

文章编号: 1672-8785(2012)04-0001-06

掺砷碲镉汞的研究进展

张小华 褚君浩

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

摘 要: 掺砷碲镉汞是一种用于制作 p-on-n 器件和实现高性能碲镉汞探测器及多色红外焦平面阵列的关键材料。对掺砷碲镉汞的相关文献进行了归纳分析。砷激活效率与退火条件及砷的浓度直接相关。对于掺砷浓度在 $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 范围内的碲镉汞, 通过 $300^\circ\text{C}/16 \text{ h}$ 和 $240^\circ\text{C}/48 \text{ h}$ 两步退火可将样品前表面激活为 p 型材料, 但汞空位的浓度相对于背面较高。样品背面靠近衬底处可能存在 As_{Te} 和 As_{Hg} 缺陷。

关键词: 砷; 碲镉汞; 掺杂浓度; 激活; 缺陷

中图分类号: N8 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.04.001

Advances in Study of Arsenic Doped HgCdTe

ZHANG Xiao-hua, CHU Jun-hao

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

Abstract: Arsenic doped HgCdTe is the key material in the development of infrared devices including high performance infrared detectors, infrared focal plane arrays and p-on-n heterojunctions. In this work, references about arsenic doped HgCdTe are summarized. The activation of As is related to the annealing condition and dopant concentrations. For doping concentrations in the range of $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, although a two-step annealing process can activate the As on the frontside of HgCdTe, the V_{Hg} concentration is higher relative to the backside of HgCdTe. There might exist As_{Te} and As_{Hg} in the space region close to the substrate.

Key words: arsenic; mercury cadmium telluride; dopant concentration; activation; defect

0 引言

碲镉汞 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) 是一种重要的红外探测材料^[1-3], 其禁带宽度可以随组分 x 的变化在 $0 \sim 1.65 \text{ eV}$ 范围内连续调节, 因而可实现对所有红外波段的探测。碲镉汞光伏探测器的基础是光电二极管, 即由 n 型和 p 型碲镉汞构成。碲镉汞材料的 n 型掺杂很容易实现。常用的镉掺杂原子的电激活率为 100%。而 p 型掺杂的实现却很困难。虽然掺入 I 族元素较易形成 p 型杂

质, 但是 I 族元素的扩散系数太大。近年来, 掺砷碲镉汞材料由于比同为 p 型材料的汞空位材料更稳定、少子寿命更高而受到广泛关注^[4-7]。

本文从掺砷碲镉汞的电学性质、红外调制光谱研究以及砷掺杂机理分析等几个方面介绍掺砷碲镉汞的研究进展。

1 掺砷碲镉汞的生长和电学性质

引入杂质可以通过多种手段来实现。其中, 在原材料中放入杂质是一种最基本的方法。目

收稿日期: 2012-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10927404; 61176075); 国家重点基础研究发展规划项目 (2007CB924902)

作者简介: 张小华 (1978-), 女, 江西上饶人, 博士研究生, 主要从事半导体的光电性质研究。E-mail: zhxh10@163.com

前, As 掺杂有原位掺杂和离子注入两种方式; 掺杂又可分为分子束外延掺杂和富碲或富汞液相外延掺杂两种。

分子束外延常用的 As 源有两种: 一种是 Cd_3As_2 源; 另一种是纯的 As 原子材料。As 在自然界中主要以四聚体的形式存在。Swartz C H 等人^[8]的研究结果表明, 在分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 生长的典型温度下, As_4 的粘滞系数低, 可以从碎裂源中用 As_2 来提高粘滞系数。

用 Hall 测量电学性质是评估碲镉汞质量和是否可复制技术之一, 它对于掺杂激活研究尤为重要。掺杂碲镉汞的电学性质已经得到较多报道^[9-20]。人们主要是用范德堡法测量样品的变温 Hall 效应, 得到样品的载流子浓度和迁移率等, 并由此了解 As 掺杂的激活率、退火条件 (温度、汞压)、导电类型和杂质能级等的。

