

# In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As/InP 的正向和反向异质结 在带隙附近的不同的光谱现象\*

吴洋<sup>1)</sup> 胡晓<sup>1)</sup> 刘博文<sup>2)</sup> 顾溢<sup>2)†</sup> 查访星<sup>1)‡</sup>

1) (上海大学物理系, 上海 200444)

2) (中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

(2023 年 8 月 17 日收到; 2023 年 10 月 17 日收到修改稿)

应用光电导谱 (PC) 和光致发光谱 (PL) 研究了由分子束外延在 InP(100) 衬底上生长 In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 获得的两种异质结外延结构, 分别是在 InP 衬底上生长 InAlAs 形成的正向异质结样品 (样品 A: In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As/InP) 和 InAlAs 层继续生长 InP 形成的上层为反向异质结的双异质结样品 (样品 B: InP/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As/InP). PL 和 PC 实验采用光从表面入射激发的测量构型, 样品测量温度为 77 K. 样品 A 的 PC 谱显示, 在激发光能量大于表面 In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 层的带隙时出现了电导陡降的反常变化, 还在 916 nm 波长处呈现一小的电导峰结构. PL 谱对应此波长位置则出现很强的发光峰. 样品 B 则未观察到上述光谱特征, 该差异可从两类异质结不同的界面电子结构获得解释.

**关键词:** 半导体光谱, 半导体界面, 光电导, 光致发光

**PACS:** 78.55.Cr, 78.56.-a, 73.61.Ey, 73.40.-c

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231339

## 1 引言

In<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As/InP 是应用人工半导体生长技术构建电子和光电子器件的重要结构之一. 尤其是晶格匹配的 In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As/InP 异质结被广泛应用于构建红外和太赫兹器件、量子级联激光器、单电子雪崩二极管以及高电子迁移率晶体管 (HEMTs) 等<sup>[1-5]</sup>. 众所周知, 异质结界面结构及其电子性质对器件性能有着至关重要的影响. InAlAs/InP 异质结界面性质一直是长期受到关注且比较复杂材料生长和器件物理问题<sup>[6]</sup>. 例如异质结的外延生长中常常伴随着界面处 As/P 原子的交换和 In, As 原子的自聚团簇效应, 这导致其界面光谱现象具有复杂性而其产生机制也有不同的观点<sup>[7-17]</sup>.

在 InAlAs/InP 的界面研究中, 一个引起较多关注的现象是 InP 衬底或缓冲层上生长 InAlAs 形成的所谓正向生长异质结构和在 InAlAs 外延层上生长 InP 形成的反向异质结构的差异性问题. InAlAs/InP 理论上被认为属于 II 型异质结, 不过其界面发光现象并不具备典型的 II 型异质结发光特征<sup>[9-11]</sup>. 对于典型 II 型异质结而言, 由于其电子和空穴分别束缚在界面两侧, 光生载流子注入会诱导较强界面电场效应, 从而引起界面势阱能级明显抬升, 导致随着激发增强发光峰位出现明显蓝移的现象, 但 InAlAs/InP 的界面发光现象则未呈现上述特征<sup>[9-11]</sup>. 有关于 In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As/InP 光致发光研究的文献观察到, 生长条件的调控会导致界面处形成几个原子层厚的 InAs 势阱或 InAlP 势垒层<sup>[9-11]</sup>. 近年来关于 InAlAs/InP 的界面研究揭示反向

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61874069) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [guyi@mail.sitp.ac.cn](mailto:guyi@mail.sitp.ac.cn)

‡ 通信作者. E-mail: [fxzha@shu.edu.cn](mailto:fxzha@shu.edu.cn)

生长界面实际是 In/As/P 组分渐变的势阱结构模型<sup>[14-17]</sup>.

