

超高真空扫描隧道谱实验对碲镉汞室温带隙的直接测定

任秀荣¹, 查访星^{1,2*}

(1. 上海大学 理学院 物理系和微结构实验室, 上海 200444;

2. 中科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:利用超高真空扫描隧道显微镜的隧道谱实验对汞空位掺杂的液相外延 P 型碲镉汞材料在室温条件下进行测量,发现直接的电流-电压隧道谱对带隙预言一定程度上要受到成像偏置电压的影响.但当采用了锁相放大测量技术,通过实验直接获取微分隧道谱(dI/dV)信号,并利用电流-电压谱对 dI/dV 作归一化处理时,最终结果则能较准确、可靠地预言材料的带隙,表明扫描隧道谱方法作为独立于光学方法之外的另一种实验表征手段对碲镉汞能带电子结构研究的适用性.

关键词:碲镉汞;扫描隧道显微镜;扫描隧道谱;能带带隙;锁相放大技术

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Band gap determination of HgCdTe by ultra high vacuum scanning tunneling spectroscopy

REN Xiu-Rong¹, ZHA Fang-Xing^{1,2*}

(1. Department of Physics and Laboratory for Microstructures, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

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

Abstract:In contrast to conventional band gap determination of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ by low-temperature Fourier transform spectroscopy, we report the application of tunneling spectroscopy (STS) technique to measure the energy band gap of the vacancy-doped P- $Hg_{1-x}Cd_xTe$ grown by liquid-phase epitaxy (LPE) method. The apparent zero-current gaps measured by current-voltage tunneling spectroscopy are influenced by the imaging bias. However, the real energy band gap can be revealed by the normalized differential tunneling conductance, which were obtained using the lock-in amplifier technique. The results indicate the feasibility of room temperature band gap determination by the STS technique.

Key words: HgCdTe; scanning tunneling microscopy; scanning tunneling spectroscopy; energy band gap; lock-in amplifier

PACS: 73.20.At, 68.37.Ef, 73.40.Gk.

引言

对碲镉汞能带带隙的准确实验测定,是非常经典却是迄今仍有一定分歧的基础性课题^[1-3].较早 Hansen 等人根据低温下磁光实验的数据提出了 Hansen 公式^[4],但公式来自低温实验数据.基于本征光吸收谱的光学方法可以获得 4.2 ~ 300 K 温度下的实验数据,但吸收系数有不同假设^[5-6].带隙的

定量结果也存在不同假定,或认为指数吸收边和本征吸收带的交点处,或认为是吸收边改变斜率开始变得平坦的转折区域^[7].目前应用较广的是根据吸收光谱方法确定禁带宽度,包括褚君浩等基于本征吸收光谱确定的禁带宽度而总结出的 CXT 公式^[8],该公式比 Hansen 公式计算的精确度略高一些.近年来,邵军等人基于他们所发展的光致发光谱(Photo-luminescence Spectroscopy, PL)和光调制反射谱

收稿日期:2012-01-06,修回日期:2012-07-16

基金项目:973 项目(2010CB630704)

Foundation items: Supported by the 973 project(2010CB630704)

作者简介 (Biography):任秀荣(1986-),女,山东聊城人,硕士研究生,窄禁带半导体扫描隧道显微镜研究.

* 通讯作者(Corresponding author):E-mail: fxzha@shu.edu.cn.

Received date: 2012-01-06, **revised date:** 2012-07-16

(Photoreflectance Spectroscopy, PR), 对碲镉汞的能带带隙的指认作了较为深入地研究, 对 PL 实验关于碲镉汞带隙指认上又与传统方法有所差异, 主要认为带隙能量位置相对于 PL 主峰有一定蓝移^[9-12].