Swartz C H 等人^[8]的研究结果表明, 大多数样品都存在 n 型层, 而且测得的 Hall 参数、载流子浓度和迁移率主要是由该 n 型层控制的, 这使得 As 掺杂 p 型碲镉汞的激活的解释变得更加复杂。而 Chandra D 等人^[16]测出大多数掺杂样品中并无 n 型层, 而只有在低 As 掺杂 p 型碲镉汞中有时才会有 n 型层。Schaake H F 等人^[20]认为 n 型转换到 p 型的退火中, 碲镉汞背面即靠近衬底的界面处的转换效率最低, 该层易形成 n 型界面。可以采用富 Te 退火并通过扩散分解这一层。

Edwall D 等人^[12]指出, As 激活效率与退火条件及样品组分有关, 并会随汞压的升高、退火温度的升高和时间的延长而得到提高。 $x = 0.6$ 时砷掺杂的激活效率比 x 值更低时的低。 As_2 及 As_4 源与 As 的激活似乎无关。Schaake H F 等人^[20]认为所需的退火时间随样品厚度的平方的增加而增长, 并且与砷的浓度直接相关。

Bubulac L O 等人发现中波红外碲镉汞砷激活的退火温度为 $425\text{ }^\circ\text{C}$ ^[21]。Lee T S 等人^[22]在各种退火温度和掺杂浓度下对用 MBE 法生长的掺杂碲镉汞进行了测试。当掺杂浓度小于 2×10^{18}

cm^{-3} 时, 在高于 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下进行退火后, 其激活率可以达到 100 %。当掺杂浓度大于 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 砷的激活率快速下降。占据 Te 位的砷浓度随砷浓度的增加而下降, 说明这个温度不足以断裂中性砷聚合体的键。在高浓度掺杂和在 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下退火时, 随着掺杂浓度的增加, 占据 Te 位的砷浓度一直保持为常数。Zandian M 等人^[23]发现通过 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 真空和富汞两步退火可以激活砷, 使材料变为 p 型材料。Boieriu P 等人^[7,24]认为低温的退火可以减少结构损坏。变温 Hall 测量结果表明, 当掺杂浓度低于 10^{16} cm^{-3} 时, 低温两步退火或高温退火都未将长波红外碲镉汞转变成 p 型, p 型激活被内部存在的 n 型杂质掩盖了。对于分子束外延掺杂碲镉汞, 人们难以实现低浓度掺杂^[25]。而对于液相外延掺杂碲镉汞, 要实现大于 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的掺杂浓度也很难。

Boieriu P 等人^[7,24]发现由 Hall 测得的 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 退火 MBE 碲镉汞的载流子浓度高于由二次质谱测得的砷原子浓度。这表示样品中存在不止一种受主, 而另外的受主可能是汞空位或汞空位的复合体。Selamet Y 等人^[26]对变温 Hall 数据进行了基于非抛物带凯恩模型的拟合。该模型假设样品中存在一个处于完全电离的施主浓度和两个独立的受主能级。由此得到两个受主能级: 一个为 As_{Te} 浅受主能级, 它在中波红外波段和长波红外波段均小于 10 meV ; 另一个为靠近禁带中间位置的汞空位深能级, 约为 $60 \sim 110 \text{ meV}$ 。他们认为随着受主浓度的升高, 受主能级会降低。由于砷掺杂样品具有电学补偿特性, 通过电学数据得到的杂质能级具有很大的不确定性。

2 掺杂碲镉汞的红外光谱研究进展

光谱可以提供半导体中的杂质和缺陷信息。它对样品制备的要求不高, 并且不会对样品造成破坏, 因而是用于测定半导体中杂质缺陷等材料特性的一种重要而强有力的工具。光致发光 (Photoluminescence, PL) 光谱信号的强弱在很大程度上是由其内部的复合机制决定的。窄禁带半导体 HgCdTe 的复合过程包含辐射复合和非

辐射复合过程。PL 过程直接对应于材料中的辐射复合过程。由于作为 HgCdTe 的非辐射复合过程之一的俄歇复合过程非常强烈, PL 信号非常微弱, 室温红外背景辐射比正常 PL 信号强 200 倍甚至更多。为了测量窄禁带半导体材料的 PL 信号, 测试过程中要利用锁相放大技术来对弱信号进行放大和检测。Reisinger A R 等人^[27]采用基于傅里叶变换红外连续扫描的相敏检测方法将 PL 信号从很强的背景热辐射中分离开来。由于傅里叶变换红外快速扫描方式本身存在局限性, 傅里叶变换频率与激发光调制频率无法截然分开, 使得其消除室温背景辐射干扰的能力有限, 所得 PL 光谱的信噪比较差。邵军等人^[28-29]开发了一种基于步进扫描傅里叶变换红外光谱仪的调制 PL 技术。该技术可以有效抑制室温背景辐射干扰, 放大微弱发光信号, 并可在保证光谱分辨率的基础上获得信噪比良好的 PL 光谱。

