

文章编号: 1672-8785(2006)12-0004-06

HgCdTe MIS 器件的制备及其界面电学特性的研究 (上)

何 波^{1,2}, 史衍丽², 徐 静³

(1. 昆明理工大学光电子新材料研究所, 昆明 650051; 2. 昆明物理研究所, 昆明 650223;
3. 济南大学材料学院, 济南 250022)

摘 要: 介绍了 HgCdTe MIS 器件的制备及由其 C-V 特性计算、分析界面电学特性的基本原理和步骤。利用 MIS 器件高频 C-V 曲线耗尽区的电学特性推导了衬底杂质浓度随深度分布的计算公式。

关键词: HgCdTe; MIS 器件; 表面钝化; 界面电学特性

中图分类号: O472+.4 **文献标识码:** A

Fabrication of HgCdTe MIS Device and Study of Interface Electrical Characteristics of Passivation Films on It (I)

HE Bo^{1,2}, SHI Yan-li², XU Jing³

(1. Institute of Advanced Materials for Photo-Electronics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China; 2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China; 3. Department of Materials and Engineering, Ji'nan University, Ji'nan 250022, China)

Abstract: The fabrication of HgCdTe MIS devices and the basic principle and steps for calculating and analyzing the interface electrical characteristics through their C-V curves are presented. The formulas for calculating the distribution of the impurity concentration in substrates with depth are deduced by using the electrical characteristics in the depletion region of high frequency C-V curves of the MIS devices.

Key words: HgCdTe; MIS device; surface passivation; interface electrical characteristic

1 引言

根据现代半导体理论, 半导体表面和界面的性质, 在很大程度上影响甚至决定了半导体器件的特性。因此要保持性能稳定, 器件表面必须进行钝化处理。

Hg_{1-x}Cd_xTe 是一种三元混晶半导体材料, 是半金属 HgTe ($E_g = -0.3\text{eV}$) 和半绝缘体 CdTe ($E_g = 1.6\text{eV}$) 的连续固溶体。Hg_{1-x}Cd_xTe 合金的禁带宽度随其组分 x 的改变可在 0eV ~ 1.6eV 范围内连续变化, 能满足 1 μm ~ 3 μm 、3 μm ~ 5 μm 、8 μm ~ 14 μm 三个大气窗口的红外探测要求^[1]。

其物理化学性质相当活泼。新鲜的 HgCdTe 表面在空气中很快就会被氧化; 且化合物中 Te-Hg 键较弱, 易断裂, 使 Hg 原子容易逸出。HgCdTe 是窄禁带半导体, 由固定电荷引起的能带弯曲常常是禁带宽度的一个或几个数量级。因此表面易受外界影响而发生积累、耗尽甚至反型, 引起长波 pn 结严重的隧道电流漏电, 大大降低 HgCdTe 光伏焦平面阵列的稳定性、可靠性^[2]。所以, 表面钝化是红外探测器制造工艺中的关键步骤。目前, 在国外, 自身阳极硫化加单层 ZnS 对 P

收稿日期: 2006-06-19

作者简介: 何波(1981—), 男, 昆明理工大学 2004 级硕士研究生, 专业方向为半导体光电子材料及器件。

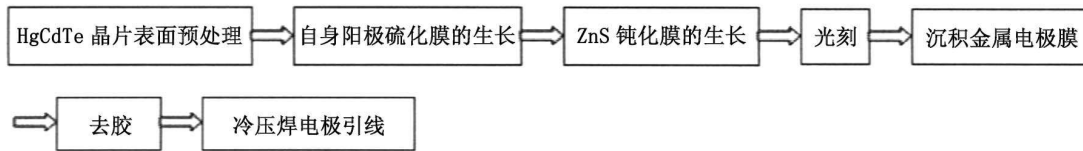


图 1

型 HgCdTe 表面的钝化方法被人们广泛推崇。其突出优点是表面处理过程与介质膜生长过程相结合。通过碲镉汞材料在电解液中的自身电化学反应过程, 得到“新鲜”的碲镉汞表面和比较完整的界面过渡结构, 从而实现介质钝化膜的良好生长。

