

GaAs/AlGaAs 多量子阱红外 探测器的特性研究

黄醒良 方晓明 陆卫 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)

李言谨 袁诗鑫

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

周小川

(中国科学院表面物理国家实验室, 北京, 100080)

摘要: 测量了 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器的伏安特性 $I_b(T_D, V_b)$ 、黑体光响应电压 $V_S(T_D, T_B, V_b)$ 和噪声电压 $V_N(T_D, V_b)$, 由此获得器件的黑体电压响应率 $R_{VB}(T_D, V_b)$ 和探测率 $D_B^*(T_D, V_b)$ 并用 Lorentz 光响应线形对 $V_S(T_D, T_B, V_b)$ 拟合给出器件的光电流谱的峰值波长 λ_P 和半峰宽 λ_w .

关键词: 多量子阱, 红外探测器, 器件特性, 线形拟合.

引言

近年来对 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器 (以下简称探测器) 的研究已取得了令人瞩目的进展, 如美国已研制出响应波长 $\lambda = 11 \sim 15 \mu\text{m}$, $D_B^* = 3 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 的高性能单元探测器^[1]; 峰值波长 $\lambda_P = 10 \mu\text{m}$, $D_\lambda^* = 2 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 的 10 元线列并实现了热成像^[2]; 以及 $D_\lambda^* = 5.8 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 的 128×128 元混成焦平面^[3]. 我国也测量了 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料 (以下简称材料) 的光谱特性^[7]和器件的伏安特性, 并制备出 $\lambda_P = 7.7 \mu\text{m}$, $D_\lambda^* = 1.2 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 的探测器^[8]. 因器件物理研究的需要, 本文进一步测量了这类探测器的特性与外界参量 (如探测器的偏压 V_b 和温度 T_D 以及黑体辐射源的温度 T_B 等) 的关系, 并对实验结果进行数据处理和分析.

本文 1992 年 7 月 1 日收到, 修改稿 1993 年 5 月 3 日收到.

1 实验

实验用的材料 (#G123) 是在 VG80H MBE 系统上生长的, 其结构为 $50 \times \text{GaAs}$ (5.2 nm)/ $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ (30 nm), 参见图 1. 阱的中部 4.1 nm 和上下电极层的设定 Si 掺杂浓度均为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 阱中高掺杂使多量子阱有适当强的光吸收, 上下电极层高掺杂便于制备欧姆接触电极, 从导带不连续因子 $Q_c = 0.6$ 、垒的组分值 $x_b = 0.3$ 和能隙 $E_g(x_b)$ 表达式可算得多量子阱的势垒高 $H_b = 0.226 \text{ eV}$ ^[6].

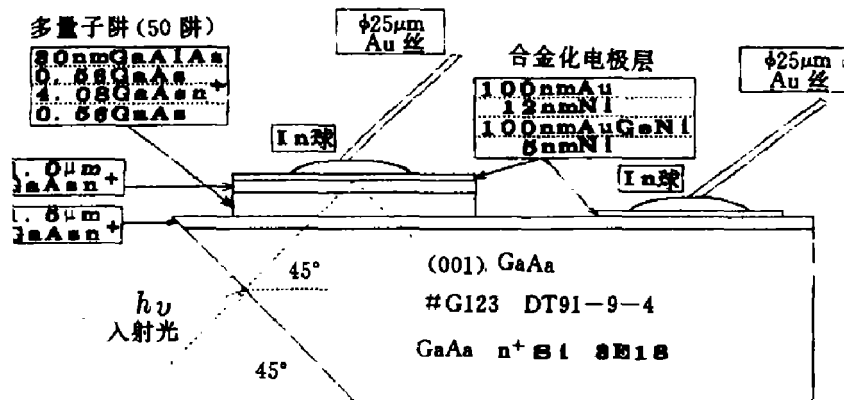


图 1 器件结构示意图

Fig. 1 Illustration of detector structure

把材料光刻出 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 的台面, 真空蒸镀 Au (100 nm)/Ni (12 nm)/AuGeNi (100 nm)/Ni (5 nm) 的电极层. 去胶后以蒸镀的电极层作保护, 用 $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{CH}_3\text{OH} = 1:1:2$ 溶液选择腐蚀至下 N^+GaAs 层, 再次光刻和蒸镀下电极层, 样品在高纯 $\text{N}_2:\text{H}_2 = 9:1$ 气氛和 $\sim 400^\circ\text{C}$ 的条件下合金化 1~3 min, 把样品侧面磨成 45° 角, 最后用 In 球熔焊引出电极并制成探测器, 器件结构见图 1.

