

专题: 半导体物理与器件

基于深能级瞬态谱的 InGaSb/AlGaAsSb 量子阱激光器能带不连续性表征*

陈益航¹⁾²⁾ 石建美¹⁾²⁾ 耿峥琦¹⁾ 曹钧天¹⁾²⁾ 闻皓冉¹⁾ 张恩泉¹⁾²⁾
李宗裔¹⁾²⁾ 钟云翔¹⁾ 张启智¹⁾ 吴东海¹⁾²⁾ 徐应强¹⁾²⁾
倪海桥¹⁾²⁾ 杨成奥^{1)2)†} 牛智川^{1)2)‡}

1) (中国科学院半导体研究所, 光电子材料与器件全国重点实验室, 北京 100083)

2) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

(2025 年 12 月 10 日收到; 2026 年 1 月 26 日收到修改稿)

碲化物光电器件为 2—4 μm 中红外波段提供了小型化高效率光源解决方案, 对气体检测、激光医疗等工业与民生领域技术升级具有重要推动作用. 随着新型碲化物激光器的快速发展, 应变作用下多元碲化物合金能带结构的精准表征成为器件设计工具迭代的关键瓶颈, 尤其 InGaSb/AlGaAsSb 量子阱的压应变导带底与价带顶偏移量缺乏实际观测数据支撑. 本文采用深能级瞬态谱 (deep level transient spectroscopy, DLTS) 技术结合光致发光 (photoluminescence, PL) 测试, 研究了该量子阱的能带不连续性. DLTS 测试测得导带带阶差为 0.352 eV, 结合 PL 测试结果计算出价带带阶差为 0.156 eV. 在 DLTS 谱中观测到少子信号峰, 证实为量子阱在波导层中的电子陷阱; 在 150 K 附近检测到多子信号峰, 推测该信号峰与量子阱的空穴发射过程相关. 本研究为碲化物光电器件的能带工程设计与缺陷调控提供了关键实验依据.

关键词: 碲化物, 激光器, 深能级瞬态谱, 量子阱

DOI: 10.7498/aps.75.20251699

CSTR: 32037.14.aps.75.20251699

1 引言

碲化物光电器件填补了 2—4 μm 中红外波段小型化高效率光源的空白, 有望推动气体检测、激光医疗、材料加工等重要工业与民生应用领域的技术发展. 中红外波段中存在 CO, CO₂, CH₄, H₂O, HCl 等大量气体分子基频振动跃迁所对应的特征吸收峰, 吸收截面相较于近红外波段的特征吸收峰高了 3—5 个数量级, 因此碲化物中红外激光器被报道应用于地球大气污染遥感与火星大气痕量气

体检测^[1,2]. 由于水分子氢氧键的组合振动与基本伸缩振动分别对应波长为 1.94 μm 与 2.95 μm 的光子, 中红外高功率脉冲光源在作为激光手术光源时, 具有穿透深度浅、能量传输效率高、周边热损伤低优势. 将碲化物半导体激光器耦合至光纤后, 可以应用到静脉曲张治疗、泌尿组织切除、龋齿治疗等激光手术场景^[3]. 随着聚合物加工需求向着更高精密度方向演进, 传统二氧化碳激光器大体积、难维护、低精度等问题逐渐开始暴露, 难以满足汽车、消费电子、医疗器具等领域的加工需求, 而采用 3.44 μm 波长的中红外激光器可以显著提升光

* 北京市科技新星计划 (批准号: 20240484621)、中国科学院基础科研领域稳定支持青年团队计划 (批准号: YSBR-112) 和山西省揭榜挂帅项目 (批准号: 202201030201009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangchengao@semi.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: niuzc@semi.ac.cn

热转化效率, 这是因为 $3.44 \mu\text{m}$ 波长光子能量与聚合物中的碳氢键基本伸缩振动能量相近, 亚克力、高密度聚乙烯、聚丙烯等材料均在 $3.44 \mu\text{m}$ 附近表现出了较强的吸收能力^[4].

随着应用需求愈发明晰, 铋化物激光器近年来经历了快速的发展过程. 在采用五元合金势垒与量子阱级联结构后, 一型量子阱铋化物激光器的工作波长覆盖了 $2\text{--}3.3 \mu\text{m}$, 并且在 $3 \mu\text{m}$ 以下具有瓦级的室温连续输出功率^[5-7]. 采用金属光栅的侧向耦合分布式反馈激光器最高可以实现 53 dB 的边模抑制比, 并且可以保持 40 dB 以上边模抑制比的同时达到 40 mW 的室温连续输出功率^[8]. 此外, 超辐射二极管^[9]、光子晶体面发射激光器^[10]、锁相 Talbot 腔激光器^[11]、硅基异质集成激光器^[12] 等新型铋化物器件也相继被报道.

在新型铋化物激光器快速发展的同时, 我们也需要同步推进适用于铋化物材料体系的光电器件设计工具的迭代, 在这其中尤为关键的是加强对于应变作用下多元铋化物合金能带结构的理解. 以 $\text{InGaSb}/\text{AlGaAsSb}$ 量子阱为例, 压应变会导致 InGaSb 的导带底和价带顶发生相应偏移, 但是具体的偏移量尚无文献报道实际观测值. 深能级瞬态谱 (deep level transient spectroscopy, DLTS) 有望解决上述困难, 其通过检测样品在脉冲偏压激发后电容的瞬态响应, 可以定量获取器件内深能级陷阱中心能级位置、密度、俘获面积等关键参数, 主要被应用于太阳能电池与宽禁带材料中深能级缺陷的表征^[13,14]. DLTS 测试中量子阱作为载流子的捕获和热发射中心, 可以被视为波导层中间的深能级缺陷, 其最早被应用于 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ 量子阱的导带不连续性表征, 并在随后被应用于 GaN/InGaN 量子阱 LED 等器件的带阶差表征, 基于同样的原理 DLTS 可以通过空穴的热发射行为测得 Si/SiGe 量子阱的价带带阶差^[15-17], 因此有望基于 DLTS 技术对铋化物量子阱能带结构开展详细研究. 此外, DLTS 可以基于对非辐射复合中心的检测研究激光器的退化机制^[18-20].