迄今关于 InAlAs/InP 异质结的界面性质的认识大多来自光致发光 (PL) 实验. 很多实验都表明, 界面二维电子气对其光学性质有着不可忽视的影响. 众所周知, 具有高载流子浓度、高迁移率的界面二维电子气 (2DEG) 对半导体电学性质有着极其敏感的影响. 光电导谱 (PC) 是将光激发和载流子输运特性紧密结合的表征手段<sup>[18]</sup>, 将不同方法结合起来有助于对界面光谱特征的起源获得更明确的认识. 我们注意到迄今 PC 关于 InAlAs/InP 异质结界面电子性质的研究工作尚不多见. 本工作应用 PC 研究了 InAlAs/InP 正向和反向异质结, 发现二者呈现很大不同, 其差异反映了二者明显不同的界面电子结构性质. 通过结合 PL 谱测量并与 PC 数据比较分析, 阐明反向异质结所呈现的近 InP 带边的 916 nm 发光峰起源于界面电子与价带空穴的复合发光.

## 2 实验

实验使用的两组 InAlAs/InP 异质结样品均是采用分子束外延法 (MBE) 技术在 InP(100) 衬底上生长的. 第一组样品 (样品 A) 是在 InP 衬底上直接生长了 2  $\mu\text{m}$  厚的  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  层, 它与衬底形成单一的正向生长异质结, 记为  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$ . 另一组样品 (样品 B) 是在上面样品的基础上进而生长 2  $\mu\text{m}$  厚 InP 覆盖层形成的 InP/ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$  双异质结样品, 其中上异质结相对于前一种结构被称为反向异质结. 由于样品 B 外延层较厚, 从本工作的测量结果可看到, 样品 B 界面光学性质主要由反向异质结主导.

对于进行光电导实验的样品, 采用电子束蒸发 Ge/Ni/Au 在样品表面形成欧姆接触的金属电极. PC 和 PL 实验时将样品置于液氮温度的低温杜瓦内. 光谱测量使用的是 Zolix- $\lambda 3017$  光栅光谱仪. 图 1 给出了光电导谱测量光路示意图. 实验使用的白光光源是 150 W 溴钨灯. 经光栅光谱仪分光后的单色光通过平行光管准直和凸透镜调节形成在样品表面覆盖于两电极区域的光斑. 如图 1 的内插图所示, 样品与一固定电阻  $R_0$  (10 k $\Omega$ ) 和一 3 V 直流电源串联形成闭合回路. 样品受到光照其电阻  $R_x$  发生改变, 对应的样品电导率的变化是通

过测量样品端电压的变化直接来反映的. 该电压测量是通过引出电极将电压信号输出到锁相放大器 (Stanford SR830) 并配合入射光路上的斩波器实现的. PL 使用 852 nm 半导体激光器作为激发光源. 该激发光只对 InP 激发带带跃迁而不激发 InAlAs 层, 故激发光对于样品 A 能有效穿透表层而对界面和下面的 InP 进行有效激发. PL 采用低温制冷 InGaAs 探测器. PL 光谱实验同样使用了 SR830 锁相放大器并配合斩波器进行发光信号的采集.

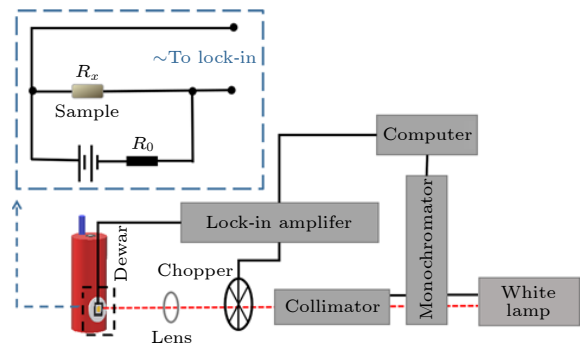


图 1 光电导谱实验光路图. 内插图示意性给出光电导信号取样电路

Fig. 1. The setup of photoconductive (PC) spectroscopy experiment. The inset is the schematic plot of electric circuit of sampling the PC signal.