自 1972 年 Elliot C T 等人^[30]首次发现 HgCdTe 的 PL 以来, 人们已经采用基于连续扫描模式的傅里叶红外光谱仪对非故意掺杂 (汞空位) 的 HgCdTe 样品进行过 Cd 组分 $x=0.197$ 到 $x=1$ 范围内的 PL 测量^[31-36]。由于掺砷碲镉汞材料生长技术的不断成熟, 常勇等人^[37]对采用离子注入法制备的组分为 0.39 的掺砷碲镉汞 MBE 薄膜进行了 PL 研究。样品经 450 °C 退火和 400 °C 退火后, 他们发现样品为补偿材料, 且样品中的施主为 As_{Hg} , 能级为导带底 8.5 meV, 受主为 As_{Te} 和 V_{Hg} 。由于受实验条件的限制, PL 测量局限在 30 K 以下。越方禹等人利用步进模式的傅里叶光谱仪对组分为 0.3 左右的 MBE 原位掺砷碲镉汞薄膜进行了 PL 测量 (测量的温度在 100 K 以下)^[38-40]。他们认为原生掺砷碲镉汞中存在双深受主能级, 深能级可能与残存的 As_4 或 As_2 团簇相关。退火后的 p 型掺砷碲镉汞中仅存在砷占碲位杂质。实验分析认为 285 °C /16 h + 240 °C /48 h 两步退火能够完全将 As_{Hg} 激活为 As_{Te} 。400 °C 的高温退火会引进更多的汞空位, 降低样品质量。2009 年, 法国的 Robin I C 等人^[41]对组分为 0.3 的 MBE 掺砷碲镉汞进行

了 170 K 以下的 PL 测量。他们认为原生材料中存在 As_2Te_3 施主复合物和 $AsHg$ 受主复合物及高浓度的汞空位受主。经饱和汞压下的低温 200 °C /120 h 退火后, 材料中存在 As_2Te_3 施主复合物和 $AsHg$ 受主复合物。经饱和汞压下的 400 °C /1 h 退火后和低温 200 °C 退火后, 材料中的杂质为 As_{Hg} 受主复合物和 As_{Hg} 施主。

邵军等人对 MBE 掺砷碲镉汞进行了红外调制反射光谱和 PL 光谱测量^[42-47]。他们认为主要的 PR 特征峰的积分强度 I 与泵浦光功率 P 之间的关系可以被描述为 $I \propto P^k$ 。其中, k 对温度和泵浦功率敏感。在 11 K 或 77 K、150 K 相当高泵浦功率时, k 取值为 0.5; 在 77 K、150 K 低泵浦功率时, k 取值为 1。高功率明显增强了信号, 特别是当泵浦导致的过剩载流子浓度很明显时, PR 谱的信噪比得到了改善。对原生掺砷碲镉汞进行的 11 ~ 290 K 的光调制反射测量表明, 带边特征峰与 D-A、eA 及 De 跃迁有关。在 77 K 时, 施主和受主态的平均能量约为导带下 17 ± 1 meV、 27 ± 3 meV 和价带上 14 ± 1 meV, 分别对应于 As_{Hg} 、 Te_{Hg} 和 V_{Hg} 相关跃迁发光。对于深能级, 价带上 69 meV 的深能级被认为与二价汞空位受主有关, 导带下 42 meV 的深能级与砷聚合体 $[(As_{Hg}-As_i)_d]_3$ 跃迁相关。对经 300 °C /16 h 和 240 °C /48 h 的 MBE 退火样品进行了样品前面和背面辐照的对比光谱测量。结果表明, 样品背面靠近衬底处存在 As_{Te} 和 As_{Hg} 。样品前面充分激活 As 为 As_{Te} , 但汞空位的浓度相对较高。这些结果表明, 第一步的 300 °C /16 h 退火没能把至衬底附近的厚 8 μm 的 As 全部激活, 第二步的 240 °C /48 h 退火没有把前表面的汞空位降到相当低的浓度。

