

不同烘烤温度下 HgCdTe 光伏探测器的 R-V 特性研究

刘大福 乔 辉 孔令才 贾 嘉

(中国科学院上海技术物理所传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

摘要 温度烘烤是 pn 结型器件加速实验的常用方法之一。针对室温工作的短波碲镉汞(HgCdTe)红外探测器开展了真空烘烤实验研究。实验样品分为四组,对应的烘烤温度分别为 60 °C, 70 °C, 80 °C 和 90 °C。在实验前后测试了器件的 R-V 特性曲线,并进行了 R-V 特性的理论拟合分析。分析结果表明真空烘烤对器件的影响主要表现在三个方面:串联电阻的增大、隧道电流效应的减弱及产生复合效应的增强。串联电阻的增大主要是由于电极接触电阻在长时间温度烘烤下增加引起的。温度烘烤可以消除能带内的缺陷能级,从而削弱间接隧道电流对 I-V 特性的影响。分析推测较高温度的烘烤会损伤器件表面钝化膜的质量,从而使得器件的产生复合寿命降低。

关键词 光学器件; HgCdTe; 光伏探测器; 烘烤温度; R-V

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0336

The Study on R-V Characteristics of HgCdTe Photovoltaic Detectors under Different Baked Temperature

Liu Dafu Qiao Hui Kong Lingcai Jia Jia

(National Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Temperature baking is one of the common methods of accelerating test. Vacuum baking experiment of HgCdTe short-wave infrared (SWIR) detectors at the room temperature was studied. The samples were divided into four groups, baking temperatures were 60 °C, 70 °C, 80 °C and 90 °C, respectively. The R-V characteristics of the detectors at different baking temperature were analyzed. Results show that baking experiment causes the increase of series resistance, the decrease of tunneling current, and the increase of generation-recombination current mechanism according to the effect of temperatures on R-V curves. The increase of detectors contact resistance is caused by long time baking. On the other hand, the appropriate baking temperature can reduce the inner defect energy of the devices and reduce the effect of indirect tunneling current. Results also show that high temperature baking may damage the passivation layer and reduce the generation-recombination carrier lifetime.

Key words optical devices; HgCdTe; photovoltaic detector; baked temperature; R-V

1 引 言

温度加速是 pn 结型器件中应用最广泛的一种可靠性试验方法^[1~3],该方法的基本理论是化学动力学模型,即 Arrhenius 模型。HgCdTe 光伏型探测器,特别是室温工作的短波探测器,与普通的 pn 结器件具有很多相似之处,因此参考 pn 结器件的可靠性试验进行了温度加速烘烤。表征光伏器件性能的关键指标之一是暗电流。影响 HgCdTe 光伏

探测器的暗电流机制^[4,5]主要是扩散电流、产生复合电流、直接隧道电流和间接隧道电流。

研究了不同温度烘烤后芯片的 R-V 特性,并分析了温度加速引起的电流机制的变化,得到温度对芯片暗电流机制的影响因素。

2 实 验

实验样品采用室温短波碲镉汞探测器芯片,光

基金项目: 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(C2-4)资助课题。

作者简介: 刘大福(1979-),男,助理研究员,主要从事光电器件封装与可靠性方面的研究。

E-mail: liudafu@mail. sitp. ac. cn

敏元面积为 $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$, 截止波长 $1.8\ \mu\text{m}$, 光谱图如图 1 所示。

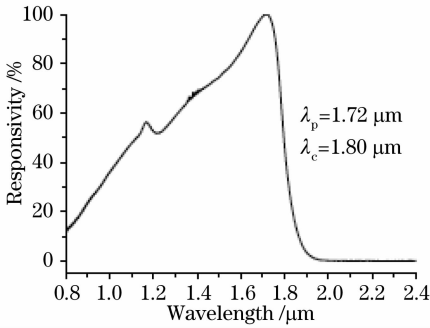


图 1 实验芯片光谱图

Fig. 1 The detector response spectrum

实验样品分为四组, 每一组对应一个烘烤温度, 温度点分别为 $60\ ^\circ\text{C}$, $70\ ^\circ\text{C}$, $80\ ^\circ\text{C}$ 和 $90\ ^\circ\text{C}$ 。实验样品分组情况如表 1 所示。

表 1 烘烤温度与样品数量

Table 1 Bake temperature versns detectors numbers

Group No.	1#	2#	3#	4#
Temperature / $^\circ\text{C}$	60	70	80	90
Quantity of samples	20	18	18	18