本文采用 DLTS 技术测得了 $\text{InGaSb}/\text{AlGaAsSb}$ 量子阱激光器中的导带带阶差 0.352 eV , 并结合光致发光 (photoluminescence, PL) 测试结果计算价带带阶差 0.156 eV . 在 DLTS 测试中观察到少子信号峰, 确认为量子阱在波导层中的电子陷阱, 具有 $1.7 \times 10^{-14}\text{--}3.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ 的俘获面积和

$2.90 \times 10^{18}\text{--}2.95 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的缺陷密度; 在 150 K 附近观察到多子信号峰, 激活能为 0.13 eV , 俘获面积为 $1.9 \times 10^{-16}\text{--}2.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, 缺陷密度为 $2.71 \times 10^{18}\text{--}4.26 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 其可能对应着量子阱发射空穴过程.

2 实验

2.1 样品制备

采用分子束外延设备完成激光器外延结构生长, 具体过程如下: 在超高真空下将 (001) 晶向的 n 型 GaSb 衬底加热并保持脱除衬底表面吸附的气体, 使衬底表面的氧化物分解并解吸附; 在裸露粗糙 GaSb 表面上同质外延生长 GaSb 薄层得到原子级平整的表面后, 依次沉积掺杂 Te 的 AlGaAsSb 下限制层、 AlGaAsSb 下波导层、 $\text{InGaSb}/\text{AlGaAsSb}$ 量子阱、 AlGaAsSb 上波导层、掺杂 Be 的 AlGaAsSb 上限制层和掺杂 Be 的 GaSb 接触层. 材料的组分与厚度通过抵达衬底表面的束流以及持续时间控制, 为避免生长过程中引入位错、材料偏析等缺陷, 生长的温度与束流需要反复优化.

完成生长的外延片经表征检测合格后开始后续器件工艺, 依次采用光刻与 ICP 刻蚀制备激光器脊条, 采用 PECVD 沉积 SiO_2 后在脊条上方通过光刻与 RIE 刻蚀电注入窗口, 并在晶片两面分别沉积 $\text{Ti}/\text{Pt}/\text{Au}$ 与 $\text{AuGe}/\text{Ni}/\text{Au}$ 并快速热退火以形成欧姆接触, 随后解理晶片并在激光器前后腔面分别沉积 Al_2O_3 与 Si/SiO_2 作为增透膜与高反膜, 完成上述工艺的器件被封装到热沉上以开展后续电学测试.

2.2 样品表征

在开始器件工艺前, 采用原子力显微镜、高分辨率 X 射线衍射仪、光致荧光表征外延样品, 合格外延需要具有原子级平整的表面与清晰的 X 射线衍射峰, 并且 PL 峰波长符合设计要求. 完成封装后的激光器被安装在 TEC 控温平台上测试 $P\text{-}I\text{-}V$ 曲线与工作波长, 随后器件被放入 FT-1230 表征器件的深能级瞬态谱, 为避免大气成分在样品表面凝结并损伤样品, 测试环境真空被分子泵抽至 $1 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ ($1 \text{ Torr} = 133 \text{ Pa}$), 样品温度采用液氮降温, 并通过闭环控制液氮流量实现 $85\text{--}300 \text{ K}$

的精确控温测试, 为实现精确的瞬态电容测试, 设备的电容计灵敏度为 0.01 fF, 最短采样间隔为 2 μ s.

3 实验结果

图 1(a) 为铋化物激光器的外延结构示意图, 为避免晶格失配导致穿透位错产生, 限制层和波导层的 AlGaAsSb 材料组分被精确调控, 实现与 GaSb 衬底的晶格匹配生长, 仅在 InGaSb 量子阱层中引入压应变, 用于提升辐射复合效率与确保 TE 模式主导 [21], 量子阱厚度同样被限制在临界厚度以下 [22]. 为降低自由载流子吸收导致的内损耗, 波导层在生长过程中不故意掺杂, Hall 测试显示该制备条件下的波导层呈弱 p 型. DLTS 测试的瞬态电容信号主要来源于 pn 结, 在本文中对应波导层与下限制层之间的 pN⁺结, 由于非故意掺杂波导层与下限制层之间显著的掺杂浓度差异, 耗尽层可以被认为分布在波导层中.

图 1(b) 展示了与 GaSb 晶格匹配 AlGaAsSb 材料的导带底 (Γ 带) 与价带顶随着 Al 组分变化的规律, 其中纵坐标的 0 eV 对应 InSb 价带顶能量 [23]. 为降低激光器内损耗并提升光学模式增益, 我们优化了激光器的分别限制异质设计, 波导层与限制层的 Al 组分被分别设置为 0.25 和 0.5, 为保证晶格匹配, As 组分则分别为 0.02 和 0.04, 经计算其具有 $E_{v\text{InSb}} - 0.167$ eV 的价带顶能量 (后统一省略 $E_{v\text{InSb}}$, 记作 -0.167 eV) 与 +1.006 eV 的导带底能量, 禁带宽度为 1.173 eV.

