

文章编号:1001-5078(2011)05-0542-06

· 红外材料与器件 ·

中短波 HgCdTe 金属接触的退火研究

李海滨^{1,2}, 林春¹, 胡晓宁¹, 何力¹

(1. 中国科学院红外成像材料和器件重点实验室, 中国科学院上海技术物理所, 上海 200083;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:为制备良好的碲镉汞金属接触,研究了热退火处理对中短波 Hg 空位掺杂碲镉汞金属接触的影响。对中短波 HgCdTe-Sn/Au 接触及中波 HgCdTe-Cr/Au 接触经不同条件退火后的接触进行了测量。对于短波碲镉汞, p 型 HgCdTe-Sn/Au 接触经 95 °C, 30 min 退火可降低比接触电阻 2 个量级, 而经 125 °C, 30 min 退火可降低 3 个量级; 离子注入的 n 型 HgCdTe-Sn/Au 接触则容易形成欧姆接触。对于中波碲镉汞, 退火前 p 型 HgCdTe-Sn/Au 接触平均比接触电阻为 $10^{-1} \Omega\text{cm}^2$ 量级, 经适当条件退火可以降低 3 个量级; 此外, Sn/Au 比 Cr/Au 更适合作为中波 HgCdTe 的接触金属。因而 HgCdTe 金属接触可通过一定退火处理得到改善。

关键词:碲镉汞; MS 接触; 退火; 欧姆接触

中图分类号: TN214 **文献标识码:** A

Thermal annealing of HgCdTe and metal contact

LI Hai-bin^{1,2}, LIN Chun¹, HU Xiao-ning¹, HE Li¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: For improving HgCdTe MS contacts, the influence of thermal annealing on metal contact on short and middle-wavelength HgCdTe is investigated in this paper. The contact specific resistivity ρ_c was measured by the transmission line method (TLM). For short wavelength, p-HgCdTe-Sn/Au contact is obviously a Schottky junction, but the mean contact specific resistivity decreases about 2 order of magnitude after 95 °C, 30 min annealing; and 125 °C, 30 min annealing would make the mean contact specific resistivity decrease about 3 order of magnitude. n-HgCdTe-Sn/Au contact is an Ohmic contact without annealing. For the middle wavelength, the mean specific resistivity of P-HgCdTe-Sn/Au contact is about $10^{-1} \Omega\text{cm}^2$ magnitude before annealing. A three order of magnitude decrease in specific resistivity has been observed after 70 °C, 125 °C and 155 °C annealing with different times, furthermore, it is found that Sn/Au is more suitable than Cr/Au to be HgCdTe MS contact metal. So the HgCdTe MS contact can be improved by thermal annealing.

Key words: HgCdTe; MS contact; annealing; Ohmic contact

1 引言

HgCdTe 红外焦平面探测器作为一种重要核心元器件得到各主要发达国家的广泛重视。HgCdTe 红外焦平面探测器制备工艺主要包含成结、钝化、金属接触和倒焊互连等。金属接触作为关键制备工艺之一,它对于探测器的输出阻抗、工作点、芯片与读

出电路间注入效率、噪声以及焦平面的均匀性都有影响。接触电阻和线性度是表征金属接触质量的主要参数。焦平面探测器要求其金属接触是具有低接

作者简介:李海滨(1983-),男,博士研究生,从事碲镉汞红外焦平面器件制备工艺研究。E-mail:lihaibin@mail.sitp.ac.cn
收稿日期:2010-12-15;修订日期:2011-02-21

触电阻和高线性度的欧姆接触。

对于中短波 HgCdTe 探测器芯片,良好的欧姆接触有时也难于制备,尤其是 p 型 HgCdTe 材料。当 p 型 HgCdTe 与金属接触后,由于功函数较大以及费米钉扎效应会在 MS 界面形成空穴势垒,此外,相对于注入所成 n 型 HgCdTe, p 型材料掺杂浓度不高(约为 $10^{15} \sim 10^{16}/\text{cm}^{-3}$),使得接触界面处隧穿势垒较宽,兼之空穴等效质量较大,所以空穴隧穿电流较小,所以低电阻 MS 接触不易制备^[1]。所以中短波 HgCdTe 金属接触的制备工艺需要进一步优化。

