

121-125

表面固定电荷对 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 光导探测器性能的影响

TN206

桂永胜 郑国珍^N 褚君浩 郭少令 汤定元

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

A **摘要** 研究了表面固定电荷密度对 $HgCdTe$ 光导探测器性能的影响, 计算结果表明, 表面固定电荷对器件的性能有着重要的影响, 选择合适的钝化工艺, 控制表面固定电荷密度, 可以优化器件性能.

⑧

关键词 $HgCdTe$, 光导探测器, 电压响应.

光子器件

引言

$Hg_{1-x}Cd_xTe$ 光导探测器制备过程中的钝化工艺, 会在 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 表面形成一层 n 型重积累层, 积累层一方面可以减小表面复合速度, 提高器件的性能, 另一方面, 由于积累层是高电导区, 减小了器件的电阻, 降低了器件的响应率和探测率. 因此, 从理论上优化器件的钝化工艺, 可以为提高器件性能提供理论指导.

人们很早就注意到钝化层对器件的重要性^[1], 并不断对此进行了深入研究^[2,3]. 这些研究都只停留在定性分析的基础上, 没有深入到定量计算表面固定电荷对器件性能的影响. 本文考虑到钝化引起的积累层带有明显二维特性^[1], 采用 Fang 和 Howard^[6]变分法计算表面势的分布, 通过一维模型求解光生载流子在空间的分布, 计算 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 光导探测器的电压响应, 从而进一步分析钝化对器件的影响.

1 理论

$Hg_{1-x}Cd_xTe$ 光导探测器的钝化层中存在着大量的固定正电荷, 它们将在体材料的表面感应浓度相等的电子, 这些电子分布在表面很薄的范围内, 形成了一个准二维电子气. 理论上对二维电子气已有一系列计算方法. 使用的模型已从单带发展到多带, 无论是那一种模型都必须从泊松方程和薛定谔方程着手. Fang 和 Howard 采用的变分自洽法是其中一种相对简单实用的方法. 根据该模型, 考虑到表面积累层中表面电子浓度远远高于体电子浓度, 表面势 V_H 与表面固定正电荷密度 N_f 有如下关系:

$$V_H = \frac{3N_f e^2}{2\epsilon_s \epsilon_0 b}, \quad (1)$$

其中

本文 1996 年 9 月 12 日收到, 修改稿 1996 年 12 月 18 日收到

$$b = \left(\frac{33m_n e^2 N_I}{8\epsilon_s \epsilon_0 \hbar^2} \right)^{1/3} \quad (2)$$

式中 m_n 为电子的有效质量, e 为电子的电荷量, ϵ_0 和 ϵ_s 分别为真空介电常数和静介电常数, 静介电常数 ϵ_s [7] 与材料组分 x 有关, 即

$$\epsilon_s = 20.8 - 16.8x + 10.6x^2 - 9.4x^3 + 5.3x^4 \quad (3)$$

HgCdTe 表面积累层的表面势将阻止空穴向表面的运动, 在这种情况下, 有效表面复合速度 [8] 为

$$S_{eff} = S_0 \exp(-V_H/kT), \quad (4)$$

式中 S_0 为表面为平带情况下的表面复合速度, k 是玻耳兹曼常数, T 是绝对温度.

HgCdTe 光导探测器上下表面均存在积累层, 如果认为上下表面的情况完全相同, 探测器的电阻为

$$R = \frac{1}{(N_b \mu_b + 2N_I \mu_s/d) e w d} \quad (5)$$

这里 l 、 w 、 d 分别为探测器的长、宽、高, N_b 为体内的电子浓度, μ_s 是表面电子的迁移率, 77K 时约为 $10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 的量级 [9], μ_b 是体电子的迁移率, 可由 Rosbeckd 等人的公式 [10] 算得, 组分 0.2 左右的 HgCdTe 材料, 77K 时迁移率约为 $1 \sim 3 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{Vs}$.