扫描隧道显微镜 (Scanning Tunneling Microscopy, STM) 是一种重要的表面分析仪器, 具有在成像同时进行扫描隧道谱 (Scanning Tunneling Spectroscopy, STS) 测量的独特优点. STS 携带了样品的电子态信息, 自其发明以来一直在半导体材料电子性质研究方面有着广泛应用^[13-14], 本课题组近来首次将 STM 应用于碲镉汞表面缺陷结构的观察研究^[15], 但如何从隧道谱测量来揭示碲镉汞材料带隙仍未有过研究报道. 作为完全独立于光学方法之外的另一种能带电子结构实验方法, 应用于碲镉汞材料电子结构研究, 对于澄清前面提到的光学方法在该材料能带带隙实验认知方面尚存在的某些分歧, 无疑提供了一种有效的解决方案. 特别指出的是, 迄今对碲镉汞能带带隙的准确实验测量一般依赖于低温环境的光谱实验, 室温带隙则是根据经验公式外推获得. 本篇论文工作则说明了基于 STS 实验技术即使对于窄禁带碲镉汞仍然可以在室温条件下获得对能带带隙较准确的测量结果.

在 STM 对样品成像过程中, 将针尖定位于表面任一位置, 并使反馈环路断开, 维持恒定的样品-针尖间距, 通过扫描样品偏压而获取电流-电压隧道谱是一种常规的隧道谱实验方法. 一种通常使用的粗略估测带隙的方法是, 将零偏压附近的零电流区电压范围 (单位用伏特) 数值上等价为电子伏特表示的能带带隙. 然而, 测量时与样品-针尖间距密切相关的样品偏压 (V_{bias}) 会对表观带隙的观测有直接影响^[16-17]. 为了有效消除测量条件等外部因素对测量结果产生的不确定性, Feenstra 等人提出了对微分隧道谱作归一化处理的带隙指认方法^[17]. 尽管许多实验是通过直接对电流-电压隧道谱进行数值微分的方式获得微分隧道谱, 但对于窄禁带的碲镉汞材料而言, 室温测量时较大热噪声干扰会导致难以直接从测量清晰地分辨出能带带隙. 鉴于此, 我们采取了利用锁相放大技术对微分隧道电流信号直接测量的实验方法. 在此基础上, 再进行归一化微分隧道谱数据处理, 发现可以获得清晰的带隙分辨. 该测量技术的另一优点, 是能够克服单纯基于电流-电压隧道谱数据推断所产生的较大误差. 实验结果表明, 当采用原位微分隧道谱测量实验技术后, 即使是室温实

验条件归一化微分隧道谱也能较准确地给出窄禁带半导体的能带带隙. 对于傅立叶光谱方法而言通常只能在低温测量下才能获得.

1 实验方法

实验样品是采用液相外延生长 (LPE) 方法在 CdZnTe 衬底上生长的汞空位掺杂 p 型 $Hg_xCe_{1-x}Te$ 样品, 样品外延薄膜层厚度约为 20 μm . 基于傅里叶光致发光实验给出 77 K 带隙 E_g 为 0.21 eV^[18], 对应组分 x 值为 0.28. 根据 CXT 经验公式外推室温带隙为 0.28 eV. 该样品经 77 K 霍尔测量给出的空穴浓度为 $3.0 \times 10^{16} cm^{-3}$. 为了去除表面氧化层以获得新鲜的样品表面进行测量, 测试前样品经过溴甲醇溶液腐蚀处理 (1% 浓度, 约 0.5 min 腐蚀时间). 腐蚀后, 样品被迅速送入 STM 预真空进样室, 启用分子泵, 在 $\sim 1.0 \times 10^{-8}$ mbar 真空环境下, 滞留 4 h 再送入超高真空腔测试, 测量时真空度小于 1.0×10^{-10} mbar. 测试系统为德国 Omicron 公司的超高真空扫描隧道显微镜 (UHV-STM). STM 探测采用钨针尖, 测试环境为室温. 参考隧道电流选为 1.0 nA, 成像偏置电压在 0.3 ~ 1.5 V 之间选取.

