

文章编号:1001-9014(2012)01-0015-06

## As 掺杂碲镉汞富碲液相外延材料特性的研究

仇光寅, 张传杰, 魏彦锋, 陈晓静, 徐庆庆, 杨建荣  
(中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

**摘要:**对富碲液相外延 As 掺杂碲镉汞(HgCdTe)材料的研究发现,其电学性能存在着不稳定性,材料霍尔参数的实验数据与均匀材料的理论计算结果也不能很好的吻合.通过采用剥层变温霍尔测量和二次离子质谱(SIMS)测试对材料纵向均匀性进行检测的结果显示,外延材料中的 As 在高温富汞激活退火过程中具有向材料表面扩散的效应,导致在表面形成了高于主体层浓度 1~2 个量级的高浓度表面层,并导致了  $As_{Te}$  受主的浓度在 HgCdTe 薄膜中呈非均匀分布.考虑这一效应并采用双层模型的霍尔参数计算方法后,As 掺杂 HgCdTe 液相外延材料的电学行为得到了较好的解释,并较为准确地获得了退火后材料表面层与主体层的受主浓度及受主能级等电学参数.

**关键词:**碲镉汞;霍尔效应;As 掺杂;激活退火;双层模型  
**中图分类号:** O484.4 **文献标识码:** A

## As-doped HgCdTe films grown by Te-rich LPE

QIU Guang-Yin, ZHANG Chuan-Jie, WEI Yan-Feng, CHEN Xiao-Jing,  
XU Qing-Qing, YANG Jian-Rong  
(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The properties of As-doped HgCdTe epilayers grown by Te-rich LPE were investigated. The Hall measurements showed that the electrical parameters varied greatly with the samples even though they were grown under the same conditions. If the epilayers are assumed homogeneous, Hall parameters cannot be interpreted well theoretically. By using the secondary ion mass spectrometry (SIMS) and temperature dependent Hall measurements, the accumulation of arsenic atoms was observed on the surface of the HgCdTe epilayers after the Hg-rich activation annealing at high temperature. The arsenic atom concentration of the accumulation layer is 1~2 orders of magnitude higher than that inside, which introduced a non-uniform distribution of acceptor  $As_{Te}$  in HgCdTe epilayer. Based on the characteristic of arsenic atom distribution, a simplified double layer model was applied to describe the distribution of the acceptor in HgCdTe epilayer. Hall parameters of the epilayers can be explained well by using the above method. The concentration and activation energy of acceptor are obtained.

**Key words:** HgCdTe; Hall Effect; As-doped; activation annealing; layer model  
**PACS:** 73.61. Ga

### 引言

碲镉汞(HgCdTe)红外探测器通常的工作温度在 80 K 附近,低温工作的特点制约着该探测器的应用.与此同时,人们也在积极探索高工作温度 HgCdTe 红外探测器的制备技术,这一技术已经成为第 3 代 HgCdTe 红外焦平面探测技术发展的一项重要内容.高工作温度的 HgCdTe 红外焦平面探测器

大都基于  $n^+ - \pi$  型器件结构,这里的  $\pi$  代表弱 P 型掺杂材料,而弱 P 型掺杂恰恰是 HgCdTe 材料制备的难点.P 型 HgCdTe 材料大致可以分为两类,一类是利用材料中的 Hg 空位作为受主,载流子(空穴)浓度通常大于  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,由于 Hg 空位的不稳定性,很难获得低掺杂浓度的 Hg 空位型材料.第二类 P 型 HgCdTe 材料是掺杂型的,可以通过掺入 Au, Ag, Cu, As 等元素来实现<sup>[1]</sup>,其中,As 被认为是一种

收稿日期:2011-04-21,修回日期:2011-12-18

Received date: 2011-04-21, revised date: 2011-12-18

基金项目:国家自然科学基金(60876012),上海市自然科学基金(10ZR1434400)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(60876012); Natural Science Foundation of Shanghai(10ZR1434400)

作者简介:仇光寅(1986-),男,博士生,主要从事 HgCdTe 薄膜材料生长工艺及性质研究,E-mail:qiuguangyin@sina.com.