本文采用 Sn/Au 作为中短波 HgCdTe 接触金属,在不同温度和不同时间退火前后,测量了 HgCdTe-Sn/Au 的接触电阻并计算了其比接触电阻,研究了退火处理对金属半导体接触的影响。此外还对 Cr/Au 作为中波 HgCdTe 接触金属进行了研究,比较了两种金属接触的特点和差别。

2 实验原理

由半导体理论可知,金属接触电阻与金属、半导体功函数的差值有关,此外还和半导体掺杂类型、掺杂浓度以及接触表面层耗尽区的产生复合中心浓度有关。为提高金属接触质量,要求接触金属的功函数应与 HgCdTe 的功函数匹配,使得接触表面不会形成对多子的势垒,但 HgCdTe 的表面态导致费米能级钉扎效应,往往会使接触表面形成多子的势垒,而不能形成良好的接触。在常规半导体工艺中,常采用高掺杂方法以减小接触势垒宽度,提高隧穿电流,进而降低金属接触电阻,但 Hg 空位掺杂 p 型 HgCdTe 掺杂浓度较低,其接触改善存在一定的困难。此外增加表面损伤也可降低接触电阻,但对于 p 型 HgCdTe 而言,表面损伤会使 HgCdTe 表面反型,将增大接触电阻,实验表明,离子束轰击并没有降低接触电阻,反而使接触电阻离散性增大^[2]。

为了提高 HgCdTe 金属接触质量,实验中会采用不同接触金属,选择不同淀积工艺以及后工艺处理等方法研究金属半导体接触。本文研究了退火处理法和不同金属电极对中短波 HgCdTe 金属接触的影响。

比接触电阻是判断金属半导体接触质量的一个重要参数^[3],其定义为:

$$\rho_c \equiv \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} \Big|_{V=0} \quad (\Omega \text{cm}^2) \quad (1)$$

其中, V 为接触所加偏压; J 为通过接触的电流密度。 ρ_c 的意义是单位面积金属半导体接触的微分电阻。胡晓宁等^[2]指出金属接触的接触电阻只要足够小,

使其与器件电阻相比可忽略,那么即使金属接触电阻为非线性,器件的电学特性也不会受到明显影响。

金属半导体 MS 接触电阻一般包括部分金属层电阻、MS 接触界面电阻、部分界面下半导体电阻以及电流汇聚-扩散效应引入的电阻等。比接触电阻是一种总体电阻效应,要采用相应的物理模型经过计算得到^[4]。对于薄膜材料,传输线模型法是一种常用的测量方法。

传输线模型法(transmission line model, TLM 模型)是利用传输线理论对接触区分析其电学特性,得到可测物理量与比接触电阻间的关系^[5]。图 1 为 HgCdTe 金属接触示意图以及忽略金属层电阻情况下的等效电路图,其中 L_c 为接触区宽度, W 为接触区长度, R 为 HgCdTe 电阻,而 G 对应界面电导,在直流情况下, $R = R_{sc}/w$, $G = w/\rho_c$, R_{sc} 为接触下半导体方块电阻。

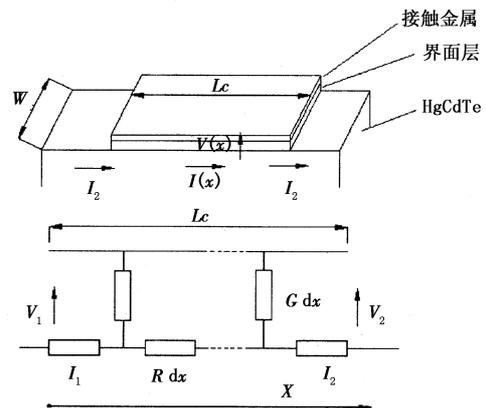


图1 金属接触的传输线模型

由 TLM 理论,沿 x 方向的电流和电压分布分别可表示为:

$$\begin{aligned} V(x) &= V_1 \cosh(\alpha \cdot x) - I_1 Z \sinh(\alpha \cdot x) \\ I(x) &= I_1 \cosh(\alpha \cdot x) - \frac{V_1}{Z \sinh(\alpha \cdot x)} \end{aligned} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{\frac{R}{G}} = \frac{1}{w} \sqrt{R_{sc} \cdot \rho_c} \\ \alpha &= \sqrt{R \cdot G} = \sqrt{\frac{R_{sc}}{\rho_c}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, Z 称为特征阻抗; α 为传输线的衰减常数。