实验中, 可在成像的同时使针尖定位于任一成像点, 切断反馈回路, 获取隧穿电流-电压 (I/V) 谱. 准确的电子结构分析依赖于较高信噪比的微分电流-电压隧道谱数据 (dI/dV). 为此, 拓展了原有仪器功能, 实验原理如图 1 所示, 通过外接锁相放大器 (斯坦福 SR830), 在谱测量的同时, 每一个采样点 V 上附加一个由锁相放大器本身提供的一小的周期性正弦波电压信号 $V_{mod} \cdot \sin \omega t$ 作为调制信号, 其中 V_{mod} 为调制电压信号的幅度, 一般选取范围为 10 ~ 25 mV; 调制参考信号频率选取范围为 0.5 ~ 2 kHz. 耦合了电压调制产生的隧道电流输出到锁相放大

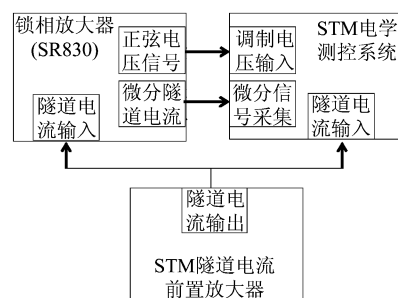


图 1 在 STM 实验中使用锁相放大器进行微分隧道谱测量的原理图

Fig. 1 The circuit for acquisition the acquirement of differential tunneling spectra in the STM experiment

器,由锁相提取微分电流信号并被 STM 测控系统采集,从而获得实时测量的 dI/dV 微分隧道谱信号。

2 实验结果与讨论

图 2 给出了实验测量样品的一典型形貌图. 与此前所报道的采取较高腐蚀液浓度和略长时间腐蚀(3% 浓度溴甲醇, 2.5 min)所观测的样品形貌不同的是^[15], 这里观测到的样品表面较为平整, 起伏粗糙度一般不超过 3 nm, 如图 2(b) 的一表面轮廓线所示(对应图(a) 中白线所指示). 在此前对于相同材料, 经较强腐蚀条件所获得表面的 STM 实验中, 观察到密度较高、孔径一般在亚微米尺度而深度为几十纳米的凹坑结构^[15], 这说明样品表面凹坑结构的形成与腐蚀参数有着密切的关系。

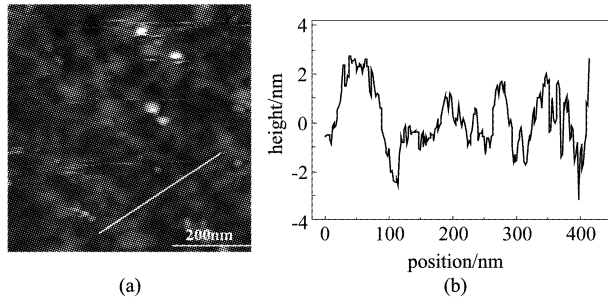


图 2 样品的表面形貌图及其轮廓线 (a) 0.6 V、1.0 nA 下样品的表面形貌图, (b) 对应于 (a) 中线的表面形貌轮廓线
Fig 2 STM topography and a line profile of the HgCdTe sample (a) Constant current image with $V_{\text{bias}} = 0.6 \text{ V}$ and $I_{\text{setpoint}} = 1.0 \text{ nA}$, (b) A line profile corresponds to the line in (a)

在半导体材料的扫描隧道谱实验中, 半导体能带带隙在直接的隧道电流 - 电压谱上表现为零电压附近的一表观的零电流平台结构. 理论上该零电流区的电压范围对应于半导体能带带隙 E_g 为 $E_g (eV)/e$. 为了较为准确地测定这一零电流区范围, 习惯上将电流 - 电压谱用电流对数坐标图表示, 这样对于在电压测量范围内电流数值有若干量级变化的隧道电流而言(电流 - 电压关系通常为指数函数关系)可以更清楚地显示电流变化的趋势性特征. 在对数坐标表示下, 上述电流 - 电压隧道谱的直观地呈现为噪声电流主导的零信号电流区. 实验中观察到, 上述电流 - 电压隧道谱的噪声电流区的平台宽度并不严格等效于半导体能带带隙, 还受到成像偏压的影响. 如图 3 所示, 图 3(a) 为三个不同成像偏压 (V_{bias}) 取值: 0.6 V、0.9 V 和 1.2 V 对应的典型电流 - 电压隧道谱. 较高的成像偏压下, 电流变化范围有所减小, 这是因为隧道电流不变的恒流成像模