优良的、稳定的掺杂剂。As 掺杂可以有多种方式,比如,分子束外延(MBE)原位掺杂<sup>[2]</sup>,富 Hg 液相外延<sup>[1]</sup>,As 离子注入<sup>[3]</sup>等。但是,利用以上这些技术来获得低至  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  受主浓度的 As 掺杂材料,在工艺的控制上具有一定的难度。

2005 年,美国 DRS 的研究人员率先报道了利用富碲液相外延制备弱 P 型 As 掺杂 HgCdTe 材料<sup>[4]</sup>,他们发现,As 原子在富碲生长溶液中的分凝系数只有  $10^{-5}$ ,这一特性使得富碲液相外延具有先天的优势来获得极低 As 掺杂浓度的 P 型材料。但是,随着研究的深入,也发现该工艺所制备的材料电学参数并不稳定,相近工艺条件下所获得的材料的电学参数波动较大,这一问题的存在制约了该技术的进一步发展。相比之下,采用 As 离子注入工艺制备的  $n^+ - \pi - p^+$  型器件则在近期取得了较好的进展,在器件性能参数相同的条件下,器件工作温度被提高了  $40 \sim 50 \text{ K}$ <sup>[5]</sup>。

本文就 HgCdTe 富碲液相外延 As 掺杂材料的电学性能的不稳定性,材料的制备工艺和材料性能进行了深入研究。结果发现,材料电学性能的不稳定是 As 掺杂原子在高温热处理过程中的异常扩散造成的。所谓异常扩散,指的是生长过程中原本在薄膜材料中均匀分布的 As 原子,在后续的高温退火处理中向表面聚集,在表面形成 As 的富集层,这一富集层中的 As 原子浓度以及富集层的厚度与退火条件有关,在测量材料的电学参数时,如果忽视了这一现象,所得到的电学参数会有较大的波动。考虑到 As 原子的表面富集现象,我们采用更符合实际的双层载流子分布模型对材料的电学性质进行了模拟计算,结果与实验测量参数吻合得较好。

## 1 实验

As 掺杂  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的生长采用了富碲垂直浸渍式液相外延技术。所用衬底为(111)取向的 B 面 CdZnTe 衬底,生长温度为  $460^\circ\text{C}$  左右,其 Cd 组分  $x$  在 0.23 左右,薄膜厚度为  $10 \sim 15 \mu\text{m}$ ,As 掺杂是通过在生长溶液中直接加入单质 As 来实现的。在原生的 HgCdTe 薄膜中,As 通常处于原子间隙位置或者 Hg 原子的位置,并不表现受主特性,需要通过在富汞气氛中进行高温热处理才能使 As 占据 Te 位成为受主<sup>[6]</sup>。在本项研究中,所采用的热处理条件是:首先进行  $10 \sim 20$  小时的  $400^\circ\text{C}$  富汞高温退火来激活 As 使之成为受主,然后对样品进行 48 小时  $250^\circ\text{C}$  的低温退火来消除材料中的汞空位。

As 掺杂碲镉汞外延材料电学性能的测量采用范德堡法的霍尔测试技术,测量的温度范围为  $20 \sim 300 \text{ K}$ ,所用的磁感应强度为  $0.2 \text{ T}$ 。本实验中,用于霍尔测量的样品均为  $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  的正方形样品,在四个角上用 In 球制作引出电极,电极尺寸小于  $1 \text{ mm}$ ,电极位置尽量靠样品边缘,以满足范德堡法的测试要求,减小测量误差。样品在测量前采用 2% 的溴甲醇溶液进行腐蚀,腐蚀时间在  $10 \text{ s}$  左右,去除的表面层厚度在  $0.3 \mu\text{m}$  左右,以消除可能受环境和热处理工艺影响的表面层对材料整体性能的影响。为研究外延材料电学性能的纵向均匀性,同样采用 2% 的溴甲醇溶液对样品进行腐蚀减薄,然后再测量外延材料的剥层霍尔参数。外延层的厚度用红外傅里叶光谱仪进行测量,并由公式  $d = 1/2n\Delta v$  确定,式中  $\Delta v$  和  $n$  分别为光谱干涉条纹的间距和材料折射率,对于组分为 0.23 的碲镉汞材料,折射率  $n$  为 3.5。