造成以上研究结果不同可能是因为他们采用的样品生长条件、实验测量条件以及测量前的处理方法不尽相同。

3 掺砷碲镉汞的机理分析

杂质特性的微观机理不仅能够揭示材料的各种现象背后的物理起源, 而且还能为材料的生长及相关测量提供理论支持。

As 掺杂可能形成的 As 缺陷^[18]包括 As_{Te} 、 As_{Hg} 、 $As_{Hg}-V_{Hg}$ 、 As_2 、 As_4 、 As_I (间隙)、 $As_{Te}-Te_{Hg}$ 、 $As_{Hg}-As_{Te}$ 、 As_I-As_{Te} 、 As_I-As_{Hg} 、 $As_{Te}-Hg_I$ 、 V_{Hg} 、 Hg_I 、 Te_{Hg} 、 $Te_{Hg}-V_{Hg}$ 、 V_{Te} 和 Te_I 等。人们对于 As 掺杂以什么形式存在于碲镉汞中有几种不同的看法^[19,48-51]。

Berding M A 等人^[18-19]从理论上讨论了 As 在 HgCdTe 中的行为。计算结果表明, As 掺杂生长时在低汞压下是高度补偿的, As_{Hg} 的浓度大于 As_{Te} 的浓度, 表明 As 更易于占领 Hg 位而形成施主。只有当汞压接近 10 atm 或更大时, As_{Te} 的浓度才会大于 As_{Hg} 的浓度。约 30% ~ 50% 的 As_{Hg} 被 V_{Hg} 束缚, 形成中性的复合体。 $As_{Hg}-V_{Hg}$ 的浓度略低于 As_{Hg} , 余下的 As_{Hg} 成为正电中心(为施主杂质)。所以在较低的 As 浓度下, 材料导电性为 Hg 空位型的 p 型半导体, 并带有 As_{Hg} 为施主的补偿杂质。在较高的 As 浓度下, 材料为 As_{Hg} 为施主的 n 型半导体。经高温真空和低温富汞两步退火后, 几乎 99% 甚至 100% 的 As 杂质占据了 Te 位, 成为受主。Berding M A 等人提出了一个退火模型: 第一步, Te 原子转移到阳离子空位, 形成 Te 反位 Te_{Hg} ; 第二步, As 原子转移到空出的 Te 空位, 形成 As_{Te} , 并留下汞空位; Te_{Hg} 与 V_{Hg} 形成复合体, 远离 As_{Te} 而去, 最终过饱和并扩散到表面消失或形成 Te 夹杂物。用液相外延法生长的 As 掺杂若采用富 Hg 溶液, 由于汞压高, As 易于占据 Te 位而形成受主杂质。若在富 Te 溶液中生长, 则 As 易于占据 Hg 位而形成施主杂质。他们认为在用 MBE 法生长的材料中, 包含不止一个 As 原子的缺陷复合物的密度非常低。因为当有阳离子空位存在时, As_M 是相对移动的, 任何 As 原子对将破裂成独立缺陷, 所以没必要用 As_2 和 As_4 来解释实验现象。

孙立忠等人^[48-49]采用类牛顿时力学方法和共轭梯度方法进行了弛豫。As 代替 Hg 会导致第一近邻阴离子向内收缩弛豫, 使得 As 杂质第一近邻 Te 原子和第二近邻阴离子之间的键长变长。砷杂质第一近邻的最近邻阳离子的不对称分

布, 导致 As 原子及第一近邻阴离子的对称性降低, 形成靠近导带的浅施主能级。As 代替 Te 会使得 As 与阳离子之间的键长变短, 形成靠近价带的浅受主能级。

段鹤等人^[50]根据第一性原理计算了 As、 As_2 和 As_4 在碲镉汞原生片中的稳定存在形式。根据缺陷形成能, As_4 最易形成 $[(As_{Hg}-As_I)_d]_3$, As_2 易形成 $(As_{Hg}-As_I)_d$, 单个的 As 易形成 As_{Hg} 。 $[(As_{Hg}-As_I)_d]_3$ 和 As_{Hg} 容易与最近邻的 V_{Hg} 形成 $[(As_{Hg}-As_I)_d]_3-V_{Hg}$ 和 $As_{Hg}-V_{Hg}$ 复合物。