式下, 偏压的增大伴随样品-针尖间距的有所增大. 在电压扫描区间保持不变的情况下, 隧穿距离增大则引起隧道电流的动态变化范围的减小. 这种规律也反映在其它半导体的扫描隧道谱实验中^[16]. 为了对测量数据获得可靠的统计性结论, 在每一偏压成像条件下均进行多次的隧道谱测量, 以电流对数坐标所表示的电流-电压隧道谱曲线在图 3(b) ~ (d) 中给出, 分别对应成像偏压为 0.6 V、0.9 V 和 1.2 V 的情形. 通过噪声电流区的平均宽度来估计表观带隙的大小. 如用水平箭头线所指示, 图 3(b) ~ (d) 中几种情形所测量的平均宽度范围分别为 $(0.21 \pm 0.01) \text{ V}$, $(0.25 \pm 0.01) \text{ V}$, $(0.28 \pm 0.01) \text{ V}$.

由上述数值来看, 随着成像偏压的增大, 电流对数坐标下的隧道谱给出的表观带隙相应增加. 其中图 3(b) 和 (c) 所对应的成像偏压为 0.6 V 和 0.9 V 时的隧道谱呈现数值小于该材料带隙的零电流区宽度, 只有 1.2 V 的数值与材料实际能带带隙相一致. 这一现象可以从陷阱态能级被占据状况的角度给予定性的解释. 这类陷阱态能级位于禁带中, 由于成像时针尖电场诱导的能带弯曲效应, 会导致这类带隙态占据几率发生变化. 对于位于材料禁带图中较靠近导带边的类施主态的陷阱中心, 在没有外场作用或仅较低偏压存在时, 这些类施主陷阱中心由于较小的电离能而与导带有较强的电子交换, 或者说很大部分处于被电离状态. 这些处于激活状态的陷阱态, 可为电子提供隧穿需要的能态通道. 由于这类近带边带隙态参与隧穿过程, 导致在隧道谱上所观测到的零电流电压范围比实际能带带隙缩小.

然而当针尖电场偏压较高时, 针尖电场的产生明显的能带弯曲, 使得这类施主态与带边能量间隔增大, 其上俘获电子被电离的几率大大降低; 则本来处在电离状态可以接纳隧穿电子的能态密度大大降低. 事实上此时处于深能级状态的陷阱中心一般又具有较长寿命, 因此在进行电压扫描获得隧道谱的测量过程中, 当针尖费米能级随偏压扫描掠过材料带隙时这类带隙态由于俘获电子处于被占据状态因而不会成为接纳隧穿电子的能态通道, 故不会对实际能带带隙的测量产生影响. 由此可以解释为什么在较高的成像偏压下(如图 3(d)), 零电流区范围反而更接近材料的实际带隙.

上述讨论整体上看来, 尽管扫描隧道谱的表观零电流区宽度是一种看似能够简单方便推定带隙的方法, 但要可靠指认带隙确实还会受到如成像偏压这样测量条件因素的较大干扰. 事实上, 更准确地揭