金属-绝缘体-半导体 (MIS) 器件的 C-V 特性是用于研究半导体表面、界面和体特性的重要工具。通常利用测试的高频 MIS 电容的最大值估计栅介质膜的厚度; 由其归一化的最小电容确定衬底掺杂密度; 由其平带电压确定绝缘层固定电荷密度; 由曲线斜率确定衬底杂质浓度分布; 曲线的滞后效应用来计算慢界面态密度; C-V 曲线的深耗尽程度可用来估计少子产生寿命; 配合准静态测试 (高、低频组合电容法) 可以定量分析界面态密度的能量分布^[3]。另外, 根据 MIS 器件的过渡响应原理, 给其加上一个阶跃电压后, 测量 MIS 电容随时间的驰豫过程, 即测量 C-t 曲线, 由 Zernbst 方程进行数据处理可得载流子界面产生速率和少子寿命^[4]。

正是因为 MIS 器件结构简单, 制造方便, 并具有经济、快速、非破坏性的特点, 而且通过其 C-V 特性分析可给出有关金属、半导体、绝缘体的许多信息, 所以以下对用自身阳极硫化加单层 ZnS 来钝化 HgCdTe MIS 器件的制备工艺及其 C-V 曲线计算、分析界面电学特性的基本原理及步骤作一介绍。

2 实验

2.1 MIS 器件的制备

HgCdTe MIS 器件制备工艺流程如图 1 所示。

首先将用固态再结晶法生长的厚约 1mm 的 P 型 HgCdTe 晶片用直径为 $3\mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 磨料在 Logitech PM4 型磨抛机上研磨; 再用

$0.3\mu\text{m}$ 的 MgO 微粉研磨抛光; 然后经 $\text{Br}_2-\text{CH}_3\text{OH}$ 液化学腐蚀, 获得尽可能完整的 HgCdTe 晶体表面 (HgCdTe 材料性能参数如下: $x=0.25$, $E_g=0.177\text{eV}$, $n_{i77K} = 1.71 \times 10^{12}/\text{cm}^3$, $N_a \approx 2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$)。随后用电化学方法进行自身阳极硫化, 电解液为按一定比例配置的 $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O} +$ 乙二醇溶液, 呈碱性; 电极采用的恒定电流密度为 $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 以 $10\text{\AA}/\text{min}$ 的速率生长出约 100\AA 厚的自身阳极硫化膜。ZnS 介质钝化膜的生长是用射频磁控溅射方法: Ar^+ 束能量为 350eV , 束流为 55mA , ZnS 膜厚为 1780\AA 。然后采用光刻技术限定金属栅面积, 通过真空热蒸发沉积 In 金属电极膜 (栅面积 A 为 0.81mm^2 , 电极膜厚约为 $2\mu\text{m}$), 去胶, 电极引线焊接采用冷压焊的方法, 制成 MIS 器件。图 2 为 HgCdTe MIS 器件的结构图。

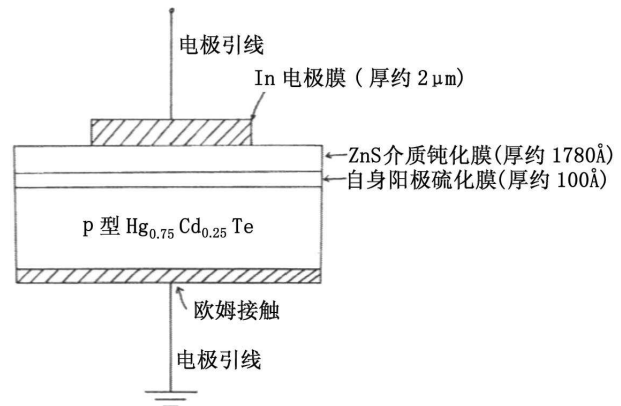


图 2

2.2 MIS 器件的 C-V 特性测量

将 MIS 器件引线焊接到杜瓦瓶的焊盘上, 然后用机械泵抽真空至 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 封装。往杜瓦瓶中灌入液氮后, 在外界光和电磁屏蔽条件下, 测量 C-V 特性。测量设备为美国 KEITHLEY 公司的 Model 82-DOS 型半导体器件 C-V 测试系统, 采用的交流小信号频率为 1MHz , 振幅为 7.5mV , 直流电压线性扫描速率为 $50\text{mV}/\text{s}$ 。

3 结果与讨论 (界面电学特性研究)