实验使用的探测器特性测试系统如图 2 所示: 以黑体作红外光源, 温度 $T_B = 500 \sim 700 \pm 2 \text{ K}$ 可调, 调制盘频率 $f = 10 \sim 1000 \text{ Hz}$ 可调, APD 型循环致冷机的冷头提供的测量温度 $T_D = 13 \sim 300 \pm 1 \text{ K}$, 偏流调节器 (自制的电流源) 提供的测试电流 $I_b = 1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ A}$ 连续可调. 用 X-Y 记录仪和电流源测量器件的伏安特性, 用锁相放大器 (EG&G Model 124A) 的 ACVM 档测量器件的光响应电压和噪声电压, 并用 SR8 示波器监视探测器的输出信号波形.

2 实验结果

2.1 器件伏安特性 $I_b(T_D, V_b)$ 和微分电阻 $R_d(T_D, V_b)$

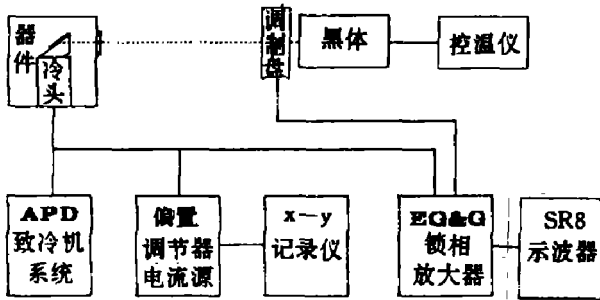


图 2 器件测量系统示意图
Fig. 2 A scheme for detector measurement

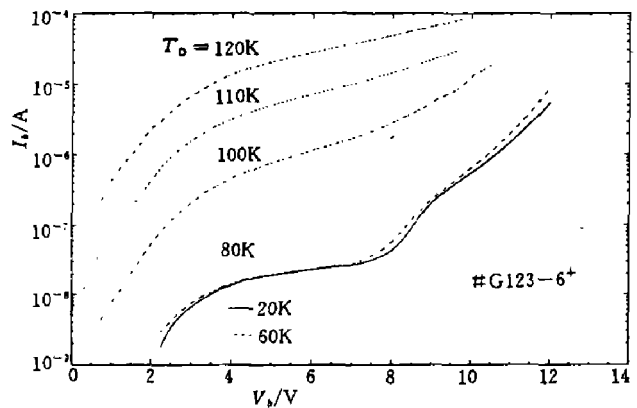


图 3 多量子阱红外探测器的伏安特性 $I_b(V_b, T_D)$
Fig. 3 The $I-V$ characteristics of MQW infrared detector

图 3 是在 64° 视场角下器件的伏安特性, 可以看出 $I_b(20K, V_b)$ 和 $I_b(60K, V_b)$ 很接近, 但与 $I_b(80K, V_b)$ 的差异稍大并随 V_b 增大而增大, 相同 V_b 下, I_b 在 $80\sim 120K$ 近似随温度指数增加 (相等 ΔT_D 的 $\Delta \log I_b$ 近似相等). $I_b(20K, V_b)$ 的变化为: $V_b < 3V$ 时为指数上升, $3\sim 8V$ 为缓升区, $8\sim 9V$ 上升较快, $9\sim 10.5V$ 为一不很明显的缓升区, $10.5\sim 12V$ 上升又加快. 随着 T_D 升高, $I_b(V_b)$ 在 $\sim 8V$ 的转折逐渐消失, 而在 $\sim 3V$ 的转折区变得更宽. 图 4 是从图 3 处理得到的微分电阻: 在 $20\sim 80K$ 和 $3\sim 7V$ 区域, $R_d \approx 100 M\Omega$ 量级; 在 $20K$ 和 $9V$ 处, $R_d \approx 5 M\Omega$ 并为拐点; 在 $3\sim 7V$ 区域, 器件从 $80K$ 升到 $120K$, R_d 从 $100 M\Omega$ 下降到 $0.1 M\Omega$. R_d 曲线不够光滑是数据处理造成的.