定义接触前端电阻等于图 1 中等效电路中的输入电阻,即:

$$R_c = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{I_2=0} = Z \cdot \coth(\alpha \cdot L_c) \quad (3)$$

由于接触处下半导体层的方块电阻 R_{sc} 和非接触处半导体层的方块电阻 R_s 不同,还需要引入末端

电阻 R_c 来确定比接触电阻,末端电阻定义为:

$$R_c = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{l_2=0} = \frac{Z}{\sinh(\alpha \cdot L_c)} \quad (4)$$

由以上两式可得:

$$\frac{R_c}{R_e} = \cosh(\alpha \cdot L_c) \quad (5)$$

实验上测出 R_c 和 R_e , 就可求出比接触电阻:

$$\rho_c = \frac{wZ}{\alpha} \quad (6)$$

R_c 用 Berger 的方法^[6]测得,制作如图 2 所示的 TLM 测量结构。

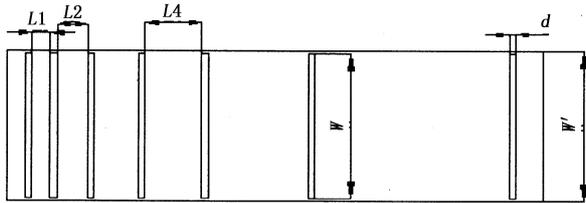


图2 TLM法的样品结构图

在半导体薄膜上制备出一个台面,在上面制备间距不等的相同长方形接触。两个不同距离电极间电阻为 R_T , R_T 可写成:

$$R_T = 2R_c + \frac{R_s L_i}{W'} \quad (7)$$

其中, L_i 为两电极间距离; W' 是为台面宽度; R_s 是薄膜材料本身的方块电阻。测量不同间距电极的电阻 R_T , 做出 $R_T - L$ 关系图, 线性拟合, 在 R_T 轴上的截距可得到 $2R_c$ 。

R_e 的测量采用 Reeves 模型^[7], 在图 3 中, 测量电极 1, 2 间的电阻 R_1 , 2, 3 间的电阻 R_2 , 及 1, 3 间的电阻 R_3 , 根据 Reeves 等人结论:

$$R_e = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}$$

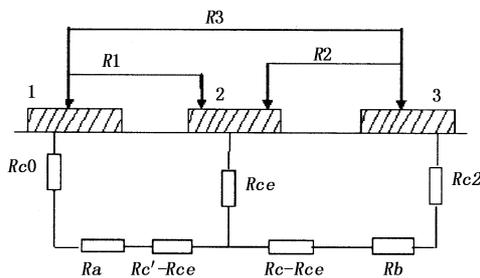


图3 Reeves法测量末端电阻

所以利用拟合得到的 R_c 和测得的 R_e 则可以计算出比接触电阻 ρ_c 。

3 实验

实验中,短波 HgCdTe 为分子束外延(MBE)生长的 p 型材料,其 Cd 组分(x)为 0.4512, 掺杂杂质

为 Hg 空位;中波样品为液相外延(LPE)生长的 Hg 空位掺杂的 HgCdTe, 其组分 x 为 0.29, 载流子浓度为 $6.826 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 。材料样品经过光刻、(离子注入)、腐蚀台面、钝化、金属化等工艺过程,制备了传输线法(TLM)测量结构,其中 TLM 结构中各金属接触间的距离(L)依次是 $15 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$, $35 \mu\text{m}$, $45 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m}$ 和 $155 \mu\text{m}$ 。短波 HgCdTe 接触金属是采用离子束溅射镀膜生长的 Sn/Au;中波 HgCdTe 则同时采用 Sn/Au 和 Cr/Au 作为接触金属。对制备的测试结构进行不同条件的退火处理,退火在氮气环境下进行。使用 Keithly-4200 冷探针系统按 TLM 方法测量相关的 $I-V/R-V$ 曲线,测量温度为 80 K。