3.1 MIS C-V 曲线的串联电阻修正

图 3 为实验测得的 MIS 器件准静态 (QS) 和 1MHz C-V 曲线。77K 下, 1MHz 时的 C-V 关系呈现高频特性。但是在积累区的电容值低于绝缘层电容 [$C_i = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_i} = 3.3 \times 10^{-10}(F)$ 与准静态积累区电容值相符], 这是由于样品中存在一定大小的串联电阻 R, 使 MIS C-V 曲线发生畸变、失真现象。为了得到 MIS 器件的正确高频 C-V 曲线, 必须对测得的高频曲线进行串联电阻修正 [5]。由串联电阻公式 [3]

$$R = \sqrt{\frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_i C_a} - 1} \times \frac{d_i}{\epsilon_i \epsilon_0 A \omega} = 295 \Omega$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_i 为绝缘层电介质相对介电常数, d_i 为绝缘层厚度, A 为栅电极面积, C_a 为高频曲线积累区测试电容。

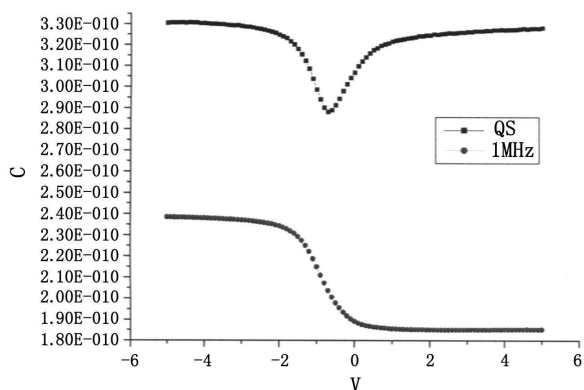


图 3

Q 对应 C_a 的有效面积 $A' = \frac{C_a d_i}{\epsilon_i \epsilon_0} = 5.8 \times 10^{-7} \text{m}^2 < A = 8 \times 10^{-7} \text{m}^2$, 所以可以判断存在串联电阻效应。应该由计算的 R 值, 利用 MIS 器件 C-V 特性串联电阻修正公式 [3]

$$C = \frac{\frac{1}{C_m} \pm \sqrt{\frac{1}{C_m^2} - 4R^2\omega^2}}{2R^2\omega^2} \quad (1)$$

对测试高频电容 C_m 进行逐一修正。在修正计算中, 当绝缘层电容 $C_i \leq C_0$ 时, 式 (1) 根号前取负号; 当 $C_i > C_0$ 时, 测试电容出现峰值, 在峰值的积累区侧, 式 (1) 根号前取正号, 而在耗尽区侧则取负号。

$$Q C_0 = \frac{1}{R\omega} = 5.4 \times 10^{-10}(F)$$

式中, ω 为角频率, $C_i = 3.3 \times 10^{-10}(F) < C_0 = 5.4 \times 10^{-10}(F)$, 所以我们的 MIS 器件的 C-V 曲线串联电阻修正公式为

$$C = \frac{\frac{1}{C_m} - \sqrt{\frac{1}{C_m^2} - 4R^2\omega^2}}{2R^2\omega^2} = 1.46 \times 10^{-19} \left[\frac{1}{C_m} - \sqrt{\frac{1}{C_m^2} - 1.37 \times 10^{19}} \right] \quad (2)$$

对测试的高频电容 C_m 逐点用式 (2) 进行修正后的 C-V 曲线如图 4 所示。

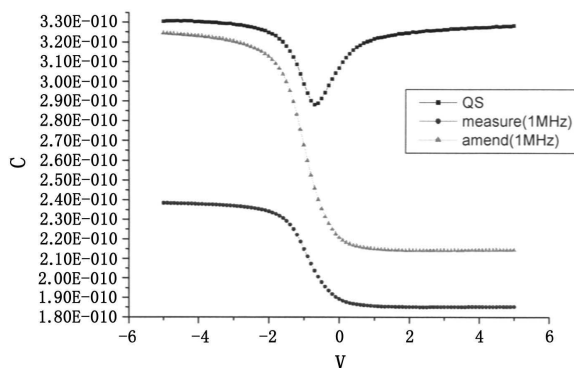


图 4

3.2 钝化层固定电荷密度 N_f

由德拜屏蔽长度公式 [6]