本文采用带裂解区的 Sb 炉以分解 Sb_4 分子, 得到更高活性的 Sb_2 与 Sb, 从而可以降低材料生长所需的 Sb 束流, 更低的五族元素氛围有助于保持三族元素在衬底表面的迁移率, 进而得到更平整

的表面与更低的缺陷密度 [24]. 经对比优化后, 本实验将 Sb 炉裂解区温度设置为 950 $^{\circ}\text{C}$, 图 2(a) 为外延片的 AFM 测试结果, 样品表面的原子台阶清晰可见, 整体呈现原子级表面平整度, 均方根 (root mean square, RMS) 粗糙度仅 0.176 nm.

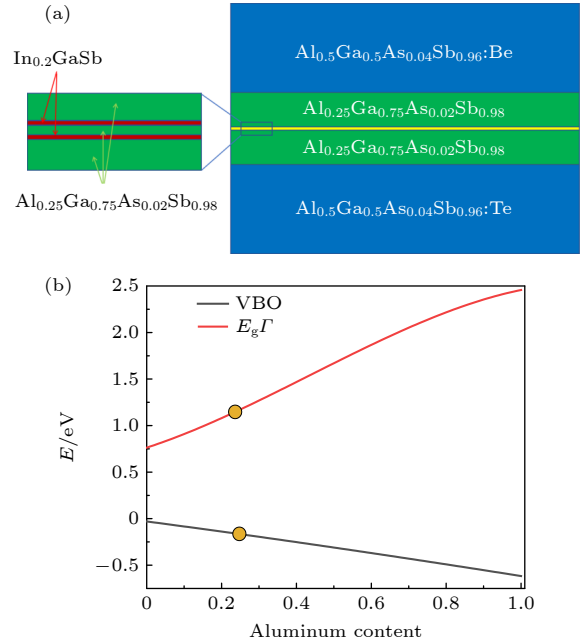


图 1 (a) InGaSb/AlGaAsSb 量子阱激光器外延结构示意图; (b) 与 GaSb 晶格匹配的 AlGaAsSb 中 Al 组分与能带关系
Fig. 1. (a) Schematic diagram of the epitaxial structure of InGaSb/AlGaAsSb quantum well laser; (b) relationship between Al composition and band structure in AlGaAsSb lattice-matched to GaSb.

图 2(b) 红色曲线为样品的 HRXRD 测试结果, 绿色曲线为仿真结果, 图中 x 轴零点对应 GaSb 的衍射峰, 角度偏差 +76 $^{\circ}$ 与 +192 $^{\circ}$ 的衍射峰则对应 AlGaAsSb 波导层与限制层, 发生偏差的原因是生长过程中 As 束流略大于设计值, 但是由于角度

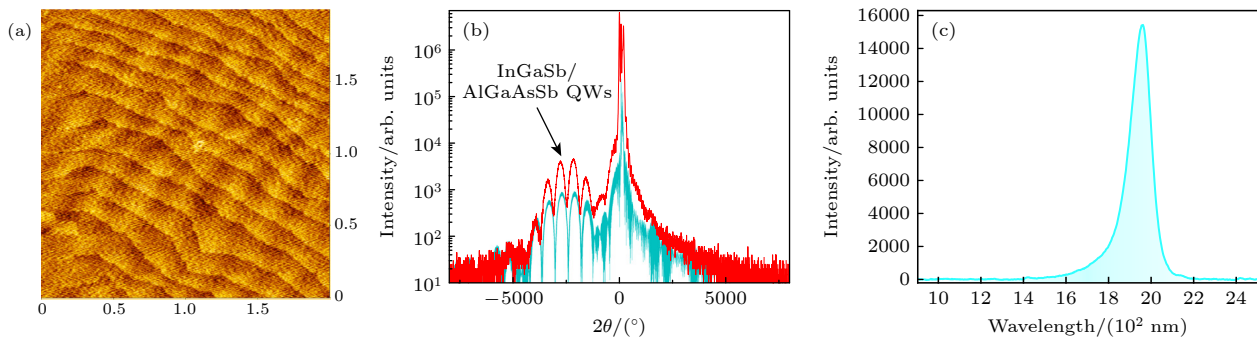


图 2 激光器外延片 (a) AFM 测试结果; (b) HRXRD 测试结果; (c) PL 测试结果
Fig. 2. (a) AFM results, (b) HRXRD results, (c) PL results of the epitaxial wafer.

偏差在 200 nm 以内, 且衍射峰呈低半高宽高强度状态, 可以认为 AlGaAsSb 为单晶状态, 且由于 As 组分波动对于材料能带结构影响极小, 波导层的能带参数可以沿用图 1(b) 的计算结果; 图中左侧的衍射峰对应 InGaSb/AlGaAsSb 双量子阱, 由于势垒层能够为量子阱提供足够的价带带阶差, 本样品的量子阱中没有掺入 As 元素.

PL 测试中的泵浦光采用波长为 1064 nm 的连续激光光源, 测试结果如图 2(c) 所示. InGaSb/AlGaAsSb 双量子阱 PL 峰波长为 1960 nm, 且将 GaSb 在 1.7 μm 处的 PL 峰掩盖, 证明了量子阱极高的发光效率, 经计算 InGaSb 层的禁带宽度为 0.633 eV.