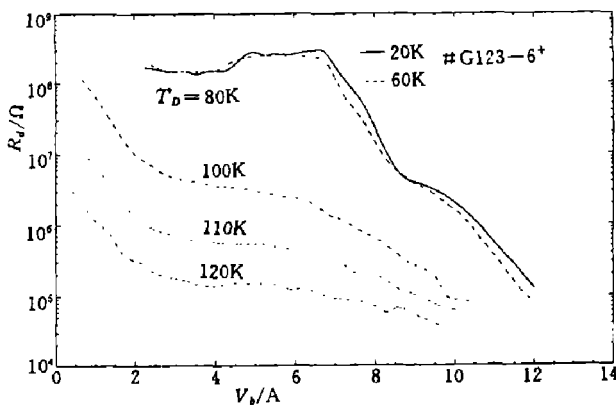


图 4 多量子阱红外探测器的微分电阻 $R_d(V_b, T_D)$
Fig. 4 The differential resistance of MQW infrared detector

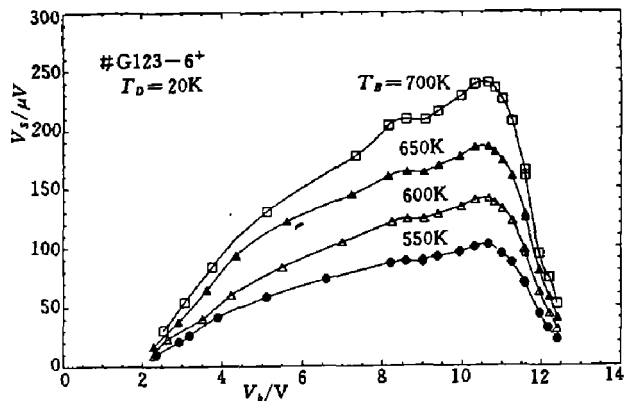


图 5 多量子阱红外探测器的光响应电压 $V_s(V_b, T_B)$
Fig. 5 The response voltage $V_s(V_b, T_B)$ of MQW infrared detector

2.2 器件响应电压 $V_s(T_B, V_b)$

图 5 是器件在不同黑体温度 T_B 下的信号电压 $V_s(V_b)$, 所用的测试条件是: 器件温度 $T_D = 20K$, 黑体辐射口 $\phi 10mm$, 到器件的距离 $L_B = 30cm$, 调制频率 $f = 1000Hz$,

锁相前放带宽 10%ENBW=100 Hz. $V_S(V_b)$ 的变化为: $V_b < 2.5\text{ V}$ 时变化较小, 在 V_b 2.5~10.5 V 范围逐步增大, $V_b > 10.5\text{ V}$ 时逐步减小; 在 8.5V 和 10.5 V 有两个类峰结构并随 T_B 增大而更为明显; 在 ~9.3V 为谷区; $V_S(T_B, V_b)$ 外推到零的 V_b 分别为 2 V 和 13 V. 图 6 是不同器件温度 T_D 时的 $V_S(V_b)$, $V_S(V_b)$ 的峰值随着 T_D 升高下降, 峰位和高偏压下降缘向低移动, 并且类峰结构逐渐消失, 在 V_b 较小和 20~110 K 温区 $V_S(T_B, V_b)$ 几乎不随 T_D 变化.