外延材料中的 As 掺杂原子浓度通过二次离子质谱(SIMS)来测定。实验中采用  $\text{MCs}^+$  探测技术,即采用  $\text{Cs}^+$  轰击 HgCdTe 材料,探测被轰击出的 M 原子和  $\text{Cs}^+$  复合物  $\text{MCs}^+$ ,该技术能有效地抑制背景干扰,将 As 原子的探测灵敏度提高到了  $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[7]</sup>,测量在 Evans Analytical Group (EAG) 实验室完成,设备为 SIMS-CAMECA IMS 6F。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料电学性能的测量和分析

通过对组分为 0.23 且已经激活退火的 As 掺杂富碲液相外延材料在液氮 ( $77 \text{ K}$ ) 温度下的霍尔浓度的检测发现,该参数波动相当大,部分材料的霍尔系数还呈现  $n$  型,其原因之一是富碲液相外延 As 掺杂材料的掺杂浓度较低(一般在低的  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ),在液氮 ( $77 \text{ K}$ ) 温度下正好处于电子和空穴混合导电区,通过对材料霍尔参数进行变温测量,大多数材料要到  $50 \text{ K}$  才能呈现空穴导电为主的特性(见图 1(a))。为此,对 As 掺杂的外延材料的变温霍尔参数进行了跟踪测量,图 1(b) 列出了材料在  $50 \text{ K}$  温度下已进入空穴导电后的霍尔浓度,对于电学性能均匀的材料,霍尔浓度  $n_H$  可通过公式:

$$n_H = \frac{1}{R_H q} \quad (1)$$

计算获得,其中  $R_H$  为实验所测霍尔系数, $q$  为电子电量。此时的霍尔浓度近似等于材料的受主浓度,结果显示,材料的受主浓度仍然在  $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  之

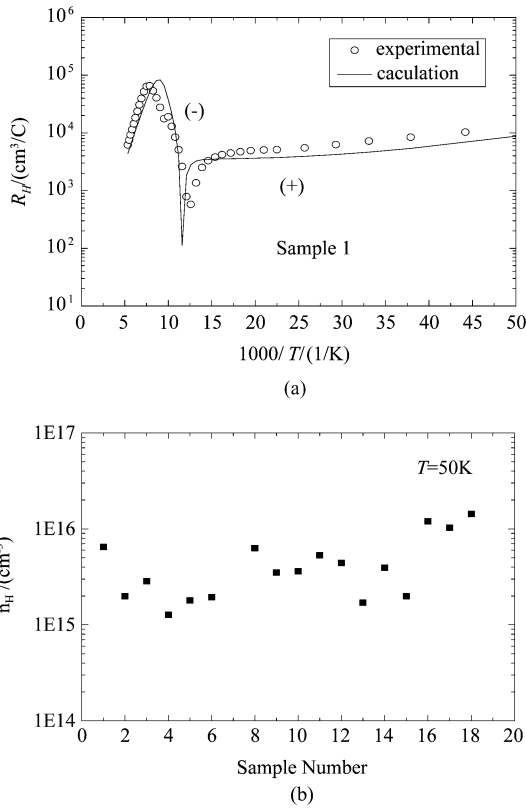


图1 经过退火的As掺杂外延材料的霍尔测试结果  
Fig. 1 The temperature-dependent Hall measurements of As-doped HgCdTe epilayer after annealing

间有较大幅度的波动,相差近一个量级,这些材料的生长参数基本相同,甚至是同批次生长和热处理的材料,其电学参数也存在较大的差异.