## 3 结果与讨论

图 2(a) 和图 2(b) 分别给出的是正向异质结 (样品 A) 和反向异质结 (样品 B) 在液氮温度下的光电谱实验测量结果. 实验采用光从样品上表面入射的构型, 如图 2(c) 所示. 对于图 2(b) 所呈现的表层为 InP 覆盖层 (样品 B) 的光电导谱主要特征, 很容易从通常的半导体带带跃迁物理图像来解释, 即光子能量大于表层 InP 的带隙时激发光被 InP 层所吸收, 因此激发的光生载流子会使 InP 层电导骤增, 而出现光电导谱在 InP 带边 (约 1.41 eV) 附近阶跃式变化<sup>[18,19]</sup>.

图 2(b) 呈现的样品 B 在 InP 带边附近的光电导现象同样在样品 A 的 PC 谱测量中得以呈现. 如图 2(a) 所示, 当激发光子能量小于表层 InAlAs 带隙而大于 InP 带隙时, 激发光则主要引起 InP 层光生载流子增加, 而在 InP 带边附近观察到与图 2(b) PC 谱呈现的阶跃变化. 然而, 图 2(a) 和图 2(b) 展示的阶跃变化的光谱范围有所差异. 两

谱中阶跃起始点拐点能量均对应于 InP 的带隙 (1.41 eV), 而结束拐点能量分别在 1.373 eV (样品 A) 和 1.360 eV (样品 B). 样品 B 的能量展宽机制将在后文做进一步讨论. 容易注意到的是, 图 2(a) 中在表层 InAlAs 带边 (约 1.52 eV [18]) 附近, 在光子能量小于 InAlAs 带隙时有一电导率的骤然上升过程, 该现象看起来和前面关于 InP 附近光电导阶跃变化的产生机制似乎是矛盾的. 因为样品 A 表层是 InAlAs, 当光子能量从大到小 (波长从小到大) 扫过其能带带边时应观察到与类似图 2(b) 的随波长变小 (能量变大) 电导信号阶跃式下降的结果; 然而实际情况却是如图 2(a) 所展示的相反的情形.

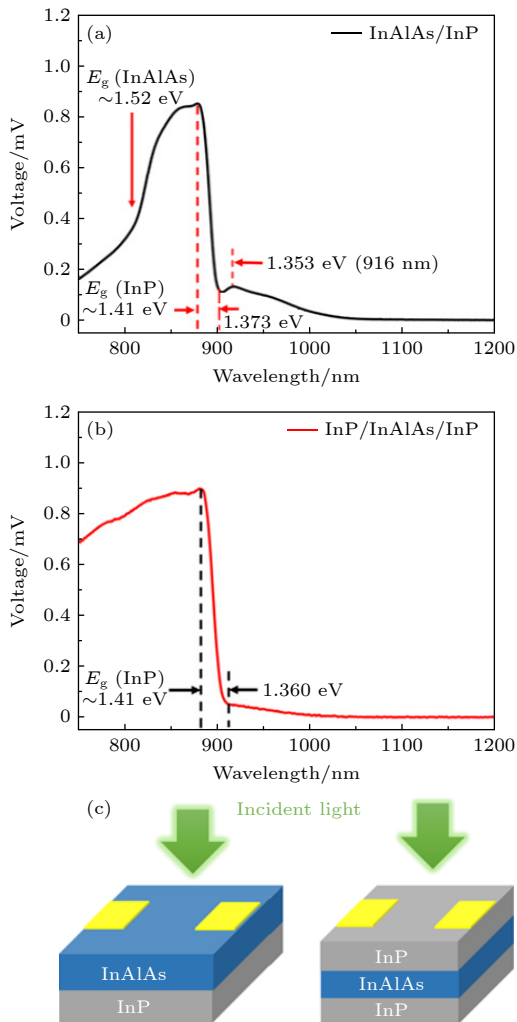


图 2 InAlAs/InP 的正向结构 (Sample A) (a) 和双异质结构 (Sample B) (b) 的 PC 实验结果; (c) 测量构型

Fig. 2. The PC measurement results of the normal heterostructure (Sample A) (a) and double heterostructure (Sample B) (b) of InAlAs/InP; (c) the schematic of measurement configuration.