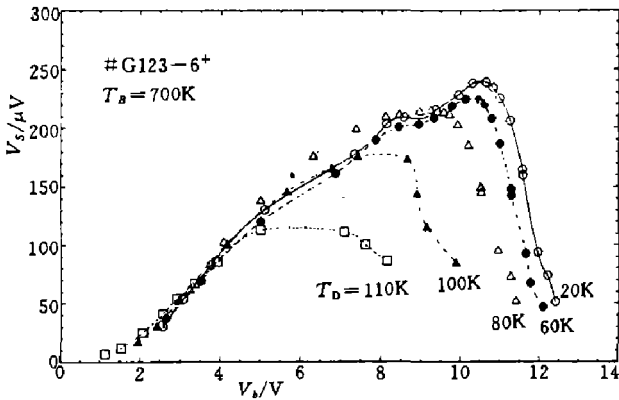


图 6 多量子阱红外探测器的光响应电压 $V_S(V_b, T_D)$

Fig. 6 The response voltage $V_S(V_b, T_D)$ of MQW infrared detector

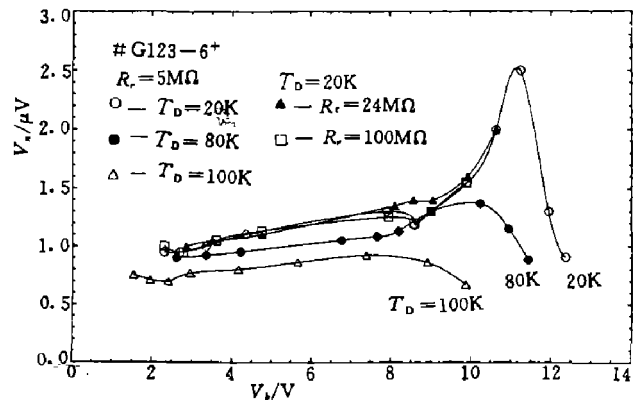


图 7 多量子阱红外探测器的噪声电压 $V_N(V_b, T_D)$

Fig. 7 The noise voltage of MQW infrared detector

2.3 器件噪声电压 $V_N(T_D, V_b)$

图 7 是直接测量器件的噪声电压 $V_N(T_D, V_b)$, 测量系统和外界干扰噪声 $< 0.5\ \mu\text{V}$. 可以看出 $T_D = 20\text{ K}$ 时, 电源的限流电阻 R_r 为 5、24 和 100 MΩ 的 $V_N(20\text{K}, V_b)$ 差异不大, 即 $R_r \geq 5\text{ M}\Omega$ 对 $V_N(T_D, V_b)$ 的测量影响可忽略. $R_r = 5\text{ M}\Omega$ 和 $T_D = 20\text{ K}$ 的 $V_N(V_b)$ 变化为: 在 2.5~8 V 范围缓慢增大, 在 ~8.5 V 有一谷区, 在 9~11.3 V 增大较快, 在 ~11.3 V 有一峰区, 在 11.3~12.3 V 迅速减小. $R_r = 5\text{ M}\Omega$ 和 $T_D = 80\text{ K}$ 的 $V_N(V_b)$ 变化为: 在 2.5~8 V 范围缓慢增大, 但其值略比 20 K 时小, 在 8~11.5 V 先增大而后减少, 其峰值比 20 K 时小得多, 并且峰位向低移动. $R_r = 5\text{ M}\Omega$ 和 $T_D = 100\text{ K}$ 的 $V_N(V_b)$ 在 $V_b = 1.5\sim 10\text{ V}$ 的变化较小.

2.4 器件电压响应率 $R_{VB}(T_D, V_b)$ 和探测率 $D_B^*(T_D, V_b)$

器件的黑体电压响应率 R_{VB} 和探测率 D_B^* 分别为^[1]

$$R_{VB} = \frac{\int R(\lambda) W(\lambda) d\lambda}{\int W(\lambda) d\lambda} = \frac{V_S}{\Phi_S}, \tag{1}$$

$$W(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h / \lambda^5}{e^{hc/\lambda k T_B} - 1}, \tag{2}$$

