

MS 界面输运特性对碲镉汞光伏器件 $I-V$ 特性的影响*

胡晓宁 李言谨 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所, 传感技术国家重点实验室, 上海, 2000083)

摘要 根据金属-碲镉汞接触的基本电流-电压关系, 深入讨论了金属-半导体(MS)接触界面输运特性对碲镉汞光伏器件 $I-V$ 特性的影响, 并对实际器件的测量数据进行了分析比较。

关键词 $I-V$ 特性, 金属-碲镉汞接触, 碲镉汞光伏器件。

INFLUENCE OF MS INTERFACE TRANSPORT ON THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF MCT PV DEVICE*

HU Xiao-Ning LI Yan-Jin FANG Jia-Xiong

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

Abstract The influence of MS transport on the current-voltage characteristic of MCT PV device was investigated based on the current-voltage characteristics of MCT Schottkey barrier. The data of some devices were also discussed.

Key words current-voltage characteristic, M-MCT contact, MCT PV device.

引言

红外技术的发展对红外焦平面器件提出很大需求, 碲镉汞红外焦平面器件的研制成为目前红外器件研究的一个重要方向^[1]。

红外焦平面器件是以光伏型 p-n 结为探测单元, 入射到探测元上的光激发出光生载流子, 光生载流子通过扩散、漂移, 被 p-n 结分离, 从而产生光电压, 信号通过电极引线输出到读出电路, $R_s A$ 是表征其性能的一个优值因子^[2], 因此要求提供足够的 $R_s A$, 而对信号输出来说, 则要求电极接触为一理想的欧姆接触。这有两层含义, 一是要求电极接触不改变器件本身的电流-电压特性, 即为电阻型接触; 二是要求接触电阻尽量小, 本文从金属-半导体接触的基本电流-电压关系出发, 仔细讨论电极接触对光伏

器件 $I-V$ 特性的影响。

1 理论计算

考虑 n-on-p 器件, 由于在 n-HgCdTe 上易形成小接触电阻的欧姆接触, 而在 p-HgCdTe 上不易形成^[3], 所以只考虑 p 区电极端为肖特基结, 器件的结构剖面如图 1, 对应的电路原理图如图 2。其中, I_s 为背景或信号产生的光电流, D_s 为器件所要求的 p-n 结二极管, D_1 为金属-HgCdTe 接触形成的肖特基结, R_p 为二极管的并联电阻, R_n 为基区体电阻, 所有的电流、电压按图中所标的方向为正, 根据简单的电路分析, 可写出

$$\begin{aligned} IR_n + V_d &= V + V_s \\ I + I_s - V_d/R_p &= I_s \\ I &= -I_s \end{aligned} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(编号 19805014)和苏州大学江苏省薄膜材料重点实验室开放课题部分资助项目
稿件收到日期 2000-11-07, 修改稿收到日期 2000-12-28

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 19805014) and Jiangsu Laboratory of Film Material of Soochow University

Received 2000-11-07, revised 2000-12-28

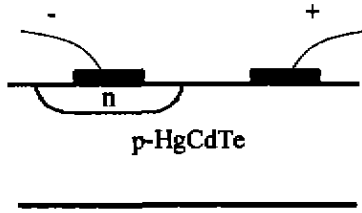


图1 器件的结构剖面图
Fig. 1 Cross section of n-on-p device

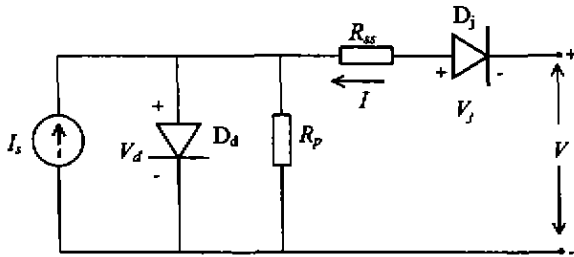


图2 器件的电路原理图
Fig. 2 Equivalent circuit of device

其中, I_s, V_d 分别为 p-n 线上的电流和电压, I_j, V_j 为肖特基结上的电流和电压.

二极管电流电压关系通常表达为^[7]

$$I_d = I_{s0} [\exp(qV_d/nkT) - 1]. \quad (2)$$

其中 n 为理想因子, I_{s0} 为反向饱和电流, k 为波耳兹曼常数, T 为器件温度.