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 k_B T}{e^2 p_0}} = 1.31 \times 10^3 \left(\frac{\epsilon_s}{12} \right)^{1/2} \times \left(\frac{T}{300K} \right)^{1/2} \left(\frac{10^{15}/\text{cm}^3}{p_0} \right)^{1/2} [\text{\AA}] = 150 \text{\AA}$$

钝化层固定电荷密度 N_f 在一定程度上反映了绝缘层的完整性及工艺过程中的损伤情况。功函数之差和绝缘层中的固定电荷都会使 MIS 器件的理想 C-V 曲线沿电压轴平移平带电压 V_{FB} 数值,

$$V_{FB} = V_{ms} - \frac{qAN_f}{C_i} \Rightarrow N_f = \frac{C_i(V_{ms} - V_{FB})}{qA} \quad [7]$$

式中, $V_{ms} = \frac{W_m - W_s}{q}$ 。实际上, 可根据平带电容 C_{FB} 来确定平带电压 V_{FB} [6]:

$$C_{FB} = \frac{C_i}{1 + \frac{\epsilon_i L_D}{\epsilon_s d_i}} = 3 \times 10^{-10}(F)$$

并由修正后的 C-V 曲线可知 $V_{FB} = -1.5V$ 。

对 P 型 HgCdTe 来说, 当 N_a 较低时 (例如 $N_a \leq 1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$), 在任何温度下都是非简并的 [8]。我们的 MIS 器件 P 型 HgCdTe 衬底的费米能级位置 $E_F = E_i - k_B T \ln \frac{N_a}{n_i} = E_i - 0.0625$, 如图 5 所示。其中, 电子亲和势 $qx \approx 4.93\text{eV}$ [9]。

半导体衬底功函数 $W_s = 5\text{eV}$, 又 Q 金属 In 功函数 $W_m = 3.8\text{eV} \therefore V_{ms} = \frac{W_m - W_s}{q} = -1.2V$, \therefore 固定电荷密度

$$N_f = \frac{C_i(V_{ms} - V_{FB})}{qA} = 7.6 \times 10^{10}/\text{cm}^2 \quad (3)$$

据文献 [10] 报道, 一般自身阳极硫化加单层 ZnS 钝化结构具有低的负固定电荷密度。但我们的 MIS 器件的钝化层带低的固定正电荷密度, 这可能与自身阳极硫化对工艺要求较苛刻, 很难完全杜绝 OH- 离子影响, 容易形成部分含氧钝化层有关 [11]。通常, 氧和金属元素组分偏高的 ZnS 的过渡层呈现正电荷特性; 而氧和金属元素组分偏低的 ZnS 的过渡层呈现负电荷特性 [12]。

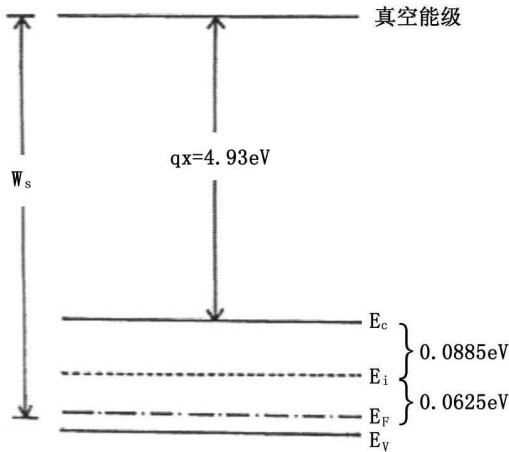


图 5 衬底 P 型 $\text{Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$ 能带图

3.3 MIS 结构衬底的杂质浓度分布

3.3.1 C-V 法测量 MIS 结构衬底杂质浓度分布的基本原理

推导方法一:

如图 6 所示, 栅电压 V 等于绝缘层的电位 V_i 和半导体侧的电位差 V_s 之和, 即 $V = V_i + V_s$, 其中

$$V_i = \frac{-qAWN_a(W)}{C_i}, \quad V_s = \frac{-qW^2N_a(W)}{2\epsilon_s\epsilon_0}$$

W 为栅电压为 V 时的耗尽层深度 [13]。在耗尽状态下对上式两边微分可得: $dV = dV_i + dV_s$ 。

MIS 结构电容相当于绝缘层电容 C_i 和半导体空间电荷层电容 C_s 串联, 其中 C_s 是随外加电压而改变的, 即 $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_s}$ 。