$$\Phi_S = \frac{\sigma A_B A_D (T_B^4 - T_0^4)}{2\sqrt{2\pi} L_B^2}, \tag{3}$$

$$D_B^* = \frac{\sqrt{A_D \Delta f} R_{VB}}{V_N} \quad (4)$$

其中 $W(\lambda)$ 为黑体辐射频谱, $\Phi_S = 9.8 \times 10^{-9} \text{ W}$ 为以 45° 角入射到器件的总能量 (没有扣除 KRS5 窗口 $\sim 25\%$ 透过损失和仅经磨抛的 GaAs 表面的反射损失). 图 8 中 $T_D = 20 \text{ K}$ 的曲线是用图 5 的 4 个不同 T_B 的 $V_S(T_B, V_b)$ 拟合计算得到的黑体电压响应率 R_{VB} , 其余曲线以同样方法得到. 在 20 K 和 5 V 时 $R_{VB} \approx 7 \times 10^3 \text{ V/W}$, 因 $R_{VB}(T_D, V_b)$ 曲线的线形与图 6 的 $V_S(700\text{K}, V_b)$ 基本相同, 在此不作详细描述.

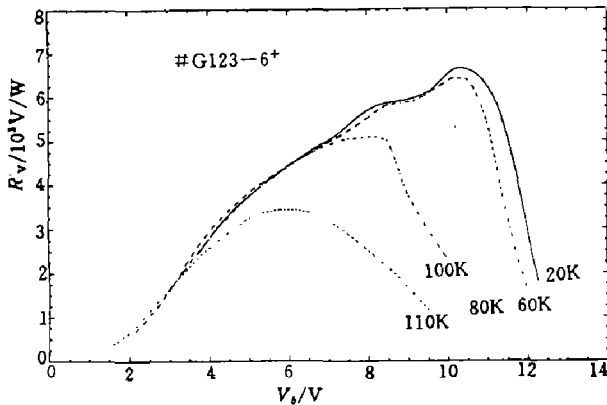


图 8 多量子阱红外探测器的电压响应率 $R_V(V_b, T_D)$

Fig. 8 The voltage responsibility of MQW infrared detector

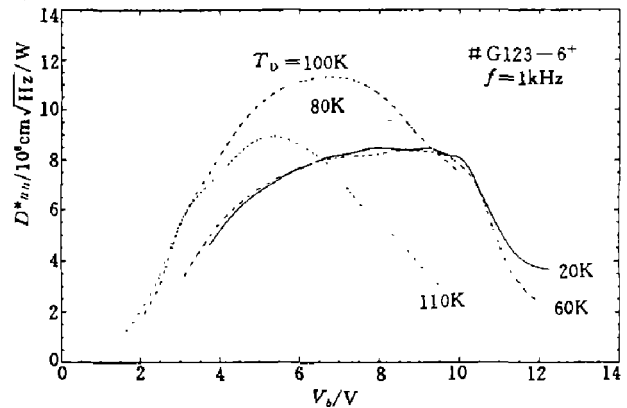


图 9 多量子阱红外探测器的黑体探测率 $D_B^*(V_b, T_D)$

Fig. 9 The blackbody detectivity of MQW infrared detector

图 9 是通过图 7 和 8 的不同 T_B 拟合算得的器件黑体探测率 $D_B^*(T_D, V_b)$. 从图 9 看出 20 K 时 D_B^* 的变化为: 在 $3 \sim 5 \text{ V}$ 较快增大, $5 \sim 10 \text{ V}$ 变化不大, $10 \sim 12 \text{ V}$ 较快减小, 与图 8 比较可知 D_B^* 随 V_b 变化比 R_{VB} 更平宽. 60 K 的 D_B^* 与 20 K 的相近; 80 K 的 D_B^* 在 $4 \sim 9 \text{ V}$ 比 60 K 时稍高, 并且整个曲线向低偏压移动; 100 K 的 D_B^* 又比 80 K 时稍大, 并且曲线再向低偏压移动, 7 V 时 $D_B^* = 1.1 \times 10^9 \text{ cm}^2/\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$; 110 K 的 D_B^* 比 100 K 时小, 但其峰值尚与 20 K 时相近, 只是峰位从 9 V 移到了 5 V .

