respectively. The characteristics of multi-peaks and abnormal enhancement of the photocurrent spectra are discussed in comparison to the transition energy of theoretical calculation.

**Key words** multiple quantum wells, infrared detector, photocurrent spectra, forbidden transition.