4 实验结果及讨论

4.1 短波 HgCdTe 材料

4.1.1 p 型 HgCdTe-Sn/Au 接触

短波 p 型 HgCdTe-Sn/Au 接触,退火前以及分别经过 95°C , 30 min 和 125°C , 30 min 退火后,其比接触电阻与偏压的关系如图 4 所示,其中附图给出了偏压在 $-0.5 \sim 0.5 \text{ V}$ 间的平均比接触电阻与退火温度的关系。由图中可知,退火前,MS 接触的比接触电阻 ρ_c 很大,在 $-0.5 \sim 0.5 \text{ V}$ 间其平均值约为 $5 \Omega\text{cm}^2$;经过 95°C , 30 min 退火后,比接触电阻相比退火前降低了两个量级以上, ρ_c 平均值约为 $0.02 \Omega\text{cm}^2$, 且接触的线性度也得到一定的改善;经过 125°C , 30 min 退火,接触的比接触电阻比 95°C 的退火进一步降低,达到 10^{-3} 量级, ρ_c 平均值约为 $6 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}^2$, 而其退火后接触线性度比 95°C 的退火效果略差。此外,红外焦平面器件大都工作于零偏压附近,而从图 4 所示三条曲线可知,MS 接触的非线性特性在零偏压附近最为显著,远离零偏压的区域线性特性都要优于零偏压区域, 125°C 退火后在零偏压附近的比接触电阻比 95°C 退火后在零偏压附近的比接触电阻小一倍左右,而在远离零偏压处则降幅大一些。

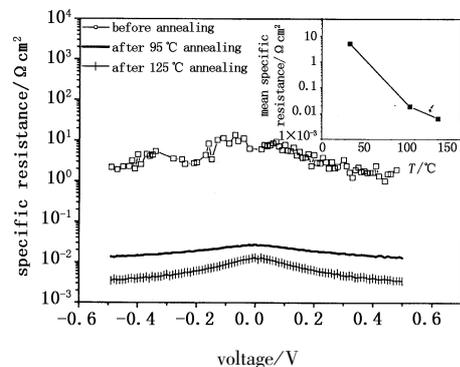


图4 退火前后比接触电阻与偏压的关系

此外,对经一次退火后的样品再进行 210 °C, 30 min 二次退火,发现其结果相比 95 °C 和 125 °C 退火,接触电阻出现严重的恶化,甚至比未退火样品的 MS 接触还差。

4.1.2 n 型 HgCdTe-Sn/Au 接触

n 型 HgCdTe 采用离子注入形成,其载流子浓度在 $10^{17}/\text{cm}^3$ 以上^[8]。图 5 给出了 n 型 HgCdTe-Sn/Au 接触在退火前后的比接触电阻,退火条件为 95 °C, 30 min。从图 5 附图可以看出,退火后接触的平均比接触电阻稍有一些增大,退火前 ρ_c 平均值为 $5.5 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$,退火后其平均值为 $6 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ 。从比接触电阻与偏压关系曲线看,MS 接触电阻的线性度在退火前后没有出现明显的改善或恶化。

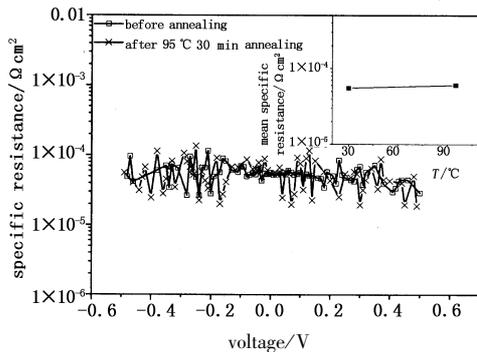


图 5 n 型 MS 接触退火前后比接触电阻

对样品进行 125 °C, 30 min 退火及再进行 210 °C, 30 min 二次退火,发现 MS 接触电阻大幅增高,且非线性特性也明显增大,这种改变在 210 °C, 30 min 二次退火后比 125 °C, 30 min 退火后更显著,210 °C 退火后 $R-V$ 曲线表现出明显的肖特基接触的特性。所以这两种退火条件会对金属接触产生负面的影响。