根据对金属-HgCdTe 接触的电流机制的研究^[2]以及对 p 型 HgCdTe 的 E_{co} 值的估算, 77K 下 $E_{co} \approx kT$, 所以热场发射电流 (TFE) 占主导. 因此电流电压关系可写为^[4]

$$I_j = A^* AT^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{n, kT}\right) \exp\left(\frac{qV_j}{n, kT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-qV_j}{kT}\right)\right], \quad (3)$$

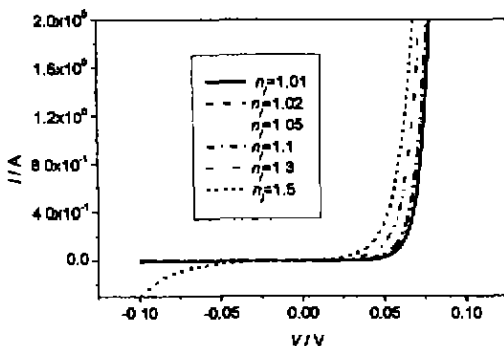


图3 不同 n , 肖特基结 $I-V_j$ 曲线
Fig. 3 $I-V_j$ of Schottky contact with different n ,

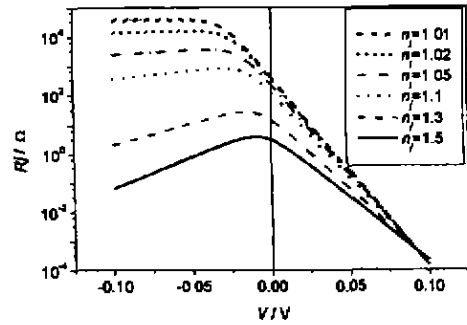


图4 不同 n , 的动态电阻 R , 随偏压的变化
Fig. 4 Dynamic impedance R , vs bias voltage

其中 ϕ_b 为势垒高度, n , 为肖特基结的理想因子, A 为电极接触面积, A^* 是有效 Richardson 常数.

将式(2)、(3)代入方程组(1), 用牛顿迭代法解此方程组, 计算结果分别示于图3~6. 计算过程中, 假设二极管是扩散电流机制 ($n=1$) 和热产生复合电流机制 ($n=2$) 共同起作用, n 在 1~2 之间, 取 $n=1.5$. 有效 Richardson 常数 $A^* = 4\pi n^* qk^2/h^3 = 1.2 \times 10^6 m^* (\text{Am}^{-2}\text{K}^{-2})$, m^* 取 10.4×10^{-36} . 另外, 肖特基结的势垒高度取 $\phi_b = 0.1 \text{eV}^{[2]}$.

2 计算结果及讨论

图3是不同 n , 肖特基结的 I_j-V_j 曲线, 图4是对应 n , 的动态电阻 R , 随偏压的变化. 可以看出, n , 对 I_j-V_j , 特别是反向部分影响非常大, n , 越大, 肖特基结越偏离整流特性. 从式(3)中可以看出, 由于 $\exp(qV/n, kT)(1 - \exp(-qV/kT))$ 项的存在, 所以肖特基结反向电流不饱和, 随着 n , 的增大, 在很小的反偏压下就出现了大电流, 动态阻抗 R , 也随 n , 增大而大大降低.

图5就是我们所关心的有肖特基结情况下器件表现的 $I-V$, 其反向行为很容易理解. 当 V 加反压时, D_j 正向导通, D_d 反向偏置, $I < 0$, D_d 的阻抗远远

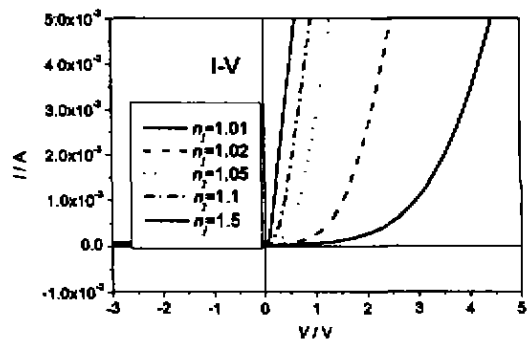


图5 有肖特基结情况下器件表现的 $I-V$ 曲线
Fig. 5 $I-V$ of device with Schottky contact

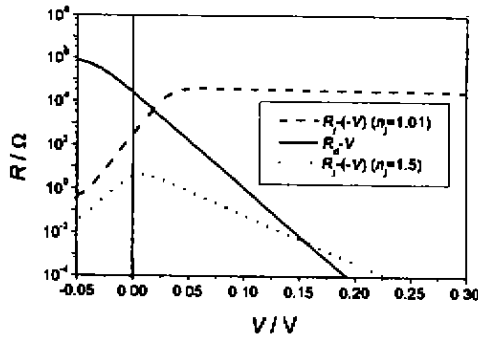


图6 R_i 随正向电压和 R_j 随负向电压变化关系
Fig. 6 R_i vs bias and R_j vs bias

大于 D_i 的阻抗,所以 V 基本上降在 D_a 上,即电流 I 主要由 D_a 决定.除非 D_a 反向击穿,否则不会出现 D_i 正向大导通.