假定As掺杂材料的电学性能是均匀的,材料的空穴浓度 $p$ 由电中性条件决定:

$$p + N_D^+ = n + N_A^- \quad (2)$$

其中 $N_D^+$ 是电离施主浓度,由于施主能级在HgCdTe中为浅能级,可认为全部电离,因此 $N_D^+$ 可用施主浓度 $N_D$ 代替. $n$ 为电子浓度, $N_A^-$ 是电离受主浓度,由下式给出<sup>[8]</sup>:

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right)} = \frac{N_A}{1 + \frac{p}{gN_v} \exp\left(\frac{E_A}{kT}\right)} \quad (3)$$

$$N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

式中 $N_A$ 为受主浓度, $E_A$ 是受主能级, $E_F$ 为费米能级, $N_v$ 为价带有效态密度, $g$ 为基态简并度,通常取为4, $k$ 为波尔兹曼常数, $T$ 为温度. $m_h^*$ 为空穴有效质量,在本文中取为 $0.55 m_e^{[8]}$ , $m_e$ 为静态电子质量, $h$ 是普朗克常数.本征载流子浓度 $n_i$ 及禁带宽度 $E_g$

由下式给出:

$$n_i = [5.585 - 3.820x + 1.753 \times 10^{-3}T - 1.364 \times 10^{-3}x \times T] \times [10^{14} E_g^{\frac{3}{4}} T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)] \quad (5)$$

$$E_g = -0.25 + 1.59x + 5.233 \times 10^{-4} \times T \times (1 - 2.08x) + 0.327x^3 \quad (6)$$

其中, $x$ 为HgCdTe中Cd的组分值.

在非简并条件下,本征载流子浓度 $n_i$ 与 $p$ 、 $n$ 满足关系式:

$$p \cdot n = n_i^2 \quad (7)$$

电中性方程(1)可改写为:

$$p + N_D = \frac{n_i^2}{p} + \frac{N_A}{1 + \frac{p}{gN_v} \exp\left(\frac{E_A}{kT}\right)} \quad (8)$$

当半导体中同时有两种载流子参与导电时,材料的霍尔系数 $R_H$ 可表示为:

$$R_H = \frac{1}{q} \frac{(p - nb^2)}{(p + nb)^2} \quad (9)$$

式中 $q$ 为电子电量, $b$ 是电子与空穴迁移率之比,将 $E_A$ 、 $N_A$ 、 $N_D$ 、 $b$ 作为可调的拟合参数,在合理的范围,联合式(5)~(9),可以对实验数据进行拟合,可以得到材料的电学参数.

对实验测量获得的变温曲线进行拟合计算的结果则显示,理论计算拟合的结果与实验数据相差较大(见图1(a)),在低温区( $<100$  K)这种差别更为明显.富碲液相外延的As掺杂碲镉汞材料电学参数的不稳定性和电学参数与均匀材料的理论拟合计算结果的不一致性表明,这类材料和普通的汞空位p型材料有着较大的区别,因此,有必要对其内在的特性进一步做深入的分析.

## 2.2 材料均匀性的检测和分析

为进一步对材料的内在特性进行分析和研究,首先对材料电学参数的纵向均匀性进行了测试分析.在实验上,采用化学腐蚀的方法对样品进行逐层腐蚀,然后对外延材料的霍尔参数进行跟踪测量.图2给出了一个典型的测试结果,图中的三条曲线代表外延层的霍尔变温曲线随厚度变化的情况.结果显示,减薄后,霍尔系数有着显著的变化.这一实验现象表明,经过高温退火,HgCdTe外延材料中受主浓度在纵向上的分布是不均匀的.实验中,HgCdTe外延薄膜材料厚度在 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ ,所有被测量样品均呈现霍尔参数随厚度变化的现象.

在碲镉汞外延材料制备的常规工艺中,考虑到表面易受环境和热处理工艺的影响,材料在进行霍尔测量之间通常用2%的溴甲醇来腐蚀表面,腐蚀

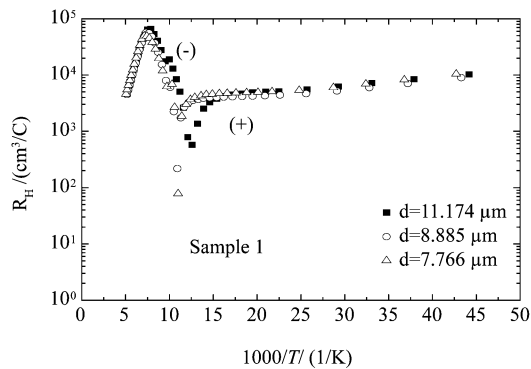


图2 退火后 HgCdTe 薄膜剥层霍尔测试结果  
Fig.2 The temperature-dependent Hall measurements of etched As-doped HgCdTe epilayers after annealing

时间一般在 10 s 左右,去除的表面层厚度在  $0.3 \mu\text{m}$  左右,由于该工艺步骤不作严格控制,所去除的材料表面层存在一定的波动. As 掺杂外延材料受主浓度的不均匀性和表面层去除厚度的波动均会导致其导电性质的变化,进而导致其霍尔参数出现波动.