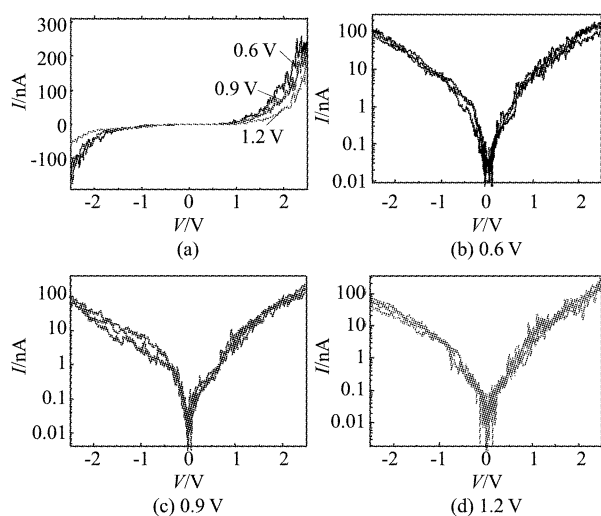


图3 样品的扫描隧道谱 (a)为样品偏压为 0.6 V、0.9 V 和 1.2 V 时,样品的电流电压谱 (I - V), (b)-(d) 分别为 0.6 V、0.9 V 和 1.2 V 下电流对数坐标下的隧道谱

Fig. 3 Scanning tunneling spectra of the sample (a) Spectra of current vs voltage with the three biases, their logarithm plots are indicated in (b)-(d), respectively

示电子态行为应从微分隧道电流谱来讨论. 由于隧道电流 I 与样品-针尖间距成指数关系, I - V 谱受样品-针尖间距影响极其敏感. 为减小这种影响, 更清晰地反映样品局域态密度, Feenstra 等人提出了归一化电导谱 $(dI/dV)/(I/V)$ ^[17]. 该方法也是目前扫描隧道谱实验中比较流行的分析电子信息的数据处理方法. 该方法针对带边位置电流 I 相对于微分谱 dI/dV 较快的趋向零会导致 (dI/dV) 发散的困难, 在求归一化电导谱中利用 $(\overline{I/V})$ 取代 I/V 可以消除带边发散, 其中, 为

$$(\overline{I/V}) = \int_{-\infty}^{\infty} I_m/V' \exp\left\{\frac{V' - V}{\Delta V}\right\} dV' \quad (1)$$

式中, I_m 和 V' 分别为测量电流和电压, 通常 ΔV 的取值近似等于材料带隙.

微分电导数据 (dI/dV) 最简单的方法是直接对电流-电压谱数值微分得到, 首先检验了这一方法的有效性. 如图 4 内插图就是基于电流-电压隧道谱直接数值微分获得的结果, 其中三条曲线分别是三个成像偏压 (0.6 V、0.9 V 和 1.2 V) 下进行电流-电压隧道谱测量而经数值计算给出. 可以看出, 经过数值微分获得的归一化电导谱未能显示确切的材料带隙信息. 这对于对碲镉汞材料而言是可以理解的, 因其窄禁带特性, 室温测量会产生很大的噪声干扰, 通过对电流-电压谱数值微分难以给出带隙信息.

鉴于此, 采用了前面实验中所描述的锁相放大技术, 在 I/V 测量同时同步测量获取 dI/dV 信号. 在

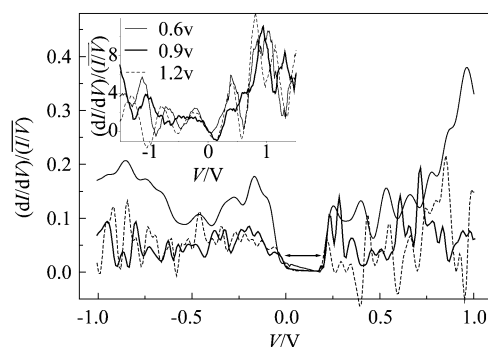


图4 样品在几种成像偏压下的归一化微分隧道谱
Fig. 4 Normalized differential conductance of HgCdTe with several imaging bias