2.5 器件光响应峰值波长 λ_P 和半峰宽 λ_w

探测器的光电压响应与 Lorentz 光响应线形 $\Gamma(\lambda)$ 的关系为^[1]

$$V_S(T_B) = \frac{\Phi_S R_{VP} \int \Gamma(\lambda) W(\lambda) d\lambda}{\int W(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

$$\Gamma(\lambda) = \frac{1}{1 + 4(\lambda_P - \lambda)^2 / \lambda_w^2}. \quad (6)$$

在 V_b 和 T_D 一定时, 只需测定 3 个或 3 个以上的 T_B 对应的 $V_S(T_B)$ 和 $V_N(T_B)$, 就可通过式 (3)~(6) 拟合计算得到光响应峰值波长 λ_P 、半高宽 λ_w 、峰值响应率 R_{VP} 和探测率 D_P^* . 图 10 是用图 5 的 4 个不同 T_B 的 $V_S(T_B, V_b)$ 拟合计算得到 20 K 时的 $\lambda_P(V_b)$ 和

$\lambda_w(V_b)$, 可以看出器件的 $\lambda_P(V_b) \approx 7.5 \mu\text{m}$, 并不随 V_b 增大而明显变化, 在 $4 \sim 8 \text{V}$ 区间 $\lambda_w(V_b) \approx 0.5 \sim 1 \mu\text{m}$, 并随 V_b 增大而有所增大. 在 6.5V 时, $\lambda_P \approx 7.1 \mu\text{m}$, $\lambda_w \approx 0.56 \mu\text{m}$, $R_{VP} = 6.6 \times 10^4 \text{V/W}$, $D_P^* = 1.11 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, $\alpha = D_P^*/D_B^* = 14$. 图 11 是拟合计算的 λ_P 和 λ_w 的平均值与 T_D 的关系, 可以看出 $\lambda_P \approx 7.5 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_w \approx 1.0 \mu\text{m}$, 并且不随 T_D 升高而明显变化. 图 10 和 11 中数据的离散性较大的原因为: 同一 V_b 的不同 T_D 的数据是不同时测量的, 黑体温度有 $\sim \pm 2^\circ\text{C}$ 的波动, 而拟合计算时只用 T_B 的平均值, T_B 的较小偏差造成 V_S 和 R_{VB} 的相对偏差不很大, 但其对拟合计算的 λ_P 和 λ_w 的影响较大.

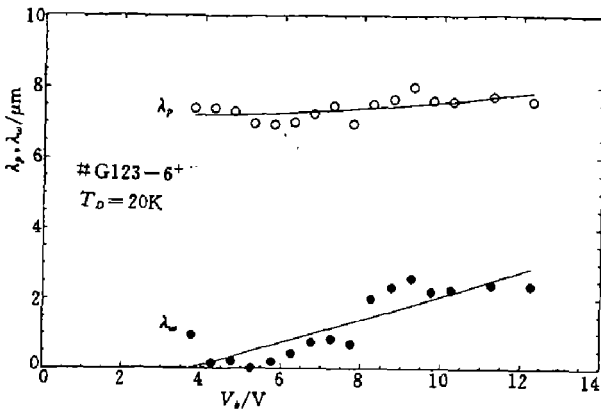


图 10 多量子阱红外探测器的光响应峰值波长 $\lambda_P(V_b)$ 和半峰宽 λ_w
Fig. 10 $\lambda_P(V_b)$ and λ_w of MQW infrared detector

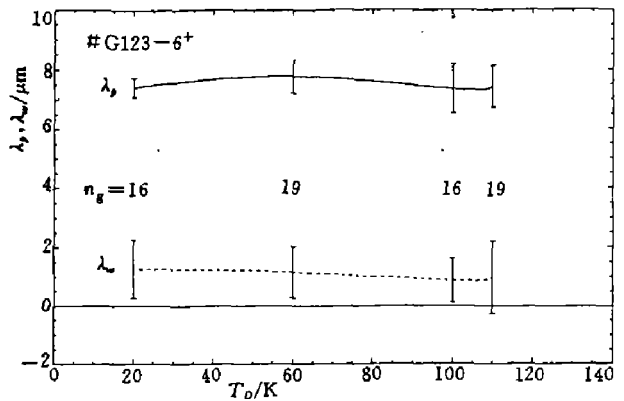


图 11 多量子阱红外探测器的光响应峰值波长 $\lambda_P(T_D)$ 和半峰宽 λ_w
Fig. 11 $\lambda_P(T_D)$ and λ_w of MQW infrared detector