图 6 显示了 p 型和 n 型 HgCdTe-Sn/Au 接触在最小比接触电阻情况下的对比关系图,其中 p 型 HgCdTe 接触在经 125 °C, 30 min 退火后比接触电阻获得最小值,而 n 型 HgCdTe 接触不经过退火即有最小比接触电阻。从图中可知,p 型 MS 接触的最小比接触电阻要比 n 型最小比接触电阻阻值高接近两个量级。此外,n 型 MS 接触的线性度也要好于 p 型接触。所以对于 HgCdTe 金属接触,n 型金属接触比 p 型金属接触更容易制备且接触性能也优于 p 型接触。

根据半导体金属接触的理论,这种差别应该是由于 n 型和 p 型 HgCdTe 掺杂浓度的不同和其中载流子有效质量、迁移率不同引起的。n 型 HgCdTe 掺

杂浓度远高于 p 型 HgCdTe 掺杂浓度,HgCdTe 中空穴有效质量约为电子有效质量的 30 倍^[9],而电子迁移率比空穴迁移率高一个量级以上,由此导致 n 型半导体金属接触的扩散电流和隧穿电流都要远大于 p 型半导体金属接触,因而 n 型 MS 接触比接触电阻远小于 p 型 MS 接触。

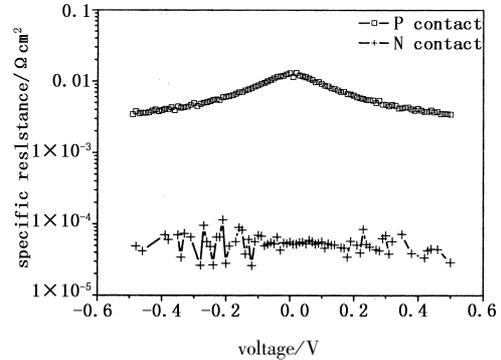


图 6 p 型和 n 型 HgCdTe-Sn/Au 接触比接触电阻对比

4.2 中波 HgCdTe 材料

4.2.1 p 型中波 HgCdTe Sn/Au 接触退火实验

在材料上制备 TLM 结构后,测量未退火处理的接触电阻。把样品分成三片,一片进行 70 °C, 90 min 退火;一片经过 125 °C, 10 min 退火,测量后再进行 125 °C, 20 min 二次退火;另外一片进行 155 °C, 10 min 退火处理。图 7 给出了经过这些退火后的比接触电阻和在 $-0.5 \sim 0.5$ V 间的平均比接触电阻。退火前,接触的比接触电阻有明显的非线性,比接触电阻为 10^{-1} 量级,在零偏压附近接近于 $1 \Omega\text{cm}^2$ 。经过 70 °C, 90 min 退火后,MS 接触的比接触电阻有一个量级以上的降低,但是非线性特性比退火前更为显著,在 $-0.5 \sim 0.5$ V 偏压范围内,其比接触电阻在 $2 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}^2$ 到 $1 \times 10^{-1} \Omega\text{cm}^2$ 间变化。125 °C, 10 min 退火后,MS 接触的比接触电阻相比未退火情况显著降低,平均比接触电阻约为 $7 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}^2$,降低幅度约为三个量级,且接触的线性度也有明显的改善,类似于一个较好的线性电阻;而再经过 125 °C, 20 min 退火,接触的平均比接触电阻几乎没有出现改善或者降低,但是其线性度有一定程度的退化,比接触电阻在零偏压和偏离零偏压时的差值比 125 °C, 10 min 退火后有一定的增大。155 °C, 10 min 退火后,MS 接触的平均比接触电阻相比 125 °C 退火有一定的降低(但不到一倍),但是其线性度则明显差于 125 °C 退火后的接触,其零偏压下比接触电阻比 125 °C, 10 min 退火的零偏压比接触电阻还要大,但其