实验时将四组芯片分别安装在四个杜瓦内, 试验过程中杜瓦内保持真空, 按照表 1 的温度条件进行真空烘烤。

3 R-V 理论模型

直接隧道电流与器件的能带结构有直接的关系, 能带宽度越宽, 载流子越难获得足够高的能量跨越能带形成直接隧道电流。实验用的短波 HgCdTe 红外探测器的禁带宽度约为 $0.689\ \text{eV}$, 相对较宽, 直接隧道电流对 $I-V$ 的影响基本可以忽略, 因此在进行理论模型建立时只考虑 3 种机制, 即扩散电流、产生复合电流和间接隧道电流。为了消除背景光的影响, 方便进行理论拟合, 将 $I-V$ 特性表述转换为 $R-V$ 特性表述来进行拟合。下面直接给出这些电流机制^[4-7]相联系的电阻表达式。

扩散电流 (Diffusion current) 相联系的电阻可以表示为

$$R_{\text{diff}} = \left[A \frac{qn_i^2}{Na} \left(\frac{q\mu_e}{kT\tau_e} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right) \right]^{-1}. \quad (1)$$

产生复合电流 (Generation-recombination current) 相联系的电阻可表示为

$$R_{\text{gr}} = \frac{\tau \sqrt{V_{\text{bi}}}}{2An_i W_0 kT} \left[\frac{\cosh\left(\frac{qV}{kT}\right) \frac{q}{2kT} f(b) + \sinh\left(\frac{qV}{2kT}\right) \frac{df(b)}{dV} + \frac{\sinh\left(\frac{qV}{2kT}\right) f(b)}{2(V_{\text{bi}} - V)^{3/2}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$f(b) = \int_0^\infty \frac{du}{u^2 + 2bu + 1}, \quad (3)$$

$$b \approx \exp(-qV/2kT), \quad (4)$$

陷阱辅助的隧道电流 (Trap-assisted tunneling current) 相联系的电阻可表示为

$$R_{\text{tat}} = \left[\frac{A\pi^2 q^2 N_t m^* M^2}{h^3 E_g - E_t^{1/2}} \exp\left(-\frac{I_0}{\sqrt{V_{\text{bi}} - V}}\right) \left(1 - \frac{I_0}{\sqrt{V_{\text{bi}} - V}}\right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

$$I_0 = -\frac{\sqrt{3}E_g^2 f(\vartheta)}{8\sqrt{2}qP} \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (N_a + N_d)}{qN_a N_d}}, \quad (6)$$

$$f(\vartheta) = \frac{\pi}{2} + \arcsin(1 - 2\vartheta) + 2(1 - 2\vartheta) \sqrt{\vartheta(1 - \vartheta)}, \quad (7)$$

$$\vartheta = E_t/E_g. \quad (8)$$

另外电极接触会在器件上附加一个串联电阻, 用 R_{th} 来表示器件的串联电阻。 R_{th} 主要在大偏流作用下影响明显, 因此取 $R-V$ 大偏流区域段进行拟合^[8], 该参数与其它参数的拟合是相互独立的。

根据上述的几种电流机制器件总电阻 R 的表达式为

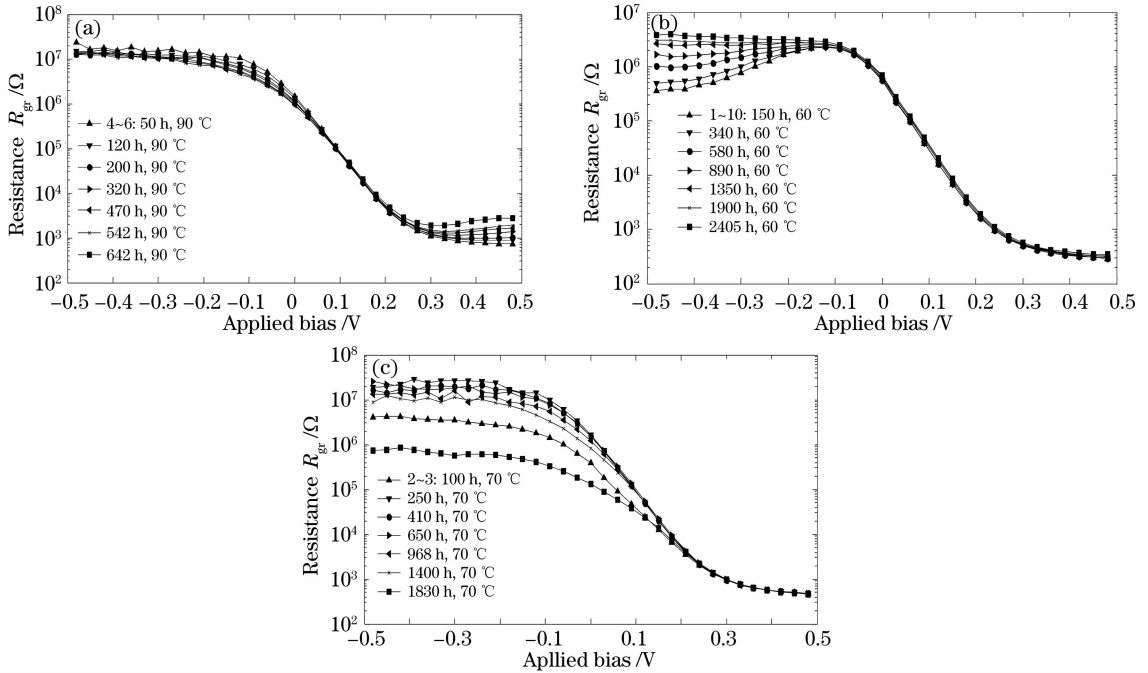
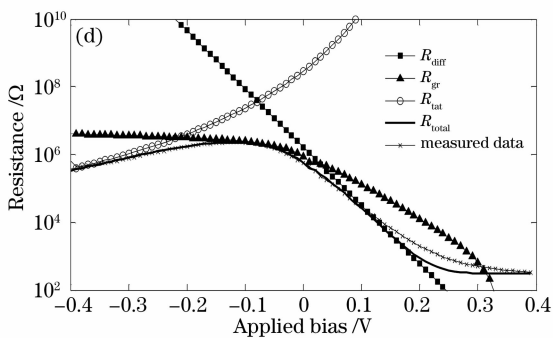
$$R = (1/R_{\text{diff}} + 1/R_{\text{gr}} + 1/R_{\text{tat}})^{-1} + R_{\text{th}}. \quad (9)$$