再来看正向,先考虑 n_i 比较小,即肖特基结整流性很强的情况,当 V 加正压时, D_i 反向偏置, D_a 正向导通.为分析两个结分别起的作用,我们将 p-n 结阻抗 R_j 随正向电压变化的曲线与肖特基结阻抗 R_i 随负压变化关系曲线画在同一图上,见图 6.可以看出,在小正偏压时, $R_i \geq R_j$, V 大部分降在 D_a 上,随着 V 的逐渐增大, R_j/R_i 逐渐减小, D_i 上的分压比例逐渐增大,因此电流增长缓慢;当 V 继续增大, $R_i > R_j$,且 R_i/R_j 随偏压增长迅速,即 D_i 上得到的分压增长远快于 D_a 上得到的分压增长.此时的电流就基本上由 D_i 的反偏电流限制,电流在 μA 级.所以图 5 中, V 较小时,电流增长极缓慢.但由于肖特基结的 $I-V$ 反向不饱和,所以当外压继续增大到一定值 V_{max} 时, I 迅速增大. n_j 较大情况下的 $I-V$ 结合图 6 也很容易理解.显而易见, n_j 越大, V_{max} 越低.所以,当肖特基结使 n_j 偏离 1 的电流成份(包括隧道电流,复合电流)越大,即 n_j 越大时,器件表现的正向电流-电压关系中,二极管正向电流主要作用的电压范围就越大,电流迅速增长的电压阈值就越小.

从上面的分析看来,电极接触对器件 $I-V$ 特性影响大小主要取决于肖特基结的结阻抗,从这里可

进一步看到定义比接触电阻 $\rho_c \equiv \left| \frac{\partial J}{\partial V} \right|_{V=0}^{-1} = R_{c,A}$ 作为判断欧姆接触好坏的判据的意义.实际制作的器件电极就是通过工艺手段,形成理想因子 n_i 大, ρ_c 即 $R_{c,A}$ 小的金属-HgCdTe 接触.

3 实际碲镉汞光伏器件 $I-V$ 曲线的分析

图 7 是 256×1 线列焦平面器件 L168 的 $I-V$ 曲线.该器件半导体材料为液相外延 $Hg_{1-x}Cd_xTe$,电极材料为 Sn/Au, p-n 结面积均为 $50 \times 50 \mu m^2$.

这组曲线只是器件表现的 $I-V$ 特性,它包含了电极界面和基区体电阻的 $I-V$ 关系.为了得到 p-n 结本身的 $I-V$ 特性,必须把电极界面和基区体电阻的因素扣除.

通过前面的计算分析可知,在器件的正向偏压大到一定值 V_a 时,器件表现的电流-电压特性基本上由肖特基结的 $I-V$ 特性决定,外加电压基本上加在 D_i 上.用热场发射电流机制对图 7 中偏压大于 0.2 V 以上的 $I-V$ 数据进行最小二乘法的拟合,就可以得到基区体电阻 R_b 以及 I_{sc} , n_j 和接触势垒高度 ϕ_b 等 MS 界面参数,如表 1.

电极界面参数得到后,界面的输运特性就清楚了,通过前面的计算关系,我们得到真正对信号有贡献的 p-n 结的直流电学特性和相应的动态阻抗,如图 8 和 9.

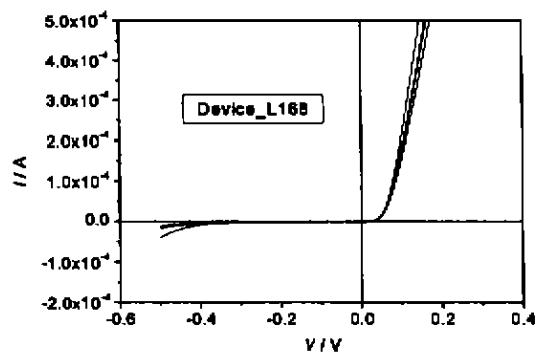


图7 器件 L168 的 $I-V$ 曲线
Fig. 7 $I-V$ characteristic of L168

表 1 器件 L168 的电极界面参数
Table 1 MS interface parameters of HgCdTe PV device L168

元件编号	组分 x	$P(\text{cm}^{-1})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$	规格	$R_{c,i}(\Omega)$	n_i	$I_{sc}(A)$	$\phi_b(\text{eV})$
L168-1					69.6	1.101	1.01×10^{-4}	0.1135
L168-2	0.231	2.51×10^{15}	551	256×1	76.1	1.103	0.89×10^{-4}	0.1146
L168-3					72.9	1.109	0.97×10^{-4}	0.1146