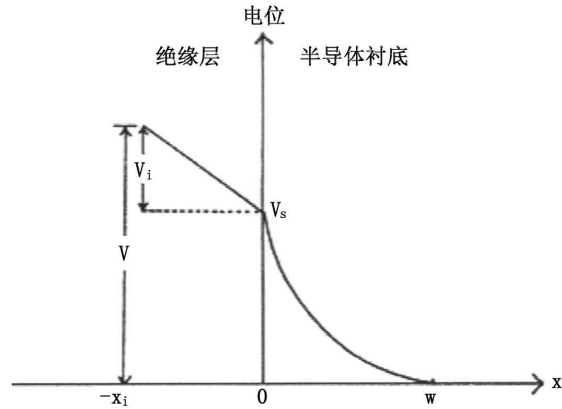


图 6 MIS 结构耗尽状态的电位分布

Q 半导体衬底耗尽层深度为

$$W = \frac{\epsilon_s\epsilon_0A}{C_s} = \epsilon_s\epsilon_0A \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_i} \right) \quad (4)$$

则

$$W^2 = (\epsilon_s\epsilon_0A)^2 \left[\left(\frac{1}{C} \right)^2 + \left(\frac{1}{C_i} \right)^2 - \frac{2}{CC_i} \right]$$

$$\therefore dW = \epsilon_s\epsilon_0Ad \left(\frac{1}{C} \right)$$

$$dW^2 = (\epsilon_s\epsilon_0A)^2 \left[d \left(\frac{1}{C} \right)^2 - \frac{2}{C_i} d \left(\frac{1}{C} \right) \right]$$

Q 栅电压变化量 dV 非常小, 则 $W : W + dW$ 范围内的 $N_a(W)$ 视为定值。

$$\therefore dV_i = \frac{-qAN_a(W)dW}{C_i} = \frac{-qA^2\epsilon_s\epsilon_0N_a(W)}{C_i} d \left(\frac{1}{C} \right)$$

$$dV_s = \frac{-qN_a(W)}{2\epsilon_s\epsilon_0} dW^2 = \frac{-qN_a(W)}{2\epsilon_s\epsilon_0}$$

$$\times \left[(\epsilon_s\epsilon_0A)^2 d \left(\frac{1}{C} \right)^2 - \frac{2(\epsilon_s\epsilon_0A)^2}{C_i} d \left(\frac{1}{C} \right) \right]$$

$$= \frac{-qN_a(W)\epsilon_s\epsilon_0A^2}{2} d \left(\frac{1}{C} \right)^2 + \frac{qN_a(W)\epsilon_s\epsilon_0A^2}{C_i} d \left(\frac{1}{C} \right)$$

$$\therefore dV = dV_i + dV_s = \frac{-qA^2\epsilon_s\epsilon_0N_a(W)}{C_i} d \left(\frac{1}{C} \right)$$

$$+ \frac{-qN_a(W)\epsilon_s\epsilon_0A^2}{2} d \left(\frac{1}{C} \right)^2 + \frac{qN_a(W)\epsilon_s\epsilon_0A^2}{C_i} d \left(\frac{1}{C} \right)$$

$$= \frac{-qN_a(W)\epsilon_s\epsilon_0A^2}{2} d \left(\frac{1}{C} \right)^2 = \frac{qN_a(W)\epsilon_s\epsilon_0A^2}{C^3} dC$$

$$\Rightarrow N_a(W) = \frac{C^3}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2} \times \left(\frac{dC}{dV}\right)^{-1} \quad (5)$$

这样, 对 MIS 器件高频 C-V 曲线耗尽区 [5] 逐点求斜率 $\frac{dC}{dV}$, 由式 (5) 即可求出 $N_a(W)$, 同时由式 (4) 可得到相应深度 (W)。通过一系列这样的方法可得到衬底不同深度上的杂质浓度分布。

推导方法二:

在耗尽层近似条件下, 当偏置电压变化 dV 时, 耗尽层宽度也随之变化, 则电荷的变化量为 dQ 。值得注意的是, 该电荷变化只发生在耗尽层边缘, 而耗尽层内部电荷不发生变化。