Ballet P 等人^[51]发表了一个用 X 射线吸收精细结构分析对热退火激活的 As 位置转移的新看法。他们认为, 在 p 型激活退火前, 掺入的 As 原子有施主复合物 As_2Te_3 和受主复合物 As_{Hg} 两种结构。热激活前, 这两种形式的比例几乎相等。退火后, As_2Te_3 施主被分解, As_2Te_3 中的部分 As 被激活成 As_{Hg} 受主, 剩下的占据 Hg 位即 As_{Hg} 。As 作为 As_{Hg} 受主的比例是 75%, 作为 As_{Hg} 施主的比例为 25%, 从而形成 p 型。

目前人们普遍接受的是 Berding M A 等人的微观机理分析。很多实验现象都是以他们的微观机理来进行解释的。而 Ballet P 等人的分析或许能让人们从一个新的角度去考虑 As 杂质在碲镉汞中的形式。

4 结束语

掺砷碲镉汞是一种用于实现高性能碲镉汞探测器的关键材料。掺砷碲镉汞在掺杂过程中所采用的砷源和实际材料的生长环境会引入多种形式的杂质, 而且砷会与本征缺陷形成复合缺陷, 所以砷在碲镉汞中表现出非常复杂的行为。目前人们对该材料的特性得到了初步的实验结果, 但仍需要大量的实验和理论分析来为砷掺杂工艺提供信息和借鉴。