± 0.5 V 偏压的比接触电阻约为 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min 退火的相应比接触电阻的 $1/3$ 。所以对于零偏压附近工作的红外焦平面探测器, p 型金属接触的制备工艺中采用 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min 退火比 $155\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min 退火效果更好。

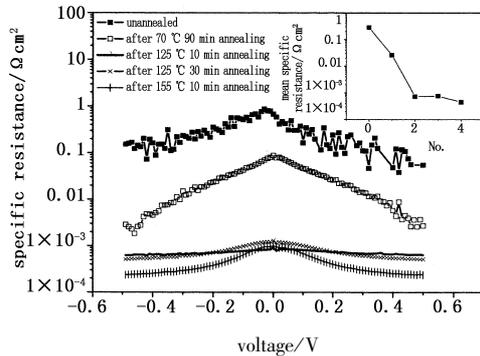


图7 p 型中波 HgCdTe Sn/Au 接触不同退火后比接触电阻

4.2.2 n 型中波 HgCdTe 金属接触

研究发现, n 型 HgCdTe 欧姆接触常用 In/Au 或 Sn/Au 作为金属电极, 且两者形成欧姆接触机理相似, 都是 In 或 Sn 原子向扩散, 在表面与 HgCdTe 反应, 少部分 In 或 Sn 原子形成施主^[10-12], 在表面形成重掺 n^+ 区, 增加了电子的隧穿几率。文献[12]报道了 n 型中波 HgCdTe In/Au 接触经过退火后其比接触电阻的变化趋势, 发现经不同温度退火后的 MS 接触的比接触电阻仅比未退火时稍微小一点, 该结论与本文提到的 n 型短波 HgCdTe Sn/Au 接触的退火结果相似。基于以上实验结论, 可断定 Sn/Au 和中波 HgCdTe 接触退火处理结果应与短波 HgCdTe Sn/Au 接触结论相似, 又因中波 HgCdTe 禁带宽度小于短波 HgCdTe, 使得表面接触势垒更薄及电子浓度更高, 因而其欧姆接触应比短波材料更好。所以用于改善 p 型中波 HgCdTe Sn/Au 接触质量的 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min 退火处理过程也可用于 n 型中波 HgCdTe Sn/Au 接触而又不会产生负面影响。

4.2.3 p 型中波 HgCdTe Sn/Au 接触和 Cr/Au 接触对比

除 Sn/Au 之外, HgCdTe 常用接触电极金属还有 Cr/Au。采用离子溅射方法在样品上制备 Cr/Au 接触。实验发现, 未退火测量的比接触电阻比 Sn/Au 接触退火前的比接触电阻要大。对 Cr/Au 接触分别进行 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min 和 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min 退火。退火后 Cr/Au 接触与 Sn/Au 接触退火后比接触电阻的对比关系由图 8 给出。可以看到, Cr/Au 接触经两种退火后比接触电阻值也有一定的降低, 但是其线性度很差, 有图 8 可以看出, $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火后, Cr/Au

接触的比接触电阻在 $-0.5 \sim 0.5$ V 偏压范围内的变化幅度达到两个量级。与 Sn/Au 接触对比, Cr/Au 接触比接触电阻值要远大于 Sn/Au 接触, 而且其线性度也比 Sn/Au 接触差。此外, 对 Cr/Au 接触进行多次 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 更长时间的退火实验发现, 其接触性能也不会明显改善, 甚至会增大其比接触电阻和非线性度。由此可见, Sn/Au 相比 Cr/Au 更适合作为 HgCdTe 的接触金属。

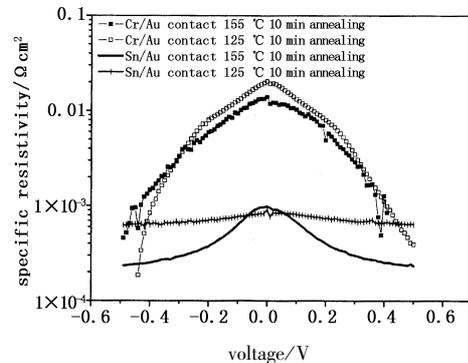


图8 退火后 Sn/Au 接触和 Cr/Au 接触比接触电阻对比

5 结论

本文采用传输线模型 (TLM) 研究了碲镉汞金属接触热退火前后的电学接触性能。所得结论有:

对短波 p 型和 n 型 Sn/Au 接触分别进行不同条件的退火处理, p 型金属接触退火前比接触电阻为 $100 \sim 101\text{ } \Omega\text{cm}^2$ 之间, 有明显的非线性, $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 min 和 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 min 都可降低接触的比接触电阻, 而 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 min 退火对 ρ_c 的改善效果更明显, 可降到 $10^{-3} \sim 10^{-2}\text{ } \Omega\text{cm}^2$ 之间; n 型金属接触不用经过退火处理就已是良好的欧姆接触, ρ_c 约为 $10^{-5}\text{ } \Omega\text{cm}^2$ 量级, $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 min 退火不会明显改变接触的性能, 而 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 min 及更高温度长时间退火则会恶化接触性能。所以对短波器件, 为提高电极接触质量可以进行 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 min 退火, 或者对 p 型和 n 型金属接触分别处理, 对 p 型金属接触进行 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 min 退火, 而 n 型金属接触不进行热处理。

对于 p 型中波碲镉汞, Sn/Au 接触经过 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min 和 30 min 退火以及 $155\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min 退火都可以降低平均比接触电阻三个量级, 而 $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火降幅最大, 但是其线性比 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火条件要差且其在零偏压附近的比接触电阻稍大于 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min 退火; 此外, 实验发现 Sn/Au 相比 Cr/Au 更适合作为中波 HgCdTe 的接触金属。所以, 中波器件应采用 Sn/Au 作为接触金属, 且由于焦平面器件大都工作在零偏压附近, 因而为改善 p 型金属接触可进行

125 °C, 10 min 退火处理,同时该退火处理又不会对 n 型区的欧姆接触造成负面影响。

参考文献:

- [1] Spicer W E, Friedman D J, Carey G P. The electrical properties of metallic contacts on $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. J. Vac. Sci. Technol. ,1988, A6:2746.
- [2] Hu Xiaoning. The study of HgCdTe MS interface. The doctoral dissertation in shanghai institute of technical physics [D]. Shanghai; Chinese Academy of Science, 1999. (in Chinese)
胡晓宁. 碲镉汞的 MS 界面研究[D]. 中科院上海技术物理研究所, 1999.
- [3] D K Schroder. Semiconductor material and device characterization [M]. 2nd Edition. John Wiley & Sons, 1998: 139.
- [4] S S Cohen. Contact resistance and methods for its determination [J]. Thin Solid Films, 1983, 104:361.
- [5] H Murrmann, D Widmann. Current crowding on metal contacts to planar devices [J]. IEEE Trans. Electron Dev. ,1969, ED-6:1022.
- [6] H H Berger. Models for contacts to planar devices [J]. Solid-State Electron. ,1972, 15:145.
- [7] G K Reeves, H B Harrison. Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements [J]. IEEE Electron Dev. Lett. ,1982, ED-3(5):111.
- [8] L O Bubulac, Defects. Diffusion and activation in ion implanted HgCdTe [J]. J. Crystal Growth, 1988, 86:723.
- [9] J C Campbell, S Demiguel, Feng Ma, et al. Recent advances in avalanche photodiodes [J]. IEEE J. Sel. Top. Quant. ,2004, 10(4):777.
- [10] Patrick W. Leech. The specific contact resistance of ohmic contacts to $\text{HgTe}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ heterostructures [J]. J. Appl. Phys. ,1990, 68:907.
- [11] H Zimmermann, Robert C Keller, P Meisen, et al. Seelmann-eggebert. Interface formation between deposited Sn and $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ [J]. J. Electron. Mater. , 1996, 25: 1293.
- [12] Patrick W Leech, Geoffrey K Reeves. Specific contact resistance of Indium ohmic contacts to n-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. J. Vac. Sci. Technol. ,1992, A10:105.