总电荷 $Q = -qAWN_a(W)$ [6],

$$\text{又 } QW = \epsilon_s\epsilon_0 A \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_i}\right)$$

$$\therefore Q = -qN_a(W)\epsilon_s\epsilon_0 A^2 \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_i}\right)$$

由微分电容定义:

$$C = \frac{dQ}{dV} = -qN_a(W)\epsilon_s\epsilon_0 A^2 \frac{d\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_i}\right)}{dV}$$

$$= qN_a(W)\epsilon_s\epsilon_0 A^2 C^{-2} \frac{dC}{dV}$$

$$\Rightarrow N_a(W) = \frac{C^3}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2} \times \left(\frac{dC}{dV}\right)^{-1}$$

该式与推导方法一的结果完全相同。

3.3.2 HgCdTe 衬底界面附近的杂质浓度分布

为消除功函数差和绝缘层中固定电荷对 C-V 曲线的影响 [6], 我们把 C-V 曲线沿电压轴平移 $|V_{FB}| = 1.5(\text{V})$, 如图 7 所示。

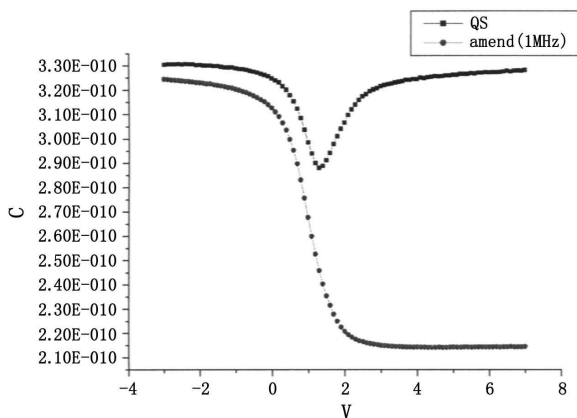


图 7

然后, 我们由

$$\begin{cases} N_a(W) = \frac{C^3}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2} \times \left(\frac{dC}{dV}\right)^{-1} \\ W = \epsilon_s\epsilon_0 A \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_i}\right) \end{cases}$$

对修正后的高频 C-V 曲线耗尽区 (偏压 $V > 0$) 逐点求 $N_a(W)$ 并和 W 分别作为纵坐标和横坐标可得杂质浓度随深度的分布, 如图 8 所示。耗尽层最大宽度 [13] 为

$$W_{dm} = \left[\frac{4\epsilon_s\epsilon_0 k_B T}{q^2 N_a} \ln \frac{N_a}{n_i} \right]^{1/2} = 9 \times 10^{-8} \text{m}$$

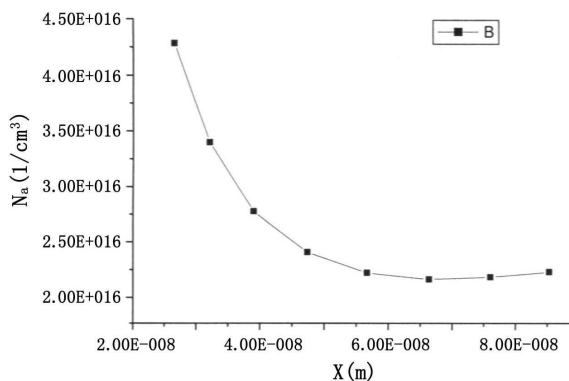


图 8

可以看出, HgCdTe 衬底体内受主杂质浓度为 $2.2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。在近表面处, 多子和界面态影响是不应忽略的 [5]。这与 HgCdTe 是一种缺陷半导体 (P 型 HgCdTe 是 Hg 空位缺陷半导体), 具有较强的离子化倾向, 存在晶体缺陷输运过程, 材料体内的缺陷倾向于朝表面转移, 在近表面形成较高密度的缺陷有关 [12]。而这些缺陷也正是单层 ZnS 钝化器件具有较高表面隧道电流的原因 [14] (近表面高的杂质浓度会使该处的空间电荷区宽度变窄, 从而增大隧穿系数)。

参考文献

- [1] 何启予, 金国祥, 周茂树. 飞航导弹红外导引头 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [2] 张新昌, 王戒兴. 碲隔汞表面钝化膜界面电学特性研究 [J]. 光学精密工程, 1996, 5(10).
- [3] 陈永珍. 集成电路中栅介质膜的 C-V 测试误差分析及其修正模型 [J]. 半导体技术, 1994, 1(2).
- [4] 丁扣宝, 张秀水. 阶跃电压法测量产生寿命的简单方法 [J]. 半导体技术, 1998, 23(8).