器件的 PIV 测试结果如图 3(a) 所示, 通过反向延长线性段的 $I-V$ 关系, 可知激光器的开启电压约为 0.63 V, 对应激光器粒子数反转所需的准费米能级差 [25]. 激光器阈值电流为 0.2 A, 激光时的电压为 ~0.78 V, 且在增大注入电流至 0.8 A 过程中, 斜率效率没有发生热饱和, 因此在 DLTS 测试中采用 1.1 V 以下的正向脉冲电压是安全的. 图 3 插图图为激光器在 0.8 A 工作电流下的光谱, 激光波长为 1975 nm, 略大于 PL 测试波长的原因是激光器在电注入情况下有源区受热发生波长红移, 铽化物激光器红移变化率的经验参数是 20 nm/A [26]. 但是在 DLTS 测试中样品温度被严格控制并且脉冲电压宽度为毫秒量级, 可以忽略其热效应, 故而还是采用 PL 测试得到的数值作为量子阱禁带宽度计算依据. 图 3(b) 展示了激光器在 87 K 下测得的 $C-V$ 曲线以及基于此计算的表现载流子浓度轮廓, 由于多界面串联电容均对总电容有贡献, 直接根据 $C-V$ 曲线定位下波导层耗尽层边界位置存在一定困难, 但是在 0.5—0.6 V 电压区间内观察到表现载流子浓度显著提升, 对应耗尽层扫过禁带宽度更窄的量子阱区域.

DLTS 测试中样品被施加偏置电压 U_r , 得到所需的 pN+ 结中的耗尽区宽度, 随后一个脉冲宽度为 t_p 、电压为 U_p 的正向脉冲信号被施加到样品两侧, 样品内建电场重新分布且耗尽区宽度降低, 原先处于耗尽区中的缺陷态被填充; 随着脉冲电压被撤销, 捕获了载流子的缺陷态通过发射载流子重新回到热平衡状态, 导致样品的电容发生迟滞于电场的瞬态行为, 基于撤销脉冲电压 U_p 之后的电容瞬态曲线可以反推出发生载流子发射行为的缺陷态

密度、能级和俘获面积等参数. 图 4 展示了脉冲电压转为偏置电压后激光器内部能带与载流子的再分布, 这一过程通常持续纳秒量级, 之后被填充的量子阱等深能级缺陷通过热激发使空间电荷进一步变化, 并导致总电容的变化, 这一过程会持续毫秒量级.

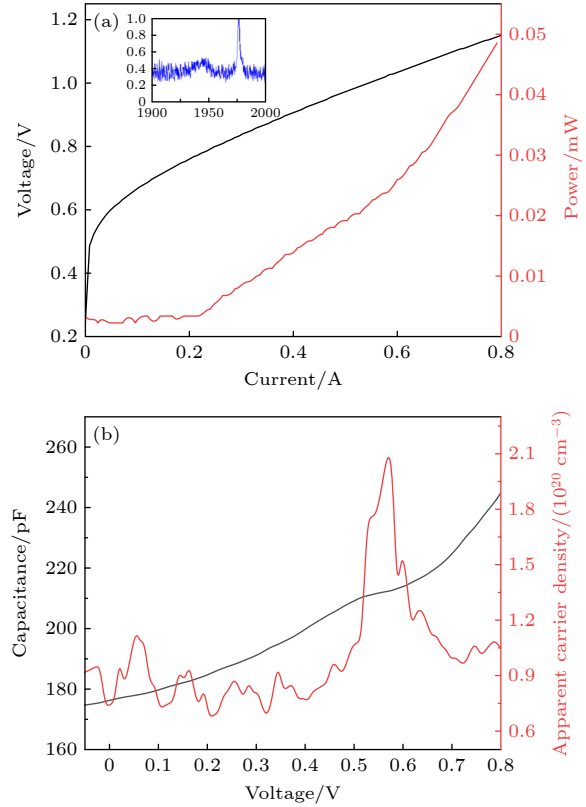


图 3 (a) 激光器的 PIV 测试结果与 0.8 A 下光谱; (b) 激光器的 $C-V$ 测试结果与表现载流子浓度
Fig. 3. (a) PIV results and spectrum at 0.8 A operation current of the laser; (b) PIV results and apparent carrier density profile of the laser.

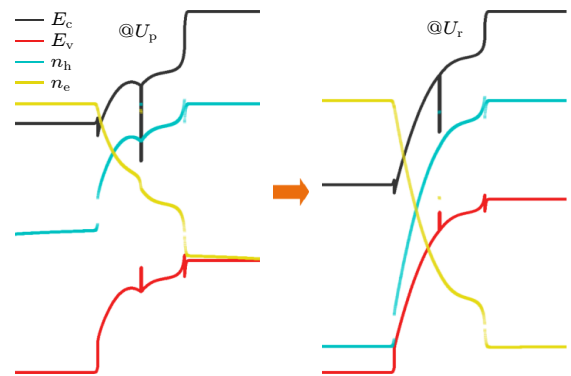


图 4 脉冲电压与偏置电压下激光器中能带与载流子分布示意图
Fig. 4. Schematic diagram of energy bands and carrier distribution in a laser under pulsed voltage and bias voltage.

DLTS 测试的基础公式即:

$$\ln(\tau \cdot T^2) = \frac{\Delta E}{kT} - \ln(\gamma\sigma), \quad (1)$$

其中, τ 为缺陷发射载流子的时间常数, T 为样品温度, ΔE 为缺陷态载流子激活能, σ 为缺陷的俘获面积. 传统 DLTS 通过改变率窗 (rate window) 得到温度 T 与时间常数 τ 之间的关系, 从而根据 Arrhenius 拟合得到缺陷参数. DLTFS 则对电容的瞬态曲线进行离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT), 并得到系数 $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots$, 基于固定时间常数 τ 假设, 可以通过傅里叶系数直接计算出该电容瞬态所对应的 τ . DLTFS 不需要反复变温或者切换率窗, 且对测试数据的利用率也更高, 在测试效率和精度上要明显优于传统 DLTS 技术.