4 实验结果与分析

四组样品进行的实验时间及 $R-V$ 特性曲线变化情况如表 2 所示。实验结果显示, 温度对器件的影响主要集中在串联电阻 R_{th} 的增大和反偏电流下产生复合电流效应增强上。另外温度烘烤可以减弱隧道电流效应。这三种类型的典型 $R-V$ 特性曲线如图 2。图 3 是一只器件的拟合结果图。

表 2 不同温度下的实验时间及器件 R - V 曲线变化情况Table 2 Summary of experiment time under different temperature and R - V character

Quantity of R - V character	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)/Time (h)				合计
	60/2405	70/1830	80/1038	90/642	
changed detectors					
R_{th} increasing	2	2	1	10	15
R_{tat} increasing	1	1	1	2	5
R_{gr} decreasing	0	6	9	12	27

图 2 (a) 串联电阻 R_{th} 增大; (b) 间接隧道电流对应的 R_{tat} 增大; (c) 产生复合电流对应的 R_{gr} 减小Fig. 2 (a) Series resistance R_{th} increases; (b) trap assisted tunneling current associated R_{tat} increase; (c) Generation-Recombination current associated R_{gr} decrease图 3 R - V 拟合结果图Fig. 3 R - V fitted result

R - V 特性显示进行实验的 74 只器件中只有 5 只在反偏下呈现受隧道电流影响的现象, 可以推测主要是间接隧道电流在起作用。随着烘烤实验的进行, 间接隧道电流的影响逐渐减弱, 最后已经基本可以忽略。间接隧道电流的形成主要是因为能在带中存在缺陷能级^[7], 由此可知温度烘烤可以使缺陷能级减少, 从而对反偏电流的贡献减少。到实验结束,

5 只实验前明显受隧道电流影响器件的 R - V 特性曲线都发生了变化, 反偏部分的曲线基本变平, 如图 2 (b) 所示, 即隧道电流效应明显减弱。从表 3 的拟合数据可以看出, 间接隧道电流减弱的内在机理是 E_t/E_g 的减小, 即缺陷能级 E_t 变小。

表 3 1~10 # 器件拟合数据(烘烤后 R_{tat} 增大)Table 3 Fitted results for 1~10 # devices whose R_{tat} increase after bake

Bake time /h	τ_0 /s	E_t/E_g	$(\mu_e/\tau_e) / (\text{cm}^2/\text{V}^2)$	R_{th}/Ω
150	1.12×10^{-6}	0.91	7.67×10^5	305
890	1.00×10^{-6}	0.90	6.07×10^5	311
1900	1.00×10^{-6}	0.89	5.42×10^5	334
2405	1.00×10^{-6}	0.88	4.66×10^5	343

通过理论拟合发现大部分器件的串连电阻有随烘烤温度的延长而增大的趋势, 表 2 中只是将变化明显(增大幅度超过 10%) 的器件数列出。增大的幅度与烘烤温度有很大关系, 90 $^{\circ}\text{C}$ 下超过半数器件的串连电阻都明显的增大。器件的串连电阻主要来