要解释上述看似反常的光电导谱现象, 应考虑到所测量的样品为半导体多层异质结构. 尽管光电导采用的是图 2(c) 所示的电极与样品表层接触的测量构型, 光电导响应不仅来自表层, 还有界面层和下层体材料的电导贡献. 图 2(a) 和图 2(b) 虽然都在 InP 带边附近具有相同的光电导变化规律, 但注意到图 2(a) 中的样品 InP 并不处于表层, 这说明表层之下的其他外延层的光电导响应对测量结果的贡献是不可忽视的. 已有文献研究表明, 半导体多层异质结构的光电导还要计入界面二维电子气 (2DEG) 等多层结构因素对电导的贡献 [20]. 因此对于图 2(c) 所示结构, 样品 A 光电导信号可以写为

$$\sigma = c_1 \sigma_{\text{InAlAs}}^{3\text{D}}(\lambda) + c_2 \sigma_{\text{Interf}}^{2\text{DEG}}(\lambda) + c_3 \sigma_{\text{InP}}^{3\text{D}}(\lambda), \quad (1)$$

$\sigma_{\text{InAlAs}}^{3\text{D}}$ ,  $\sigma_{\text{Interf}}^{2\text{DEG}}$ ,  $\sigma_{\text{InP}}^{3\text{D}}$  分别为自上而下来自 InAlAs 层、界面 2DEG 和界面下层 InP 的电导贡献;  $c_1$ ,  $c_2$  和  $c_3$  作为唯相参数, 是反映因接触电阻、层间界面势垒等因素引起的电导率贡献的权重因子.

基于上述多层结构的光电导机制, 则对于前述样品 A 在 InAlAs 带边附近的反常光电导谱现象可给出如下解释. 由于原生态外延生长的 InAlAs 一般存在着较多缺陷 [21,22], 它们成为光生载流子的俘获或散射中心, 使得 InAlAs 层的光电导贡献明显被抑制, 即 (1) 式中第一项对光电导的贡献相就远不如后面两项来得重要. 另一方面, 当光子能量由低到高变化扫过 InAlAs 带边时, 却因 InAlAs 层对大于其带隙光子的吸收使得对 InP 层光激发产生突然的阻断效应, 导致 (1) 式其他两项光电导贡献骤降. 所以, 表层 InAlAs 尽管会因带带跃迁光吸收而能使该层电导有所增强, 但相对于 InAlAs 层光吸收引起的下层界面和 InP 层光电导的下降却为小量, 这样总的电导率在 InAlAs 带边附近就产生如图 1(b) 所示的阶跃式下降现象.

另外如图 2(a) 所示, 样品 A 在低于 InP 带边能量为 900—1000 nm 的区间有一肩峰结构. 同样的光谱范围, 样品 B 的光电导信号则很不明显, 尤其是样品 A 在 916 nm 出现明显的小峰结构并未在图 2(b) 给出的样品 B 的 PC 谱中呈现. 关于此小峰的起源, 或有人认为它来自外延层中的缺陷能级. 但是如果它起源于 InP 的体缺陷, 却未在样品 B 中探测到, 况且样品 B 中 InP 是样品表层. 如果它起源于 InAlAs 层缺陷, 由于 916 nm 光子能量

小于 InP 带隙, 即 InP 覆盖层对于该光子能量是透明的, 因此它对 InAlAs 层的电导影响应被探测到. 事实上该信号仅发生在样品 A 的 PC 谱中, 说明其起源应从样品 A 与样品 B 结构差异来分析. 而这个差异性存在于两样品界面结构的不同. 迄今关于 InAlAs/InP 异质结认为确实存在着正向界面和反向界面结构的不同<sup>[8-11]</sup>, 它是由两类界面生长时发生的 In-As-P 原子的不同扩散机制所导致. 结合现有文献关于 InAlAs/InP 正向界面和反向界面电子结构的描述<sup>[7-14,16]</sup>, 在图 3 中示意性地绘出样品 A 和样品 B 的能带图, 分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 其中图 3(b) 反映出界面处 As/P 原子互扩散形成了 As-P 组分阶梯型渐变的界面过渡层.