3 讨论

从图 3 中 $20 \sim 120 \text{K}$ 的 $I_b(T_D, V_b)$ 可知: $T_D > 80 \text{K}$ 时 I_b 随 T_D 指数增大, 即热激发电流和热助隧道电流起主要作用. $T_D < 80 \text{K}$ 时隧道电流起主要作用, 因而 $I_b(T_D, V_b)$ 曲线有较宽的缓升平台区 (因 E_2 较高而不出现负阻振荡), 并且随 T_D 的变化较小. 随着 V_b 的增大, 对应于多量子阱的系列隧穿和相邻阱子带位置的错开, $I_b(20\text{K}, V_b)$ 在 $\sim 2.5 \text{V}$ 的转折区对应平均相邻阱错开 $\sim 50 \text{mV}$ (此值应接近于子带宽 ΔE_1), 即 $E_1 \rightarrow E_1$ 错开达到此值时开始出现 $E_1 \rightarrow E_2$ 的系列错开. $V_b \approx 8.5 \text{V}$ 的转折区对应平均相邻阱 ($E_1 \rightarrow E_2$) 错开 $\sim 170 \text{mV}$ (对应的 $\lambda \approx 7.3 \mu\text{m}$), 这与拟合计算的 $\lambda_P \approx 7.5 \mu\text{m}$ 很接近, $V_b \approx 10.5 \text{V}$ 的转折区对应于 $E_1 \rightarrow E_3$ 隧穿. 由此可知从伏安特性可估计多量子阱的子带结构和光电响应范围, 当器件的材料结构参量发生变化、制备器件过程中多量子阱结构被损伤或测试条件变化时都会影响到 $I_b(T_D, V_b)$, 所以, 对于同一材料结构制备的器件, 还可以从 $I_b(T_D, V_b)$ 的特征转折区对应的 V_b 和 I_b 值初步判定器件的结构完整性, 推测其光电特性, 及筛选器件.

图 5 中 $V_b < 2.5 \text{V}$ 时 $V_S(V_b)$ 很小, 这是因为多量子阱处在低场区, 光电子不能有效输运造成的. 在 $4 \sim 8 \text{V}$ 区间 V_S 线性增加并外推与零点相交, 与文献 [3] 的结果相似. 在

$\sim 8.5\text{ V}$ 和 10.5 V 下分别对应多量子阱 $E_1 \rightarrow E_2$ 和 $E_1 \rightarrow E_3$ 的共振隧穿, 可能光激发电子较易通过势垒区而形成了 $V_S(V_b)$ 的类峰结构. 在 $V_b > 11.5\text{ V}$ 时, 因光电流逐渐饱和但器件的 R_d 不断减小使 V_S 减小较快. 图 6 中, 在 20 K 和 8.5 V 附近因 $E_1 \rightarrow E_2$ 共振隧穿时的热激发电流的贡献相对较小, 所以 $V_N(V_b)$ 出现一谷区; 在 $8.5 \sim 11.5\text{ V}$, 热激发电流和 V_N 都较快增大; 在 $V_b > 11.5\text{ V}$, 因 R_d 的下降使 V_N 变小; 当 T_D 升高, R_d 变小, 也使 V_N 变小.

利用 Lorentz 光响应线形拟合 $V_S(T_B, V_b)$ 可较准确测定器件的峰值波长, 但光响应的半峰宽的计算值较离散, 这是因黑体温度的波动、数据采集和处理误差以及实际光响应与 Lorentz 线形的差异等造成的, 如采用自动测量和更接近实际的线形拟合计算可降低其离散性. 变温拟合计算光电流谱虽不如常用的分光或傅里叶变换光谱仪测量的那样直接可靠, 但可以简便地沿用通常的器件测试系统测定绝对光电响应, 在器件性能检测等场合还是可取的.