此数据基础上, 再计算出归一化微分电导谱. 计算结果如图 4 所示. 可以看到, 尽管目前尚不能澄清较高电压区域的振荡峰是否来源于噪声干扰, 但是在零偏压附近, 在上述不同成像偏压 (0.6 V、0.9 V 和 1.2 V) 下的曲线显示出基本一致的零电流区宽度, 具体数值为 0.28 V. 对于本实验液相外延样品, 早先也曾进行过低温傅里叶光谱的测试^[19]. 根据低温光谱测量给出的 x , 再利用 CXT 外推室温带隙的结果具有很好一致性^[20]. 另外, 还可以看到图 4 中零电压更靠近左侧下降沿. 对于 P 型半导体而言, 这似乎应是自然的结果, 因为费米能级 (零偏压能量) 应更接近价带边 (对应左侧下降沿). 不过对本样品 (空穴浓度为 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 费米能级的计算发现, 与低温情形不同的是室温费米能级实际上仍处在禁带中央位置. 对图 4 中表现的费米能级相对零电压往正电压方向移动, 可理解为实际材料功函数和探测针尖功函数 (钨为 4.55 eV) 略低引起的修正. 此外, 因为微分隧道谱的信号直接正比于电子态密度^[17], 一般说来半导体带边的电子态密度要远高于陷阱态密度, 故微分隧道谱在带隙附近的信号强度由半导体带边的能态密度所主导, 而成像偏压引起的陷阱能级占据状态的变化并不对微分隧道谱产生明显的影响.

碲镉汞材料的组分不均匀性或许会引起带隙测量的偏差. 就图 2 形貌测量而言, 尽管表面显示约几纳米的粗糙度变化, 但从对样品不同空间点的隧道谱测试结果来看, 并未观测到明显的带隙变化, 说明在所示几微米的 STM 成像尺度范围内组分不均匀性并不明显. 在之前的报道中^[15], 则观察到强烈表面腐蚀产生的明显凹坑结构; 同一表面区内凹坑与表面平坦区隧道谱明显不同. 在本实验中, 对样品采用了低浓度和短的腐蚀时间 (1% 浓度溴甲醇溶液

和约 30 s 腐蚀时间). 当然仅仅基于两组测量的比较,尚不足以揭示出腐蚀对表面电子结构影响的规律,还有待于更全面的数据实验结果.

3 结论

本工作报道了液相外延汞空位 P 型碲镉汞材料的超高真空扫描隧道谱实验结果. 讨论了由扫描隧道谱来确定碲镉汞材料基本带隙的方法. 发现尽管通常使用的基于电流-电压隧道谱直接测量,能观察到一表观带隙,但是其具体数值受到成像偏压大小的影响. 通过锁相放大器获取的微分电导谱 dI/dV , 并对其利用电流-电压隧道谱 (I/V) 作归一化处理获得该材料的归一化电导谱, 则能较可靠地获得与材料组分值所预言的能带带隙. 而且值得强调的是, 这里的隧道谱数据是基于室温测量条件获得的. 当然更全面地提取和分析隧道谱的细节信息, 还有赖于更高信噪比的测量结果以及来自不同组分及生长方式的材料的更多数据, 但上述结论仍具有一般意义. 另外, 从目前初步的低温实验结果看, 隧道谱信噪比较室温有着明显的改善, 进一步研究结果会在今后报道中给出. 尽管目前报道结果是初步的, 但已清楚地说明了扫描隧道谱作为一种独立光学方法之外另一电子结构实验方法, 应用于碲镉汞材料的有效性. 事实上, STM/STS 较之光学方法的另一突出优势在于能够将隧道谱和表面成像有机地合起来, 能够直接地揭示材料的局域电子特性. 可以预期, 对于碲镉汞电子态研究方面尚未澄清的一些基础性问题, STM/STS 实验技术应当能够发挥光学方法无法替代的重要作用.

致谢 衷心感谢上海技术物理研究所吕翔博士对于样品低温傅立叶光谱表征所给予的热情帮助和邵军研究员对文稿给予的中肯建议. 感谢中科院红外物理国家重点实验室开放课题的资助.