为进一步揭示 As 掺杂碲镉汞外延材料纵向电学性能不均匀的起因,我们采用二次离子质谱 (SIMS) 技术对 5 组样品的 As 原子含量纵向分布进行了测量,5 组样品的测试结果是一致的,图 3 给出了其中一组样品的测试结果,两个样品是从同一片材料上切割下来的,图 3(a) 是未经高温激活退火的样品的测量结果,图 3(b) 为高温退火处理后的测量结果. 结果显示,退火前 As 在富碲液相外延 HgCdTe 材料中的浓度较低,大约在低的  $10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,并且分布均匀. 经过高温退火后,在距离表面  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  的表层内,As 的浓度明显增高,表面浓度接近  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ,而在  $2 \mu\text{m}$  表层的内部,As 的浓度仍为低的  $10^{15} \text{cm}^{-3}$ .

比较两图可以看出,在富汞高温退火过程中,As 原子在碲镉汞材料中的分布发生了变化,部分 As 原子向外延表面扩散,导致表面层 As 原子浓度大幅度增加. 在外延层的另一边(衬底和外延层界面),As 原子并不存在富集现象. As 在 HgCdTe 外延材料表面富集的现象有别于通常意义下的扩散,浓度梯度驱动的扩散总是使得某种原子的分布由不均匀转向均匀,而在本实验中,As 原子却由均匀分布转向了非均匀分布. 在以往的研究中,杂质原子或缺陷向表面扩散的现象是存在的,如 Si 材料的表面吸杂效应,它利用表面损伤形成的缺陷为杂质迁移提供低能量状态,使体内杂质获得向表面层扩散的驱动力;王珏利用这一效应实现了碲镉汞材料的表面

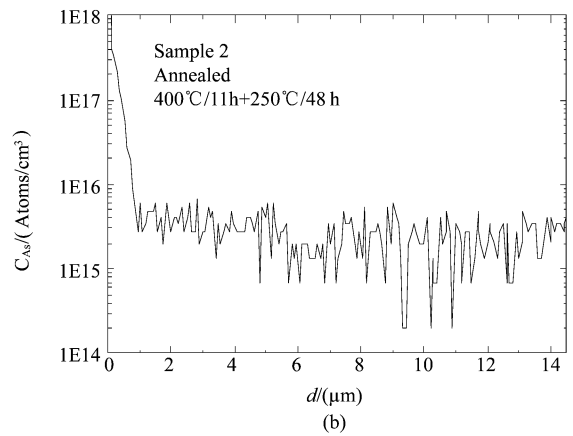
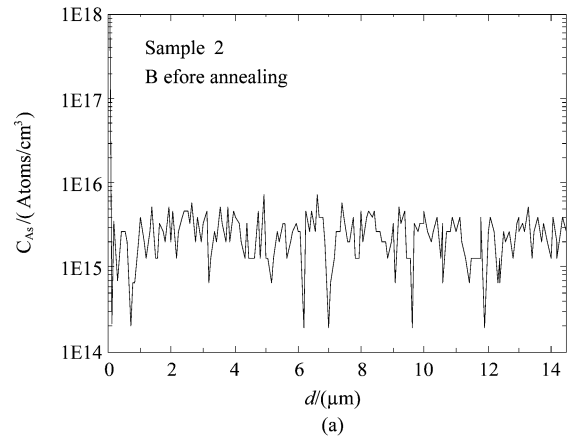