自电极接触电阻, 温度烘烤会影响器件的电极接触, 使得电极接触变差, 引起接触电阻的增加。当烘烤温度达到 90 °C 时这种效应开始变得十分明显。

表 4 2~3# 器件拟合数据(烘烤后 R_{gr} 减小)

Table 4 Fitted results for 2~3# devices whose R_{gr} decrease after bake

Bake time / h	τ_0/s	E_i/E_g	$(\mu_e/\tau_e) / (cm^2/V^2)$	R_{gr}/Ω
650	7.41×10^{-6}	-	7.83×10^4	530
968	6.68×10^{-6}	-	6.43×10^4	528
1400	4.68×10^{-6}	-	8.21×10^4	510
1830	3.94×10^{-6}	-	8.04×10^4	502

烘烤后很大一部分器件的产生复合电流效应明显增强, 即在 R-V 特性曲线中表现为反偏部分的动态电阻降低, 如图 2(c) 所示。理论拟合显示器件的有效载流子寿命 τ_0 随烘烤时间的延长而减小。 τ_0 是器件的体材料寿命和表面产生复合寿命共同作用的结果, 引起寿命变化的根本因素是器件缺陷数量的变化。器件的表面是一层阳极氧化形成的钝化膜, 相比器件体内而言, 这层钝化膜更容易受到外部环境的影响, 引起表面钝化质量的下降。因此可以推测引起有效载流子寿命降低的主要因素是表面钝化膜的损伤, 从而增加了缺陷数量, 引起表面产生复合速率增大, 降低了表面产生复合寿命。实验统计数据表明在 60 °C 下器件的表面稳定性较好, 经过 2405 的烘烤后, 没有器件的产生复合效应明显变化。随着烘烤温度的增加, 受影响的器件比例明显增加, 即使是在相对短的烘烤时间内。70 °C 下, 在 1830 h 内有近 1/3 的器件有明显变化, 80 °C 下, 在 1038 h 内这种变化增加到了 1/2, 而在 90 °C 的一组实验内, 在 642 h 的时间内该比例上升到了 2/3。

5 结 论

对四组短波 HgCdTe 光伏器件分别进行了 60 °C, 70 °C, 80 °C 和 90 °C 的长时间温度烘烤, 并对实验

后器件 R-V 特性进行了理论拟合分析。结果表明温度对器件主要影响表现在三个方面: 串连电阻的增大、隧道电流效应的减弱及产生复合效应的增强。串连电阻的增大主要是由于电极接触电阻在长时间温度烘烤下增加引起的。温度烘烤可以消除能带内的缺陷能级, 从而削弱间接隧道电流对 I-V 特性的影响。分析推测较高温度的烘烤会降低器件表面钝化膜的质量, 从而使得器件的产生复合寿命降低, 随着温度的升高这种影响越是显著, 在 90 °C 下经过 642 h, 受影响的器件数量比例高达 2/3。

参 考 文 献

- Jiang Renyuan, Zhang Xingtang, Yang Yichun. Study on accelerated life test of function degenerating type by temperature stress[J]. *J. Nanjing University of Science and Technology*, 2000, **24**(6): 523~527
姜仁元, 张兴唐, 杨亦春. 温度应力下功能退化型加速寿命试验问题研究[J]. *南京理工大学学报*, 2000, **24**(6): 523~527
- Zhang Pingping. Study and application of accelerated life test for aviation products[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1995, **21**(4): 124~129
张苹苹. 航空产品加速寿命试验及应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 1995, **21**(4): 124~129
- Winbond Electronics Corp. Quality and Reliability Report (Quarterly)[M]. January, 2004
- Vishnu Gopal, Sudha Gupta, R. K. Bhan *et al.*. Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride n + - p junctions[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, **44**: 143~152
- Quan Zhijue, Li Zhifeng, Hu Weida *et al.*. Parameters extraction from the dark current characteristics of long-wavelength HgCdTe photodiode[J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 2007, **26**(2): 92~96
全知觉, 李志锋, 胡伟达 等. 光伏型碲镉汞长波探测器暗电流特性的参数提取研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(2): 92~96
- J. D. Beck, M. A. Kinch, E. J. Esposito *et al.*. The MIS physics of the native oxide Hg_{1-x}Cd_xTe interface[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1982, **21**(1): 172~177
- David Rosenfeld, Gad Bahir. A model for the trap-assisted tunneling mechanism in diffused n-p and implanted n + - p HgCdTe photodiodes [J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1992, **39**(7): 1638~1645
- Robert F. Pierret. Semiconductor Device Fundamentals [M]. New York: Addison-Wesley, 1996