REFERENCES

- [1] Harman T C, Strauss A J, Dickey D H, *et al.* Low electron effective masses and energy gap in $Cd_xHg_{1-x}Te$ [J]. *Phys. Rev. Lett.* 1961, **7**(11): 403–405.
- [2] Scott M W. Energy gap in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ by optical absorption [J]. *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**(10): 4077–4081.
- [3] Elliott C T, Melngailisa I, Harman T C. Carrier freeze-out and acceptor energies in p-type $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. *J. Phys. Chem. Sol.*, 1972, **33**(7-9), :1527–1531.
- [4] Hansen G L, Schmit J L, Casselman T N. Energy gap versus alloy composition and temperature in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**(10): 7099–7101.
- [5] Phillips J D, Moazzami K, Kim J, *et al.* Uniformity of optical absorption in $HgCdTe$ epilayer measured by infrared spectromicroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(10): 3701–3703.
- [6] Laurenti J P, Camassel J, Bouhemadou A, *et al.* Temperature dependence of the fundamental absorption edge of mercury cadmium telluride [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**(10): 6454–6460.
- [7] Chu J H, Xu S C, Tang D Y. Energy gap versus alloy composition and temperature in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(11): 1064–1066.
- [8] Chu J H, Li B, Liu K, *et al.* Empirical rule of intrinsic absorption spectroscopy in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(2): 1234–1235.
- [9] SHAO Jun, MA Li-Li, LV Xiang, *et al.* Recent progress and potential impact of modulation spectroscopy for narrow gap $HgCdTe$ [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (邵军, 马丽丽, 吕翔, 等, 窄禁带碲镉汞调制光谱的近期进展和前景, *红外毫米波学报*), 2008, **27**(1): 1–6.
- [10] Shao J, Lv X, Lu Wei, *et al.* Cutoff wavelength of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ epilayers by infrared photoreflectance Spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(17): 171101–171101–3.
- [11] Yue F Y, Shao J, Lv X, *et al.* Anomalous temperature dependence of absorption edge in narrow-gap $HgCdTe$ semiconductors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(2): 021912.
- [12] YUE Fang-Yu, SHAO Jun, WEI Yan-Feng, *et al.* Temperature dependent absorption spectra investigation of shallow levels in $HgCdTe$ grown by liquid phase epitaxy [J], *Acta Physica Sinica* (越方禹, 邵军, 魏彦峰, 等, 变温吸收谱研究液相外延碲镉汞浅能级, *物理学报*), 2007, **56**(5): 2878–2881.
- [13] Stroscio J A, Feenstra R M, Fein A P. Electronic structure of the $Si(111)2 \times 1$ surface by scanning tunneling microscopy [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**(20): 2579–2582
- [14] Jager N D, Ebert Ph, Urban K, *et al.* Scanning tunneling microscopy and spectroscopy of semi-insulating GaAs [J]. *Phys. Rev. B.*, 2002, **65**(19): 195318–195318–8.
- [15] WANG Qing-Yu, REN Xiu-Rong, LI Mao-Sen, *et al.* Scanning tunneling spectra for the etched surface of p-type $HgCdTe$ [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王庆余, 任秀荣, 李茂森, 等. 液相外延 P 型碲镉汞表面区与腐蚀凹坑结构的不同扫描隧道谱特征, *红外毫米波学报*), 2012, **31**(3): 222–225.
- [16] Feenstra R M, Stroscio J A. Tunneling spectroscopy of the GaAs (110) surface [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 1987, **5**(4): 923–929.
- [17] Feenstra R M. Tunneling spectroscopy of the (110) surface of direct-gap III-V semiconductors [J]. *Physical Review B*, 1994, **50**(7): 4561–4570.
- [18] Shen X C, Chu J H. Low frequency phonon spectra of mixed crystal $Cd_xHg_{1-x}Te$ [J]. *Solid State Communications*, 1983, **48**(12): 1017–1021.
- [19] Zha F X, Shao J, *et al.* “Blueshift” in photoluminescence and photovoltaic spectroscopy of the ion-milling formed n-on-p $HgCdTe$ photodiodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(20): 201112–201112–3.
- [20] CHU Jun-Hao. *Narrow band gap semiconductor physics* [M]. Beijing: Science Press (褚君浩. 窄禁带半导体物理学, 北京: 科学出版社), 2005: 141–155.