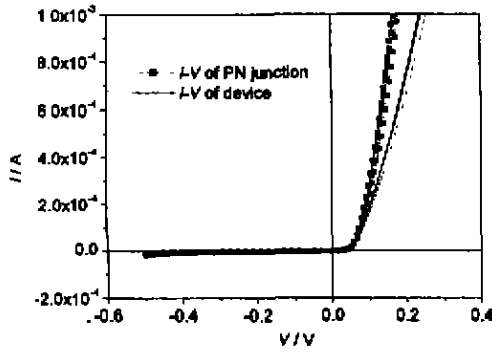


图8 器件L168及p-n结的I-V曲线
Fig. 8 I-V characteristic of L168 device and of the p-n junction

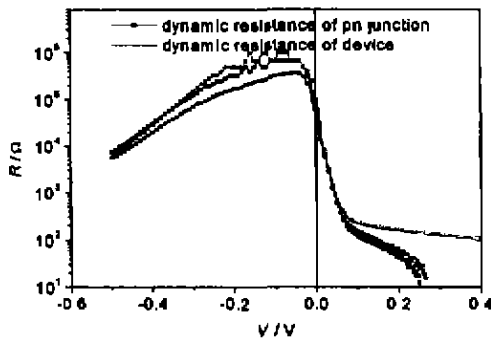


图9 器件L168及p-n结的R-V曲线
Fig. 9 Dynamic resistance of L168 device and of the p-n junction

可以看出,零偏电阻 R_0 值相差不大,所以一般只计算器件表现的 R'_0 并当作 p-n 结的 R_0 。更细致的计算表明 $R'_0 \approx R_c + R_n + R_r$, 且 $R_0 + R_0$ 项会造成部分光电流的损失,光电流的相对损失就等于表现 R'_0 的相对增加。如果定义光电流损失率 $\delta = \frac{I_s - I_c}{I_s}$, 则 $\delta = \frac{R_c + R_n}{R'_0}$ 。其中 R_c 为电极接触阻抗。当 $R_c + R_n$ 比 p-n 结阻抗低得多时,电极的影响可以忽略。这与

前面的计算结果一致。

4 结语

本文在考虑了肖特基接触的电流-电压细节的情况下,计算、分析了光伏器件的电流电压特性。结果表明,电极接触的肖特基结阻抗对器件的正向 I-V 特性产生影响。与器件本身阻抗相比,肖特基结阻抗越小,影响到器件 I-V 特性的电压范围就越小。所以在实际器件制作时,要做到电极接触的结阻抗比器件本身阻抗小得多,电极对器件性能的影响就很小,而此时电极是否是线性电阻型接触对直流电学特性的影响可予忽略。文中还对实际器件的测量数据进行了分析比较。

REFERENCES

- [1] Tidrow M Z, Beck W A, Clark W W, et al. Device physics and focal plane array applications of QWIP and MCT. *Proc. of SPIE*, 1999, **3629**: 100
- [2] TANG Ding-Yuan, MI Zheng-Yu, eds. *Fundamentals of Optoelectronic Devices*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technologic Literature Publishing House (汤定元, 糜正瑜编著. 光电器件概论. 上海: 上海科学技术文献出版社), 1989. 323
- [3] Spicer W E. Metal contacts of $Hg_{1-x}Cd_xTe$. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1990, **A8**(2): 1174
- [4] Rideout V L. A review of the theory and technology for ohmic contacts to group II-V compound semiconductors. *Solid-State-Electron*, 1975, **18**: 541
- [5] John Brice, Peter Capper, eds. *Properties of Mercury Cadmium Telluride*. London and New York: INSPEC, 1987
- [6] Polla D L, Sood A K. Schottky barrier photodiodes in p- $Hg_{1-x}Cd_xTe$. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(9): 4908
- [7] Sze S M. *Physics of Semiconductor Devices* (2nd ed). New York: John Wiley & Sons, 1981. 79
- [8] Rhoderick E H. *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford: Clarendon Press, 1980