从图 8 和 9 可知探测器 D_B^* 极大优化和 T_D 上限工作点为 $T_D = 100\text{ K}$ 和 $V_b = 7.5\text{ V}$ (比常用的 80 K 工作温度高), 对应的 $R_{VB} = 5.1 \times 10^3\text{ V/W}$, $D_B^* = 1.1 \times 10^9\text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 拟合计算得 $\lambda_P \approx 7\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda_w \approx 0.58\text{ }\mu\text{m}$, $R_{VP} = 6.5 \times 10^4\text{ V/W}$, $D_P^* = 1.4 \times 10^{10}\text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, $\alpha = D_P^*/D_B^* = 13$, $R_d = 1 \times 10^6\text{ }\Omega$. 器件的光谱响应较窄, 利于选择响应, 但对于热成像等应用场合, 要求有较宽的光谱响应以利于提高器件的 D_B^* 和减小 $NE\Delta T$. 如取器件的光学增益 $g = 0.5^{[1]}$, 则器件的量子效率 $\eta = (hc/e\lambda)(R_{VP}/R_d)/g \approx 2.4\%$ (如扣除窗口透过损失和 GaAs 表面反射损失也只有 $\sim 5\%$), 这可能是量子阱的吸收太低或实际的 g 值较小造成的, 如采用光栅耦合并优化材料结构参量, 还可望提高器件的量子效率和性能.

4 结论

通过测量多量子阱红外探测器的 $I_b(T_D, V_b)$ 、 $V_S(T_D, T_B, V_b)$ 和 $V_N(T_D, V_b)$ 等, 可简要分析器件的能带结构和光电输运过程, 得到器件的光响应率和探测率的变化特性, 并可用 Lorentz 线形拟合得到光电流谱的峰值波长和半峰宽, 进而综合分析器件的多种参量和变化特性, 还可为评价器件的性能和参量优化提供依据.

致谢: 在器件制备和特性测量中得到中国科学院上海技术物理研究所分子束外延小组全体同志, 以及何炬华、丘惠国等同志和诸君浩等同志的支持和协作, 作者在此表示衷心感谢.

参考文献

- 1 Zussman A et al. *J. Appl. Phys.*, 1991;70(9):5101~5107
- 2 Bethea C G et al. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1991;38(5):1118~1123
- 3 Kozlowski Lester J et al. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1991;38(5):1124~1130
- 4 Levine B F et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1988;53(3):231~233
- 5 Levine B F et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990;56(9):851~853
- 6 Levine B F et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1988;52(18):1481~1483
- 7 Chen Zhenghao et al. *Chin. Phys. Lett.*, 1990;7(7)
- 8 方晓明等. 红外与毫米波学报, 1992;11(1):43~46

STUDY OF CHARACTERISTICS OF GaAs/AlGaAs MULTIPLE QUANTUM WELL INFRARED DETECTOR

HUANG XINGLIANG, FANG XIAOMING, LU WEI, SHEN XUECHU

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

LI YANJIN, YUAN SHIXIN

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences,
Shanghai 200083, China)*

ZHOU XIAOCHUAN

*(National Laboratory for Surface Science, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100080, China)*

Abstract: The current-voltage characteristics $I_b(T_D, V_b)$, blackbody response voltage $V_S(T_D, T_B, V_b)$ and noise voltage $V_N(T_D, V_b)$ of GaAs/AlGaAs multiple quantum wells infrared detector were measured and the blackbody voltage responsivity $R_{VB}(T_D, V_b)$ and detectivity $D_B^*(T_D, V_b)$ of the detector were obtained. The spectral response peak wavelength λ_P and the full width at half maximum λ_w of the detector were calculated by fitting the response voltage $V_S(T_D, T_B, V_b)$ with Lorentz response line shape.

Key words: multiple quantum wells, infrared detector, detector characteristics, line-shape fitting.