图3 退火前 (a) 与退火后 (b) As 掺杂 HgCdTe 液相外延材料 SIMS 结果  
Fig.3 As in As-doped HgCdTe epilayer determined by SIMS (a) before and (b) after annealing

吸杂<sup>[9]</sup>. 但是,本实验中的样品由液相外延方法生长,在生长以及退火过程中并没有人为的损伤,表面损伤的可能性较小. 还有一种可能的原因是,在高温富汞退火过程中,碲镉汞材料中的 Hg 空位和 Te 空位可能呈现不均匀分布,由于退火系统中没有碲的分压,碲镉汞表面的 Te 空位浓度会很高,As 原子向这些 Te 空位扩散并形成  $\text{As}_{\text{Te}}$  受主缺陷的可能性也是存在的. 究竟何种原因导致 As 原子在高温富汞退火工艺中向表面扩散还有待进一步研究.

### 2.3 非均匀材料电学参数的拟合计算

高温退火导致碲镉汞液相外延材料中的 As 掺杂原子呈不均匀分布,结果造成材料的电学性能在纵向呈不均匀分布. 对于这样的非均匀材料,显然不能用单层模型来很好地拟合材料的霍尔参数. 由 SIMS 结果可知,As 在 HgCdTe 中表面层的浓度比较高,而底层仍为浓度比较稳定的掺杂层. 针对此分布特征,采用双层模型理论应当可以较好拟合霍尔参数的实验测量结果.

双层模型的材料电导  $\sigma$  及霍尔系数  $R_H$  计算公式为<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned}\sigma_b &= \sum_k q n_{bk} \mu_{bk}, \\ \sigma_s &= \sum_k q n_{sk} \mu_{sk}, \\ R_b &= \frac{\sum_k q_k n_{bk} \mu_{bk}}{\sigma_b^2}, \\ R_s &= \frac{\sum_k q_k n_{sk} \mu_{sk}}{\sigma_s^2},\end{aligned}\quad (10)$$

$$\sigma = \left(\frac{d_b}{d}\right)\sigma_b + \left(\frac{d_s}{d}\right)\sigma_s, \quad (11)$$

$$R_H = R_b \left(\frac{d_b}{d}\right) \left(\frac{\sigma_b}{\sigma}\right)^2 + R_s \left(\frac{d_s}{d}\right) \left(\frac{\sigma_s}{\sigma}\right)^2. \quad (12)$$

其中  $\sigma_b, \sigma_s$  为各层的电导,  $n_{sk}, n_{bk}$  为相应各层的载流子(电子和空穴)浓度, 其值由式(2)~(8)可得,  $k$  表示不同种类的载流子(电子或空穴).  $\mu_{sk}, \mu_{bk}$  为相应各层载流子的迁移率,  $R_s, R_b$  为各层的霍尔系数,  $q_k$  为电量: 其中电子为  $-q$ , 空穴为  $q$ ,  $d_s, d_b$  为相应各层的厚度. 按 L. F. Loue 和 W. H. Frye 总结的经验公式<sup>[10]</sup>, 低温区的电子迁移率基本是一个常数, 而在高温区, 电子迁移率随着  $T^{-1.9}$  变化, 即:

$$\mu_e = \mu_0(x) \left(\frac{T}{300}\right)^{-1.9}, \quad (13)$$

其中  $\mu_0$  由下式<sup>[11]</sup>给出:

$$\mu_0(x) = \frac{10000}{8.754x - 1.044}, \quad (14)$$

空穴迁移率  $\mu_h$  为:

$$\mu_h = \frac{\mu_e}{b}, \quad (15)$$

根据公式(10)~(15)即可对霍尔参数的实验曲线进行理论拟合.

针对退火后 As 掺杂 HgCdTe 样品, 假设表面层为浓度分布均匀的高浓度 As 掺杂层, 其受主浓度和厚度分别为  $N_{As}$  和  $d_s$ , 底层为均匀分布的低浓度 As 掺杂主体层, 受主浓度和厚度分别为  $N_{Ab}$  和  $(d - d_s)$ , 剩余施主浓度  $N_D$  在表面层和主体层中没有区别, 并且不考虑载流子迁移率与载流子浓度的关系, 在此假设的基础上, 认为表面层和主体层载流子迁移率的比值  $b$  也是没有区别的. 通过调节拟合参数  $b, N_{As}, N_{Ab}, d_s, N_D$  和  $E_A$ , 获得的霍尔系数理论拟合曲线如图 4 所示, 拟合参数见表 1.