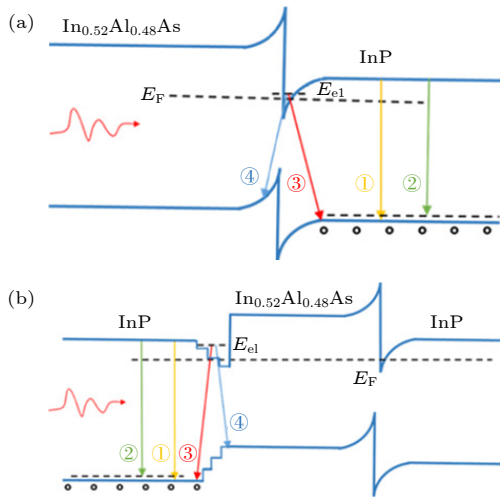


图 3 (a) InAlAs/InP 正向界面结构和 (b) InP/InAlAs/InP 双异质界面结构能带图  
 Fig. 3. The energy band diagrams of (a) InAlAs/InP heterostructure with the normal interface and (b) InP/InAlAs/InP double heterostructure.

基于上述界面电子结构, 对于 InAlAs/InP 在 InP 带边附近的发光过程, 可以总结为如图 3(a) 和图 3(b) 所示的几类情形: ①带带跃迁; ②导带-带间受主态复合; ③ 2DEG 与价带空穴复合; ④ 2DEG 与界面束缚空穴以及 2DEG 界面缺陷态的复合. 为了对前面给出的 PC 光谱结果进行进一步的理解和分析, 对样品 A 和 B 还分别进行了 77 K 温度下的 PL 光谱测量. PL 采用 852 nm 波长激光激发. 由于该波长能量介于 InAlAs 和 InP 带隙之间, 故它只激发 InP 层而不激发 InAlAs 层. 参考关于 In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As/InP 已有的 PL 研究文献报道, 上述情形④所描述的发光现象的光谱范围一般处于 1000—1500 nm 范围, 而且发光强度比上

述过程①—③要弱近 2 个数量级, 也未在 PC 谱上观察到对应光跃迁过程. 关于此发光过程相关的 PL 谱特征和详细分析, 将另文专门报道阐述. 本文主要关注 850—1000 nm 范围的与 PC 谱具有直接对应关系的发光现象.

图 4 分别给出了样品 A (蓝色谱线) 和样品 B (红色谱线) 在 850—1000 nm 范围的 PL 测量结果. 激光激发功率为 7 mW. 可以看到, 样品 A 和 B 均有对应于 InP 带带跃迁 (880 nm) 的发光峰, 不过样品 B 的发光强度要远大于样品 A, 其机制我们稍后具体阐述. 首先注意到, 样品 A 在 916 nm 处出现了很强的发光峰, 其发光强度要明显大于同一样品 880 nm 处发光峰; 其次, 比较样品 A 与样品 B 的 880 nm 发光峰, 我们看到样品 A 的发光峰强度要明显弱很多. 另外, 样品 B 则在 904 nm 处还出现一小的肩峰结构. 关于带边附近的 904 nm 发光峰, 文献中认为来源于 InP 材料中导带电子与价带边阳离子受主的复合<sup>[9]</sup>. 该结构在样品 A 的 PL 谱并未呈现, 可能是如下原因: 因 904 nm 发光来自 InP 层的体缺陷, 对 A 样品而言, 表面下的 InP 发光需透过界面被探测. 因 A 样品存在能量较低的界面能级 (如 916 nm 发光能级), 则较短波长光子透过界面时会被吸收; 又因 904 nm 发光强度本来很弱, 还有界面反射损耗因素的影响, 所以该发光在样品 A 的 PL 谱中难以呈现.