[5] 黄河, 童斐明, 汤定元. $Hg_{1-x}Cd_xTe$ MIS 器件的 C-V 特性 [J]. 红外研究, 1988, 7(2).

[6] 叶良修. 半导体物理学 (上册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.

[7] 何德湛. C-V 技术及其在半导体工艺检测上的应用 [J]. 半导体技术, 2000, 25(3).

[8] 袁浩心, 童斐明, 汤定元. 直接带间隧道对长波 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ PN 结的影响 [J]. 红外研究, 1987, 1(6).

[9] 林首慎, 崔玉林. $HgCdTe$ MOS 结构势垒光电势的研究 [J]. 红外技术, 1983, 5(6).

[10] 陈焕林. $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 上的阳极硫化物薄膜 [J]. 红

外与激光技术, 1985, (1).

[11] 赵晓燕, 彭震宇, 鲁正雄. n^+-p 光伏探测器的化学硫化 [J]. 航空兵器, 2006, 1(2).

[12] 曾戈虹. 长波 $HgCdTe$ 光伏器件漏电机理分析 [J]. 红外技术, 1994, 16(11).

[13] 中乌坚志郎. 半导体工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[14] 孙涛, 陈文桥, 等. 不同钝化结构的 $HgCdTe$ 光伏探测器暗电流机制 [J]. 半导体学报, 2005, 26(1).

(未完待续)

国外专利介绍

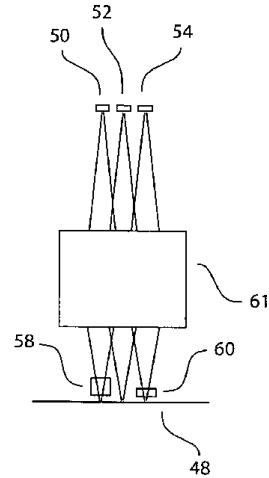
微型多光谱显微列阵

美国专利 US7113651

(2006 年 9 月 26 日授权)

在显微应用中, 多光谱成像是非常有用的。例如, 以多个波段对目标进行成像对于目视检测目标是非常理想的。本发明提供一种微型多光谱显微镜成像系统, 它包括一个或多个照明光源、一个用来对目标进行成像的微型显微成像物镜以及一个或多个用来探测相应波段的图像的探测器。

本专利说明书共 18 页, 其中有 8 张插图。



高编译

国外专利介绍

双波段传感器

美国专利 US7075079

(2006 年 7 月 11 日授权)

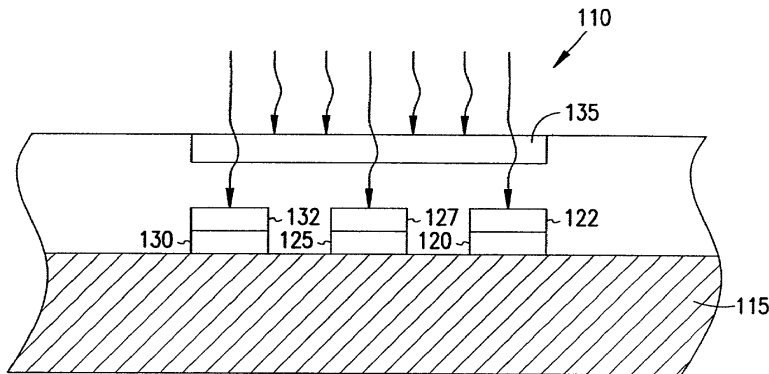
红外微测辐射热计列阵可以用来敏感红外光。当将它与显示器连接时, 它便能提供一种热基 (红外) 图像。这种图像对汽车驾驶员在夜间识别人和动物是极其有

用的。

然而与这种显示器有关的一个问题是, 它们不能显示安全驾驶所需要的其他信息, 如交通信号灯。

本发明提供一种双波长焦平面, 它有两个列阵, 一个是红外像元列阵, 另一个是可见光像元列阵。因此它能敏感交通信号灯的红外绿蓝色以及汽车刹车灯。两个列阵是垂直叠在单片硅衬底上的。

本专利说明书共 4 页, 其中有一张插图。



高编译