表面复合对材料的少子寿命有重要的影响, 由于表面复合的存在, 体寿命为 τ_b 的材料实际的净寿命 τ_{net} 将满足

$$1/\tau_{net} = 1/\tau_b + 1/\tau_s = 1/\tau_b + 2S_{eff}/d, \quad (6)$$

式(6)中已考虑了表面势对表面复合速度的影响, 所以在计算实际净寿命时, 采用了方程(4)中的有效表面的复合速度.

工作在恒流模式的光导探测器, 在单一波长 λ 的光辐射下, 电压响应为:

$$R_v = (\lambda/hc) \eta q R (\mu_b E \tau_{net}/l), \quad (7)$$

式中 E 为偏置电场强度, c 是光速, h 是普朗克常数, η 是量子效率.

2 结果与讨论

为了研究表面固定电荷对器件性能的影响(仅考虑 77K 时的情况), 假定光导探测器为 n 型样品, 组分 0.214, 材料体寿命为 $10\text{ns} \sim 10\mu\text{s}$, 掺杂浓度在 $5 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 范围, 表面电子迁移率为 $2 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$. 探测器的光敏面为 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$, 厚度为 $8\mu\text{m}$. 入射光的波长为 $10.6\mu\text{m}$, 量子效率为 0.6, 偏置电场强度为 20V/cm .

探测器的电阻对表面固定电荷的依赖关系如图 1 所示. 由钝化引起的表面电子积累层是一个高电导区, 它可减小器件的电阻, 降低器件的性能. 从图中显然可见, 当表面固定正电荷密度 $N_I = 10^{11} \sim 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 时, 表面固定电荷对探测器电阻的作用发生转变. 当 $N_I > 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 时, 探测器的电阻基本与表面钝化无关, 主要由体材料的情况决定. 当 $N_I > 10^{12} \text{cm}^{-2}$

时,探测器的电阻基本与体材料的情况无关,主要由表面钝化引起的表面电子浓度决定.

图 2 为表面固定电荷对探测器净寿命 τ_{net} 的影响. 当 N_f 的值较小时, τ_{net} 随 N_f 的增加迅速提高, 直到达到 τ_b . 表面固定电荷将在 n 型探测器表面形成一个电子积累层, 积累层使能带在表面处发生弯曲, 形成一个电子势阱, 对体内的少数载流子(空穴)来说就是一个势垒, 它阻碍着光生空穴向表面的扩散, 减小了由于表面复合而损失的光生空穴数目. 所以, 表面积累层的作用相对减小了表面复合速度. 表面势随固定电荷密度的增加而增加, 其具体关系如方程(1). 当固定电荷浓度 N_f 大于 $3 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 时, 即使表面复合速度高达 $1 \times 10^5 \text{cm/s}$, 由于固定电荷引起的空穴表面势垒非常高, 探测器中的光生空穴基本上不能翻越这个势垒而到达表面, 这一现象对提高探测器的性能是非常有利的.

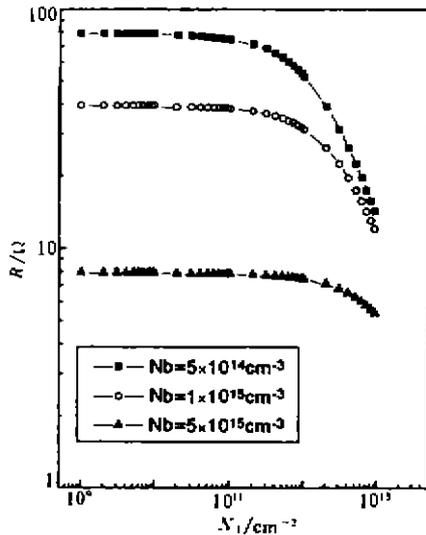


图 1 不同掺杂浓度 N_b 器件的电阻 R 与表面固定电荷密度 N_f 的关系
Fig. 1 Variation of R with N_f as a function of N_b .