图中空心点为实验数据, 实线为拟合曲线. 可以看到, 采用双层模型后, 理论拟合曲线可与实验数据

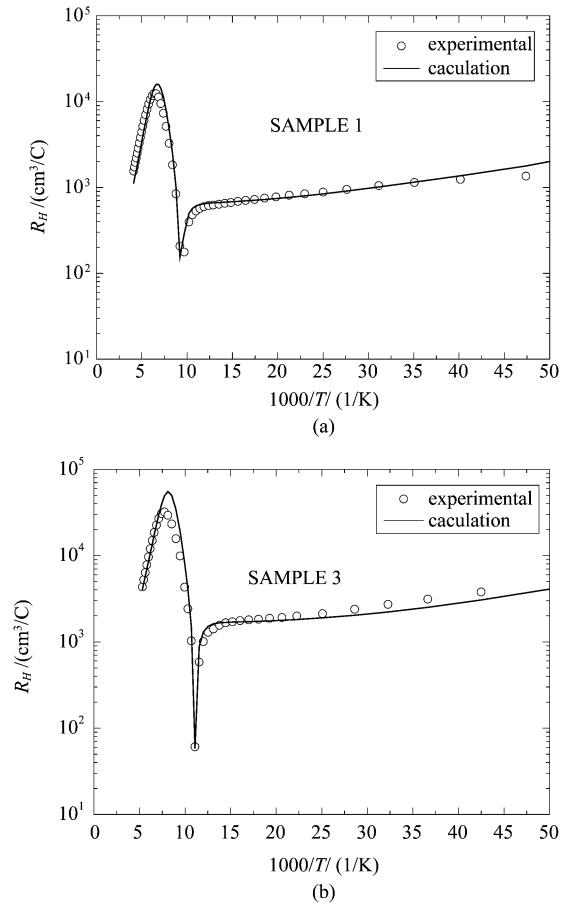


图 4 理论拟合和实验霍尔系数与温度( $1000/T$ )的关系  
Fig. 4 Hall coefficients of theoretical calculation and experimental data vs. reciprocal temperature for two layers (a) sample 1 (b) sample 3

符合的较好. 由霍尔参数拟合得到的表面层受主浓度和 SIMS 测量所得到的 As 掺杂原子浓度基本上是吻合的, 表面层厚度也在合理的范围内, 受主能级在 8 meV 左右, 为浅能级受主, 与 As 掺杂原子形成的  $As_{Te}$  受主能级相吻合<sup>[12]</sup>.

上述研究表明, 经过高温退火, 富碲液相外延 HgCdTe 薄膜中的 As 扩散至薄膜的表面 1-2  $\mu\text{m}$  处, 形成了高浓度 ( $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 的表面层与低浓度 ( $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) 的主体层. 值得指出的是, 图中拟合数据与实验数据并非完全符合, 在极低温区和高温区差异较大, 这可能是由于所采用的模型导致的. 在我们的模型中, 假设每层中 As 的浓度是均匀的, 而实际上是呈梯度分布, 模型的精度还可做进一步改进.

### 3 结论

经高温激活退火后的碲镉汞 As 掺杂富碲液相

表 1 As 掺杂富碲液相外延碲镉汞材料霍尔系数拟合所获得的材料性能参数

Table 1 Summary of fitting parameters for the annealed As-doped HgCdTe grown from Te-rich LPE