图 5(a) 展示了在 U_r 偏压为 -0.1 V 情况下, DLTS 测试结果随脉冲电压 U_p 的变化关系, 实验中的 T_w 被固定为 10.24 ms, 脉冲宽度 t_p 固定为 1 ms. 当脉冲电压小于 0.6 V 时难以观察到收敛的电容瞬态曲线, 此时载流子不能有效填充 AlGaAsSb 波导层中的载流子捕获/发射中心, 即 InGaSb/AlGaAsSb 量子阱. 从激光器工作角度考察, 大于 0.7 V 的脉冲电压使得量子阱中的费米能级发生钉扎, 注入其中的载流子快速复合, 在脉冲电压被撤销后, 处于弱 p 型区的量子阱作为电子陷阱在 200 K 附近形成了正向的少子 b_1 峰. 在 -0.1 V 的固定 U_r 偏压下, 该电子发射峰对应的 b_1 数值稳定在 1.2 — 1.25 pF, Arrhenius 拟合结果同样表现出极好的稳定性, 图 5(b) 展示了脉冲电压为 0.7 — 1.2 V 的 6 组数据的 Arrhenius 拟合结果, 可知缺陷能级位置位于导带底下方 0.33 — 0.35 eV, 缺陷态密度为 2.90×10^{18} — 2.95×10^{18} cm^{-3} , 俘获面积为 1.7×10^{-14} — 3.0×10^{-14} cm^2 . 基于 PL 测试得到的室温下量子阱材料禁带宽度, 结合温度相对材料禁带宽度的负相关系数, 将 200 K 下无应变 InGaSb 材料的导带底位置修正为 0.645 eV. 同样的修正在 AlGaAsSb 上也是必需的, 事实上图 1(b) 展示的就是其在 200 K 下的能带图, 因此 DLTS 测试得到压应变下 InGaSb 量子阱的导带底位置为 0.654 eV, 即压应变导致 InGaSb 材料导带向上偏移了 0.009 eV. 结合图 1(b) 的数据, 可以推算量子阱与 AlGaAsSb 波导层的价带带阶差为 0.156 eV. InGaSb/AlGaAsSb 量子阱的导带带阶差是价带带阶差的约 2 倍, 随着激光器工作波长的提升量子阱

能带下移, 空穴限制不足的问题会进一步暴露, 提升价带带阶差将会是铽化物激光器波长拓展需要解决的一大问题. 另外, 需要说明的是在晶格匹配生长条件下 As 组分可能发生 1% 以内的偏移, 这将对上述价带带阶计算结果引入最大 ± 0.005 eV 的误差.

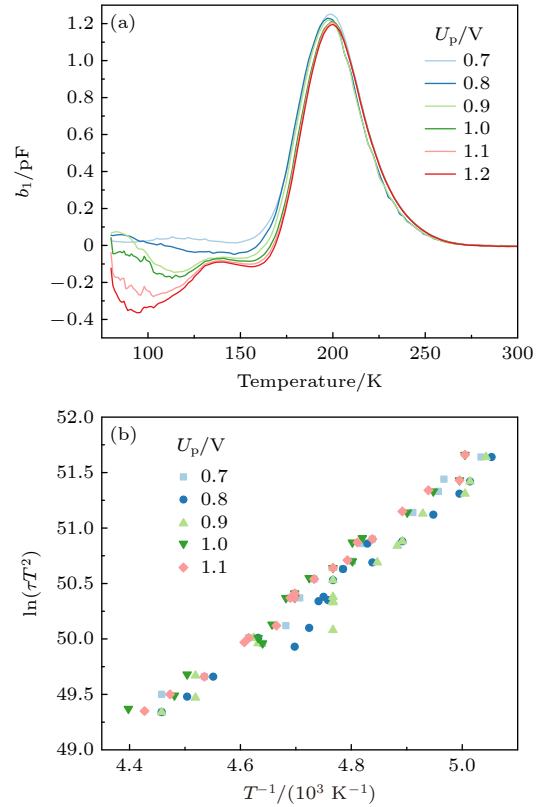


图 5 (a) 0.7 — 1.1 V 脉冲电压下的 DLTFS 信号, 偏置电压为 -0.1 V, 脉冲宽度 1 ms; (b) 0.7 — 1.1 V 脉冲电压的少子峰 Arrhenius 拟合曲线
Fig. 5. (a) DLTFS b_1 signals at 0.7 — 1.1 V pulse voltage with a bias voltage of -0.1 V and a pulse width of 1 ms; (b) Arrhenius fitting curve of the minority carrier peak at 0.7 — 1.1 V pulse voltage.

另外注意到, 随着脉冲电压的增大, 在更低的温度观察到了负向的 b_1 信号峰, 且强度随着脉冲电压的增大而增强, 但是在 -0.1 V 偏压下较难形成有效的 Arrhenius 拟合. 为此我们分别在 -0.4 , -0.2 , -0.1 , 0.01 , 0.1 , 0.2 , 0.4 V 的偏压下测试了具有 0.8 V 和 1.1 V 脉冲高度激发下的 DLTS 数据, 脉冲宽度保持 1 ms, 测试结果分别在图 6(a), (b) 中展示. 可以看到随着偏置电压转向正向电子陷阱的信号峰强度降低, 在 0.4 V 时信号峰几乎消失, 此时可以认为耗尽区边界已经靠近量子阱. 另外, 负向的多子峰需要在 1.1 V 的大脉冲电压下才能得到较为稳定的拟合曲线, 并且随着耗尽区靠近