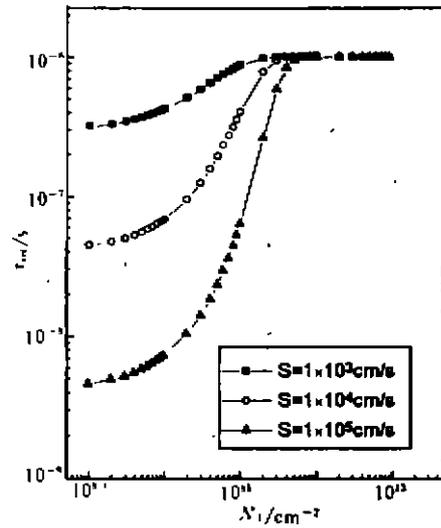


图 2 不同表面复合速度 S_0 器件的净寿命 τ_{net} 与表面固定电荷密度 N_f 的关系
Fig. 2 Variation of τ_{net} with N_f as a function of S_0 .

图 3 为不同掺杂浓度体材料电压响应随固定电荷密度变化的关系. 探测器中少子寿命是 $1\mu\text{s}$, 表面复合速度为 1000cm/s , 表明这是一个高探测率器件. 当钝化层中固定电荷密度超过 10^{11}cm^{-2} 时, 表面势垒的存在减少了表面复合的光生空穴, 提高了器件的性能. 一旦固定电荷密度超过 10^{12}cm^{-2} , 使表面重积累层的电导率提高, 减小了器件的本征电阻, 而降低了器件的性能. 随着电荷密度的进一步增加, 尤其是低掺杂浓度的器件, 性能下降得很快.

图 4 是不同表面复合速度下, 电压响应随固定电荷密度变化的关系. 探测器中少子寿命为 $1\mu\text{s}$, 体内的掺杂浓度为 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$. 可明显看出, 在 $10^{11} \sim 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 范围内, 电压响应有一峰值, 随着表面复合速度的提高, 峰向固定电荷密度增加的方向移动. 峰的高度直接由表面复合速度决定, 表面复合速度低的探测器, 电压响应高. 当固定电荷密度大于 $6 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 时, 表面复合速度相差两个数量级的探测器的性能基本相同, 这就说明选择不同的钝化工艺, 可控制探测器的有效表面复合速度, 从而提高器件的性能.

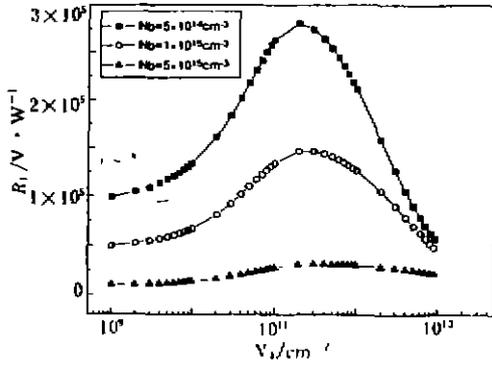


图3 不同掺杂浓度 N_b 器件的电压响应 R_v 与表面固定电荷密度 N_f 的关系 ($S_0=1000\text{cm/s}$, $\tau_b=1\mu\text{s}$)

Fig. 3 Variation of R_v with N_f as a function of N_b for material with $S_0=1000\text{cm/s}$ and $\tau_b=1\mu\text{s}$

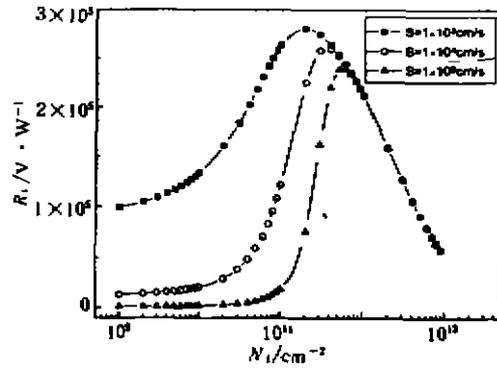


图4 不同表面复合速度 S_0 器件的电压响应 R_v 与表面固定电荷密度 N_f 的关系 ($N_b=5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$, $\tau_b=1\mu\text{s}$)