Number	$x$	$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$b$	$N_{As}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$N_{Ab}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$N_D$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$E_A$ (meV)
Sample 1	0.2325	11.174	1.1	190	$2 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{15}$	$5.9 \times 10^{14}$	9
Sample 3	0.2294	14.83	1.25	103	$1 \times 10^{17}$	$2.3 \times 10^{15}$	$5 \times 10^{14}$	7.2
Sample 4	0.2282	10.08	1.15	136	$3 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{15}$	$5 \times 10^{14}$	7.5
Sample 5	0.2430	10.248	1	105	$6.3 \times 10^{16}$	$2.4 \times 10^{15}$	$4.8 \times 10^{14}$	7.5
Sample 6	0.2251	14.883	1.1	110	$3.3 \times 10^{16}$	$1.2 \times 10^{15}$	$4 \times 10^{14}$	8.2
Sample 7	0.2250	13	1.12	280	$4 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{15}$	$5.2 \times 10^{14}$	7.8

外延材料存在着纵向不均匀性,碲镉汞外延材料中的 As 原子在热处理过程中出现了异常扩散效应,部分原本分布均匀的 As 原子扩散到了外延材料的表面,形成了厚度为  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  左右的高浓度表面层. 因受工艺条件和被测样品表面处理条件的影响,造成不同批次材料的霍尔参数出现较大的不稳定性,何种因素(表面缺陷、高浓度 Te 空位还是其它因素)导致 As 原子发生异常扩散还有待进一步确定. 基于二次离子质谱获得的 As 原子浓度分布,并假定材料的受主浓度与 As 原子浓度之间具有相关性,材料的电学性能可近似采用双层材料模型来描述,对材料霍尔参数的拟合结果也证实了这一点. 根据拟合结果, HgCdTe 外延薄膜表面层中的 As 原子浓度在  $10^{16} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$  左右,而材料内部仍为均匀分布的低浓度 ( $\sim 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ) As 掺杂材料, As 掺杂原子的受主能级为  $7 \sim 8 \text{meV}$ . 外延材料中 As 掺杂原子的非均匀分布对材料的电学性能和在红外焦平面探测器制备工艺中的应用均有着重要的影响.

## REFERENCES

- [1] Kalisher M H. The Behavior of Doped  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  Epitaxial Layers Grown from Hg-rich Melts[J]. *J. Crystal Growth*, 1984, **70**(1-2):365-372.
- [2] Shin S, Arias J M, Zandian M, et al. Enhanced Arsenic Diffusion and Activation in HgCdTe[J]. *J. Electron. Mater.*, 1995, **24**(5):609-615.
- [3] Bubulac L O, Viswanathan C R. Diffusion of As and Sb in HgCdTe[J]. *J. Crystal Growth*, 1992, **123**(3-4):555-566.
- [4] Chandra D, Weirauch D F, Schaake H F, et al. Growth of Very Low Arsenic-doped HgCdTe[J]. *J. Electron. Mater.*, 2005, **34**(6):963-967.
- [5] Velicu S, Grein C H, Emelie P Y, et al. MWIR and LWIR HgCdTe Infrared Detectors Operated with Reduced Cooling Requirements[J]. *J. Electron. Mater.*, 2010, **39**(7):873-881.
- [6] Chandra D, Schaake H F, Kinch M A, et al. Activation of Arsenic as an Acceptor in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  under Equilibrium Conditions[J]. *J. Electron. Mater.*, 2002, **31**(7):715-719.
- [7] Larry Wang, Lily H. Zhang, Jun Li. New Techniques in SIMS Analysis of HgCdTe Materials[J]. *J. Electron. Mater.*, 1999, **28**(6):793-798.
- [8] Hansen G L, Schmit J L, Casselman T N. Energy Gap versus Alloy Composition and Temperature in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**(10):7009-7101.
- [9] Wang Jue. The Influence of Impurities and Defects on physical Properties of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  Crystal and the Control Methods[D]. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences(王珏, 博士论文, 中科院上海技术物理研究所), 1989, **67**.
- [10] Lou L F, Frye W H. Hall Effect and Resistivity in Liquid-Phase-Epitaxial Layers of HgCdTe[J]. *J. Appl. Phys.*, 1984, **56**(8):2253-2267.
- [11] Higgins W M, Pultz G N, Roy R G, et al. Standard Relationships in the Properties of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1989, **7**(2):271-275.
- [12] Shi X H, Rujirawat S, Ashokan R, et al. Ionization Energy of Acceptors in As-doped HgCdTe Grown by Molecular Beam Epitaxy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(5):638-640.