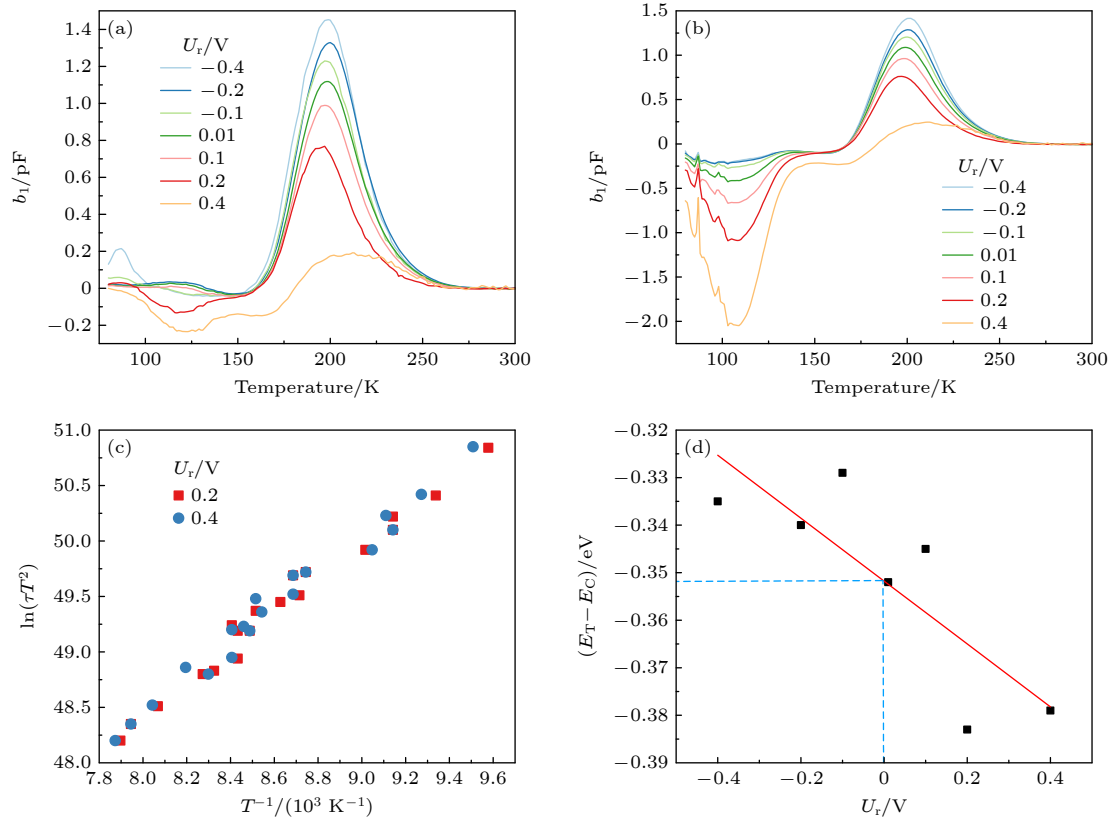


图 6 (a) $-0.4\sim 0.4$ V 偏置电压下的 DLTS 信号, 脉冲电压为 0.8 V, 脉冲宽度 1 ms; (b) $-0.4\sim 0.4$ V 偏置电压下的 DLTS 信号, 脉冲电压为 1.1 V, 脉冲宽度 1 ms; (c) 0.2 与 0.4 V 偏置电压的多子峰 Arrhenius 拟合曲线; (d) $-0.4\sim 0.4$ V 偏置电压下测得的电子陷阱能级位置, 脉冲电压为 0.8 V, 脉冲宽度 1 ms

Fig. 6. (a) DLTS signals under a bias voltage range of $-0.4\sim 0.4$ V, with a pulse voltage of 0.8 V and a pulse width of 1 ms; (b) DLTS signals under a bias voltage range of $-0.4\sim 0.4$ V, with a pulse voltage of 1.1 V and a pulse width of 1 ms; (c) Arrhenius fitting curves of majority carrier peaks at bias voltages of 0.2 V and 0.4 V; (d) energy level positions of electron traps measured under a bias voltage range of $-0.4\sim 0.4$ V, with a pulse voltage of 0.8 V and a pulse width of 1 ms.

量子阱而增强, 说明该多子峰信号可能是来源于 p 型限制层注入空穴在波导层中被空穴陷阱发射. 基于图 6(c) 所示多子峰拟合曲线可知其在价带上方 ~ 0.13 eV 处, 俘获面积为 $1.9\times 10^{-16}\sim 2.2\times 10^{-16}$ cm², 缺陷浓度为 $2.71\times 10^{18}\sim 4.26\times 10^{18}$ cm⁻³, 这一数值与前面计算的价带带阶差十分接近, 偏差值可能来源于是压应变下量子阱禁带宽度的增加. 另外图 6(d) 中展示了不同偏置电压下测得电子陷阱的能级位置, 随着电子激活能表现出与正向偏置电压的正相关性, 可能是量子阱位于空间电荷区的内建电场中导致的能带弯曲^[27]. 为与 PL 测试结果相匹配, 我们采信 0.01 V 偏置电压下得到的激活能, 这也是上文中采用 0.352 eV 导带带阶差的原因.