5 致谢

感谢中国科学院上海技术物理研究所邵军研究员所提供的指导和帮助。

参考文献

- [1] Zandian M, Chen A C, Edwall D D, et al. p-type Arsenic Doping of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ by Molecular Beam Epitaxy [J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**(19): 2815–2817.
- [2] Lindle J R, Bewley W W, Vurgaftman I, et al. HgCdTe Negative Luminescence Devices with High Internal and External Efficiencies in the Midinfrared [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(24): 191–193.
- [3] Hansen G L, Schmidt 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): 7099–7010.
- [4] Garland J W, Grein C H, Yang B, et al. Evidence That Arsenic is Incorporated as As_4 Molecules in the Molecular Beam Epitaxial Growth of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}:\text{As}$ [J]. *Appl Phys Lett*, 1999, **74**(14): 1975–1978.
- [5] Aqariden F, Shih H D, Kinch M A, et al. Electrical Properties of Low-arsenic-doped HgCdTe Grown by Molecular Beam Epitaxy [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, **78**(22): 3481–3483.
- [6] Ryu Y S, Heo Y B, Song B S, et al. Optical and Electrical Properties of in Situ-annealed p-type $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ Epilayers Grown on CdTe Buffer Layers for Applications as Infrared Detectors [J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **83**(18): 3776–3778.
- [7] Boieriu P, Grein C H, Jung H S, et al. Arsenic Activation in Molecular Beam Epitaxy Grown in situ Doped HgCdTe(211) [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(21): 61–63.
- [8] Swartz C H, Tompkins R P, Giles N C, et al. Fundamental Material Studies of Undoped, In-doped, and As-doped $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J Electronic Mat*, 2004, **33**(6): 728–736.
- [9] Boukerche M, Wijewarnasuriya P S, Sivananthan S, et al. The Doping of Mercury Cadmium Telluride Grown by Molecular-beam Epitaxy [J]. *J Vac Sci Technol A*, 1988, **6**(4): 2830–2833.
- [10] Almeida L A. Doping of Molecular Beam Epitaxy HgCdTe Using an Arsenic Cracker Source (As_2) [J]. *J Electronic Mat*, 2002, **31**(7): 660–663.
- [11] Aqariden F, Shih H D, Kinch M A, et al. Electrical Properties of Low-arsenic-doped HgCdTe Grown by Molecular Beam Epitaxy [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, **78**(22): 3481–3483.
- [12] Edwall D, Piquette E, Ellsworth J, et al. Molecular Beam Epitaxy Growth of High-quality Arsenic-doped HgCdTe [J]. *J Electronic Mat*, 2004, **33**(6): 752–756.
- [13] Grein C H, Garland J W, Sivananthan S, et al. Arsenic Incorporation in MBE Grown $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J Electronic Mat*, 1999, **28**(6): 789–792.
- [14] Schaake H F. Kinetics of Activation of Group V Impurities in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Alloys [J]. *J Appl Phys*, 2000, **88**(4): 1765–1770.
- [15] Wu J, Xu F F, Wu Y, et al. P-type Activation Research of As-doping in MBE HgCdTe Films [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2005, **24**(2): 81–83.
- [16] 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 Electronic Mat*, 2002, **31**(7): 715–719.
- [17] Chandra D, Schaake H F, Kinch M A. Low-temperature Annealing of (Hg,Cd)Te [J]. *J Electronic Mat*, 2003, **32**(7): 810–815.
- [18] Berding M A, Sher A, M. Van Schilfgaarde, et al. Modeling of Arsenic Activation in HgCdTe [J]. *J Electronic Mat*, 1998, **27**(6): 605–609.
- [19] Berding M A, Sher A. Arsenic Incorporation during MBE Growth of HgCdTe [J]. *Appl Phys Lett*, 1999, **74**(5): 685–687.
- [20] Schaake H F. On the Kinetics of the Activation of Arsenic as a p-type dopant in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J Electronic Mat*, 2001, **30**(6): 789–793.
- [21] Bubulac L O, Edwall D D, Wiswanathan C R. Dynamics of Arsenic Diffusion in Metalorganic Chemical Vapor-deposited HgCdTe on GaAs/Si Substrates [J]. *J Vac Sci Technol B*, 1991, **9**(3): 1695–1704.
- [22] Lee T S, Garland J, Grein C H, et al. Correlation of Arsenic Incorporation and Its Electrical Activation in MBE HgCdTe [J]. *J Electronic Mat*, 2000, **29**(6): 869–872.
- [23] Zandian M, Chen A C, Edwall D D, et al. p-type Arsenic Doping of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ by Molecular Beam Epitaxy [J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**(19): 2815–2817.
- [24] Boieriu P, Chen Y, Nathan V. Low-temperature Activation of As in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (211) Grown on Si by Molecular Beam Epitaxy [J]. *J Electronic Mat*, 2002, **31**(7): 694–698.
- [25] Priyalal S W, Emelie P Y, Arvind D S, et al. Nonequilibrium Operation of Arsenic Diffused Long-Wavelength Infrared HgCdTe Photodiodes [J]. *J Electronic Mat*, 2008, **37**(9): 1283–1290.
- [26] Selamet Y, Grein C, Sivananthan S. Electrical Properties of In-situ As doped $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Epilayers Grown by Molecular Beam Epitaxy [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2001, **19**(4): 1488–1491.