Fig. 4 Variation of R_v with N_f as a function of S_0 for material with $N_b=5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ and $\tau_b=1\mu\text{s}$

探测器中少数寿命 τ_b 对电压响应-固定电荷密度关系的影响如图5所示. 计算中体内的掺杂浓度取为 $5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$, 表面复合速度取为 10^5cm/s . 在表面固定电荷密度低于 10^{11}cm^{-2} 的情况下, 器件的性能基本与少数寿命无关, 因为此时器件中的有效寿命 τ_{eff} 基本由表面复合速度决定. 表面固定电荷密度在 $10^{11} \sim 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 范围内, 探测器的性能变化很大, 对长寿命的器件 ($\tau_b=10\mu\text{s}$), 探测器的电压响应变化达两个数量级以上.

3 结论

HgCdTe 光导探测器的性能与探测器钝化工艺引入的表面固定电荷密度密切相关, 表面固定电荷减小了由于表面复合损失的光生空穴, 提高了器件的性能, 同时又降低了器件的电阻, 也就降低了器件的性能, 这两方面互相矛盾. 通过选择器件钝化工艺、改变器件表面的固定电荷密度, 可以优化器件性能.

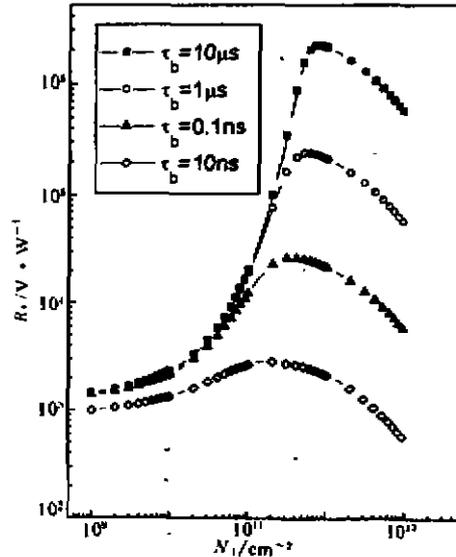


图5 不同少数寿命 τ_b 器件的电压响应 R_v 与表面固定电荷密度 N_f 的关系 ($S_0=10^5\text{cm/s}$, $N_b=5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$)

Fig. 5 Variation of R_v with N_f as a function of τ_b for material with $S_0=10^5\text{cm/s}$ and $N_b=5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$

参考文献

- 1 Kinch M A. *Semiconductors and Semimetals*. Vol 18. edit R K Willardson A C Beer, New York: Academic 1981, 313~84
- 2 Nemirovsky Y, Bahir G J. *Vac. Technol.*, 1989, **A7**:450
- 3 Nemirovsky Y. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1990, **A8**:1185
- 4 Singleton J, Nasir F, Nicholas R J. *Proc. SPIE*, 1986, **659**:99
- 5 Lowney J R, et al. *J. Electron. Mater.*, 1993, **22**(8):985
- 6 Fang F F, Hoard W E. *Phys. Rev. Lett.*, 1966, **16**:797
- 7 Yadava R D S, Gupta A K, Warriar A V R. *J. Electron. Mater.*, 1994, **23**(12):1359
- 8 White A M. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1981, **14**:L1~3
- 9 桂永胜,等. *半导体学报*,待发表
- 10 Rosbeck J P, et al. *J. Appl. Phys.*, 1982, **50**:6430

**DEPENDENCE OF PERFORMANCE ON THE FIXED SURFACE
CHARGES IN $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ PHOTOCONDUCTOR**

Gui Yongsheng Zheng Guozhen Chu Junhao Guo Shaoling Tang Dingyuan

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

Abstract The effect of fixed surface charge density on the performance of HgCdTe photoconductive detectors was presented in this study. The calculations show that the fixed surface charges can influence the characteristics of the detector greatly. Optimum of the fixed surface charges governed by the passivation processes can improve the device performance.

Key words $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, photoconductive detector, voltage responsivity.