4 结 论

本文通过深能级瞬态谱技术与光致发光测试相结合的方法, 表征了碲化物 InGaSb/AlGaAsSb

量子阱激光器的能带结构. 其中, DLTS 测试直接测得器件导带带阶差为 0.352 eV, 结合 PL 测试结果进一步计算得出价带带阶差 0.156 eV. 在 DLTS 测试过程中, 观测到两类特征信号峰: 其一为少子信号峰, 经分析确认对量子阱在波导层中的电子陷阱, 该陷阱的俘获面积范围为 $1.7\times 10^{-14}\sim 3.0\times 10^{-14}$ cm², 缺陷密度为 $2.90\times 10^{18}\sim 2.95\times 10^{18}$ cm⁻³; 其二为多子信号峰, 该信号峰出现在 150 K 附近, 其激活能为 0.13 eV, 俘获面积与缺陷密度分别为 $1.89\times 10^{-16}\sim 2.16\times 10^{-16}$ cm² 和 $2.71\times 10^{18}\sim 4.26\times 10^{18}$ cm⁻³, 推测该多子信号峰与量子阱的空穴发射过程相关. 上述研究结果为该类碲化物激光器的能带优化设计与缺陷抑制提供了关键实验依据.

参考文献

- [1] Wang J J, Wang G, Tan T, Zhu G D, Sun C, Cao Z, Chen

- W, Gao X 2019 *Opt. Express* **27** 9610
- [2] Zhang Y, Yang C A, Shang J M, Chen Y H, Wang T F, Zhang Y, Xu Y Q, Liu B, Niu Z C 2021 *Chin. Phys. B* **30** 094204
- [3] Fried N M, Murray K E 2005 *J. Endourol.* **19** 25
- [4] Frayssinous C, Fortin V, Bérubé J P, Fraser A, Vallée R 2018 *J. Mater. Process. Tech.* **252** 813
- [5] Shterengas L, Liang R, Kipshidze G, Honda T, Belenky G, Bowman S S, Tober R L 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 161112
- [6] Liu J M, Yang J, Zhao Y W, Yang C A, Jiang D W, Niu Z C 2024 *J. Synth. Cryst.* **53** 1 (in Chinese) [刘京明, 杨俊, 赵友文, 杨成奥, 蒋洞微, 牛智川 2024 人工晶体学报 **53** 1]
- [7] Yu H G, Yang C A, Chen Y H, et al. 2025 *J. Alloy. Compd.* **1031** 181093
- [8] Xie S W, Zhang Y, Yang C A, et al. 2019 *Chin. Phys. B* **28** 014208
- [9] Yang C A, Xie S W, Zhang Y, et al. 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 021102
- [10] Shterengas L, Kipshidze G, Stein A, Lee W J, Liu R Y, Belenky G 2025 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **31** 1
- [11] Wang T F, Yang C A, Chen Y H, et al. 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 021102
- [12] Shi J M, Chen Y H, Yu H G, et al. 2025 *Opt. Express* **33** 8941
- [13] Wei J C, Lin S J, Geng Z Q, et al. 2025 *Photonics Res.* **13** 2913
- [14] Zhao Y H, Yuan S J, Kou D X, et al. 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 12717
- [15] Ingebrigtsen M E, Kuznetsov A Y, Svensson B G, et al. 2019 *APL Mater.* **7** 022510
- [16] Lee I H, Polyakov A Y, Smirnov N B, et al. 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 192107
- [17] Zenari M, Buffolo M, De S C, et al. 2021 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** 285101
- [18] Chretien O, Apetz R, Vescan L, Souifi A, Luth H, Schmalz K, Koulmann J J 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 5439
- [19] Piva F, De S C, Buffolo M, et al. 2020 *Microelectron. Reliab.* **114** 113786
- [20] Dehimi S, Dehimi L, Mebarki B, Pezzimenti F 2021 *J. Comput. Electron.* **20** 426
- [21] Meneghini M, de Santi C, Trivellin N, Orita K, Takigawa S, Tanaka T, Ueda D, Meneghesso G, Zanoni E 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 093506
- [22] Monti D, Meneghini M, De S C, Bojarska A, Perlin P, Meneghesso G, Zanoni E 2018 *Microelectron. Reliab.* **20** 426
- [23] Matthews J W, B lakeslee A E 1974 *Cryst. Growth* **27** 118
- [24] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R 2001 *Appl. Phys.* **89** 5815
- [25] Xie Q H, Van Nostrand J E, Jones R L, Sizelove J, Look D C 1999 *Cryst. Growth* **207** 255
- [26] Wang W F, Cheng K Y, Wu M C, Hsieh K C 2018 *Solid-State Electron.* **149** 15
- [27] Chen Y H, Yang C A, Wang T F, et al. 2023 *Appl. Sci. - Basel* **13** 5506

SPECIAL TOPIC—Semiconductor physics and devices

Characterization of band discontinuity in InGaSb/AlGaAsSb quantum well lasers based on deep level transient spectroscopy*

CHEN Yihang¹⁾²⁾ SHI Jianmei¹⁾²⁾ GENG Zhengqi¹⁾ CAO Juntian¹⁾²⁾
 WEN Haoran¹⁾ ZHANG Enquan¹⁾²⁾ LI Zongyi¹⁾²⁾ ZHONG Yunxiang¹⁾
 ZHANG Qizhi¹⁾ WU Donghai¹⁾²⁾ XU Yingqiang¹⁾²⁾ NI Haiqiao¹⁾²⁾
 YANG Chengao^{1)2)†} NIU Zhichuan^{1)2)‡}