- [27] Reisinger A R, Roberts R N, Chinn S R, et al. Photoluminescence of Infrared-sensing Materials Using a FTIR Spectrometer [J]. *Rev Sci Instrum*, 1989, **60**(1): 82-86.
- [28] Shao J, Lu W, Xu L, et al. Modulated Photoluminescence Spectroscopy with a Step-scan Fouriertransform Infrared Spectrometer [J]. *Rev Sci Instrum*, 2006, **77**(6): 41-46.
- [29] Shao J, Yue F Y, Xu L, et al. Photomodulated Infrared Spectroscopy by a Step-scan Fourier Transform Infrared Spectrometer [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**(18): 211-213.
- [30] Elliott C T, Melngailis I, Harman T C, et al. Carrier Freeze-out and Acceptor Energies in p-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J Phys Chem Solids*, 1972, **33**(8): 1527.
- [31] Tamm J G, Herrmann K H, Yunovich A E. Infrared Photoluminescence in Narrow-Gap Semiconductors [J]. *Phys Stat Sol A*, 1990, **122**: 11-42.
- [32] Lusson A, Fuchs F, Marfaing Y. Systematic, Photoluminescence Study of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ Alloys in a Wide Composition Range [J]. *J Cryst Growth*, 1990, **101**(1): 673-677.
- [33] Bodart J R, Feldman B J. Saturation Effects in the Photoluminescence Spectra of $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ [J]. *Solid State Commun*, 1985, **54**(7): 579-580.
- [34] Polla D L, Aggarwal R L. Below Band-gap Photoluminescence of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *Appl Phys Lett*, 1984, **44**(8): 775-777.
- [35] Werner L, Tamm J W, Tilgner J, et al. Middle Infrared Photoluminescence (PL) in the $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J Cryst Growth*, 1990, **101**(1): 787-791.
- [36] Legros R, Triboult R. Photoluminescence of Cd-rich $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Alloys [J]. *J Cryst Growth*, 1985, **72**(1): 264-269.
- [37] Chang Y, Chu J H, Tang W G, et al. Photoluminescence Study on $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Thin-film Implanted with As Ion [J]. *Acta Physica Sinica (Overseas Edition)*, 1995, **4**(8): 606-611.
- [38] Yue F, Wu J, Chu J. Deep/Shallow Levels in Arsenic-doped HgCdTe Determined by Modulated Photoluminescence Spectra [J]. *App Phys Lett*, 2008, **93**(13): 91-93.
- [39] Fangyu Yue, Junhao Chu, Jun Wu, et al. Modulated Photoluminescence of Shallow Levels in Arsenic-doped $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Grown by Molecular Beam Epitaxy [J]. *App Phys Lett*, 2008, **92**(12): 161-163.
- [40] Yue Fangyu, Chen Lu, Wu Jun, et al. Impurity Activation in MBE-Grown As-Doped HgCdTe by Modulated Photoluminescence Spectra [J]. *Chin Phys Lett*, 2009, **26**(4): 41-44.
- [41] Robin I, Taupin M, Derone R, et al. Photoluminescence Studies of Arsenic-doped $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Epilayers [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, **95**(20): 41-43.
- [42] Shao J, Lu X, Guo S, et al. Impurity Levels and Bandedge Electronic Structure in As-grown Arsenic-doped HgCdTe by Infrared Photoreflectance Spectroscopy [J]. *Phys Rev B*, 2009, **80**(15): 1-11.
- [43] Shao J, Ma L, Lu X, et al. Evolution of Infrared Photoreflectance Lineshape with Temperature in Narrow-gap HgCdTe Epilayers [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **93**(13): 141-143.
- [44] Jun Shao, Lu Chen, Xiang Lü, et al. Realization of Photoreflectance Spectroscopy in Very-long Wave Infrared of up to 20 μm [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, **95**(4): 81-83.
- [45] Shao Jun, Ma Li Li, Lv Xiang, et al. Recent Progress and Potential Impace of Modulation Spectroscopy for Narrow-gap HgCdTe [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2008, **27**(1): 1-6.
- [46] Jun Shao, Lu Chen, Wei Lu, et al. Backside-illuminated Infrared Photoluminescence and Photoreflectance: Probe of Vertical Nonuniformity of HgCdTe on GaAs [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, **96**(12): 151-153.
- [47] Jun Shao, Lu Chen, Zha F X, et al. Modulation Mechanism of Infrared Photoreflectance in Narrow-gap HgCdTe Epilayers: A Pump Power Dependent Study [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, **108**(2): 181-183.
- [48] Sun L Z, Chen X S, Sun Y L, et al. Structural and Electronic Properties of the In-situ Impurity AsHg in $\text{Hg}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{Te}$: First-principles Study [J]. *Phys Rev B*, 2005, **71**(19): 31-34.
- [49] Sun L Z, Chen X S, Sun Y L, et al. Relaxations and Bonding Mechanism in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ with Mercury Vacancy Defect: First-principles Study [J]. *Phys Rev B*, 2006, **73**(19): 61-68.
- [50] Duan He, Chen Xiaoshuang, Huang Yan, et al. First-principles Study of Arsenic Impurity Clusters in Molecular Beam Epitaxy (MBE) Grown HgCdTe [J]. *Solid State Commu*, 2007, **143**(10): 471-475.
- [51] Ballet P, Polge B, Biquard X, et al. Extended X-ray Absorption Fine Structure Investigation of Arsenic in HgCdTe : the Effect of the Activation Anneal [J]. *J Electron Mater*, 2009, **38**(8): 1726-1732.