1) (State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

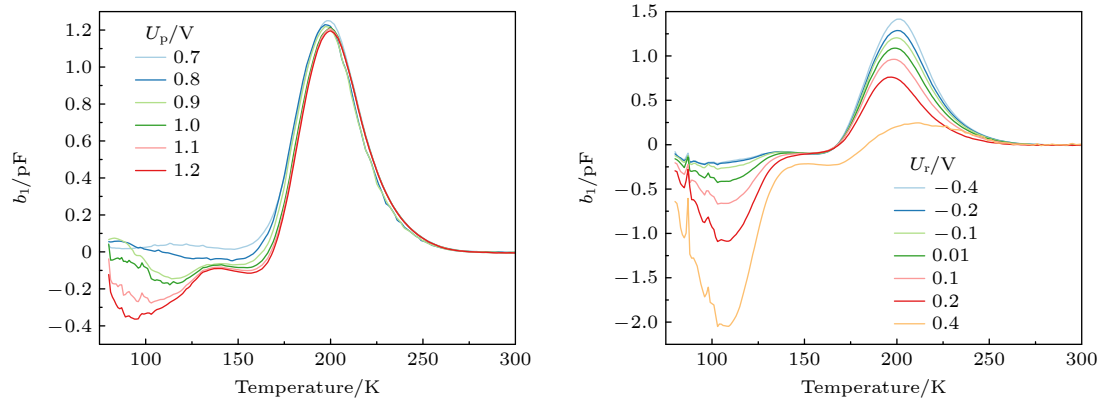
2) (School of Materials Science and Optoelectronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 10 December 2025; revised manuscript received 26 January 2026)

Abstract

Antimonide-based optoelectronic devices are pivotal for compact, high-efficiency light sources in the 2–4 μm mid-infrared range, driving advancements in gas sensing and laser medical technologies. The rapid development of novel antimonide lasers, however, faces a critical bottleneck: the lack of experimental data on strain-induced band offsets in key structures like InGaSb/AlGaAsSb quantum wells, which is essential for accurate device

design. This study addresses this gap by employing a combined approach of deep level transient spectroscopy (DLTS) and photoluminescence (PL) to experimentally determine the band discontinuities in such quantum wells. High-quality epitaxial wafers, verified by atomic force microscopy, high-resolution X-ray diffraction, and PL for surface morphology, crystallinity, and emission wavelength, were processed into lasers. Packaged devices were characterized for P - I - V curves and lasing wavelength before undergoing DLTS in a high-vacuum (1×10^{-5} Torr), variable-temperature (85–300 K) system with a high-sensitivity capacitance meter (0.01 fF, 2 μ s sampling). Our core innovation lies in directly measuring the conduction band offset via DLTS to be 0.352 eV. Combining this with the PL-determined transition energy yielded a valence band offset of 0.156 eV. Beyond band offsets, DLTS revealed critical defect properties: a minority carrier peak was identified as electron traps in the waveguide layer (capture cross-section: 1.7×10^{-14} – 3.0×10^{-14} cm²; density: 2.90×10^{18} – 2.95×10^{18} cm⁻³). A majority carrier peak near 150 K (activation energy: 0.13 eV; capture cross-section: 1.9×10^{-16} – 2.2×10^{-16} cm²; density: 2.71×10^{18} – 4.26×10^{18} cm⁻³) is attributed to hole emission from the quantum wells. This work provides the first direct experimental determination of critical band parameters and simultaneously characterizes key defect states, furnishing indispensable data for band engineering and defect suppression in next-generation antimonide lasers.



Keywords: antimonide, laser, deep level transient spectroscopy (DLTS), quantum well

DOI: [10.7498/aps.75.20251699](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251699)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251699](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251699)

* Project supported by the Beijing Nova Program, China (Grant No. 20240484621), the Chinese Academy of Sciences Project for Young Scientists in Basic Research (Grant No. YSBR-112), and "Announce the list and take charge" of the Major Special Plan of Science and Technology in Shanxi Province, China (Grant No. 202201030201009).

† Corresponding author. E-mail: yangchengao@semi.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: niuzc@semi.ac.cn

基于深能级瞬态谱的InGaSb/AlGaAsSb量子阱激光器能带不连续性表征

陈益航 石建美 耿峥琦 曹钧天 闻皓冉 张恩泉 李宗裔 钟云翔 张启智 吴东海 徐应强 倪海桥 杨成奥 牛智川

Characterization of band discontinuity in InGaSb/AlGaAsSb quantum well lasers based on deep level transient spectroscopy

CHEN Yihang SHI Jianmei GENG Zhengqi CAO Juntian WEN Haoran ZHANG Enquan LI Zongyi
ZHONG Yunxiang ZHANG Qizhi WU Donghai XU Yingqiang NI Haiqiao YANG Chengao NIU
Zhichuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 080403 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251699

CSTR: 32037.14.aps.75.20251699

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251699>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于可饱和吸收体锁模激光器中的呼吸子

Breathers in mode-locked lasers based on saturable absorbers

物理学报. 2025, 74(4): 044206 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241505>

直接液体冷却薄片激光器中抽运光均匀性对光束波前畸变的影响

Influence of pumping light uniformity on laser wavefront aberration in direct-liquid-cooled thin-disk laser

物理学报. 2022, 71(5): 054202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211811>

全保偏光频梳系统的研制与噪声特性优化

Development and noise characterization optimization of a fully polarization-maintaining optical frequency comb

物理学报. 2026, 75(5): 054202 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251553>

拓扑激子绝缘体的实验进展

Experimental progress of topological exciton insulators

物理学报. 2023, 72(17): 177101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230634>

中子辐射导致的SiC功率器件漏电增加特性研究

Study on characteristics of neutron-induced leakage current increase for SiC power devices

物理学报. 2023, 72(18): 186102 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230976>

GHz重复频率亚百飞秒克尔透镜锁模Yb:CaYAlO₄激光器

Sub-100 fs Kerr-lens mode-locked femtosecond Yb:CaYAlO₄ laser with GHz repetition rate

物理学报. 2023, 72(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222297>