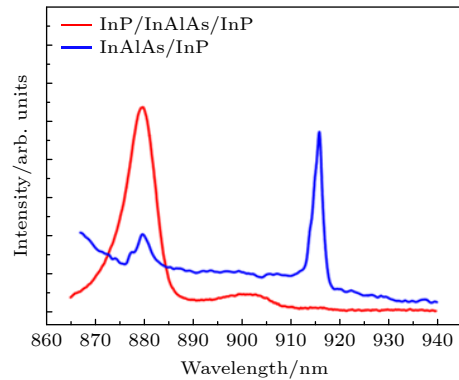


图 4 正向异质结样品和双异质结样品的 77 K 光致发光谱  
 Fig. 4. The PL spectra of normal heterostructure and double heterostructure samples measured at 77 K.

在半导体异质结界面 2DEG 参与的发光中, 除了上文指出的它与界面束缚空穴以及 2DEG 界面缺陷态的复合发光之外, 还存在着界面 2DEG 与同侧半导体 (此处为 InP) 价带空穴的复合发光

过程, 即图 3 所示的过程③, 类似发光过程在其他半导体异质结如 GaN/AlGaIn 结构的研究中同样存在 [23]. 该发光能量一般低于导带-价带跃迁复合能量, 在图 4 中对于正向异质结样品 A 所观察到的 916 nm 发光可归因于这一机制.

对于样品 A 所观察到的上述能量发光, 为何在样品 B 的 PL 谱上未呈现呢? 这个问题可作如下解释: 对于 InP 带边附近来自界面 2DEG 和界面处价带空穴的复合发光, 发光能量受到界面能带弯曲产生的束缚势阱深度的影响. 样品 B 的反向界面通常被认为具有 In-As-P 组分渐变的结构特征 [7,14-16], 该组分变化不仅可引入能量分布较宽的带尾态, 而且较之正向界面, 它对界面电子形成较弱的势阱束缚, 其激发态束缚能级更接近体材料导带底, 导致界面电子与价带空穴的复合能量趋近带带跃迁. 二者叠加会使得 880 nm 波长发光明显增强. 另外, 较浅的束缚势阱使得 2DEG 电子波函数向体内更加扩展, 可使与价带空穴复合发光的振子强度显著增大. 综合这上述因素, 可以说明图 4 中样品 B 比样品 A 的 880 nm 发光峰的明显增强以及同时展现较大的半峰宽. 此外, 上述物理图像对于前面提到的图 2(a) 和图 2(b) InP 带边附近光电导下降沿的不同展宽也给出了自洽的解释. 后者显示能量展宽有 13 meV 的增幅, 可认为来自带尾态及能量与之接近的 2DEG 的混合产生的. 对于正向结构, 2DEG 势阱能级与较窄的 InP 带尾态有明显的能量分离, 而由前者导致的带边下降沿就比反向异质结情形变窄了.

## 4 结 论

综上所述, 本工作应用 PC 和 PL 谱对  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$  和  $\text{InP}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$  两种异质结构在低温下进行了表征. 观察到  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$  反向异质结样品在光子能量大于  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  带隙时电导率下降的反常现象, 需从光照对多层结构光电导影响的角度对上述现象进行解释. 另外, 正向结构的 PC 谱测量观察到的 916 nm 电导峰, 且对应此波长在 PL 谱也产生很强的发光峰. 该光谱归因于界面势阱能级与 InP 价带空穴的复合发光. 该光谱结构却未在出现于反向异质结样品, 暗示了后者不同的界面特性; 可基于反向界面的 In-

As-P 组分渐变的结构模型来理解. 该界面特点是很大程度上降低了界面能带弯曲效应, 使得界面 2DEG 界面约束效应减弱而能量上也更接近体的带带跃迁复合能. 本工作 PC 和 PL 相互参照的表征分析也为界面光谱结构的澄清提供了有效的研究方法.

感谢韩超同学对部分实验测量工作给予的帮助.

## 参考文献

- [1] Burstein L, Shapira Y, Bennett B R, Alamo J A D 1996 *J. Appl. Phys.* **78** 7163
- [2] Holthoff E L, Heaps D A, Pellegrino P M 2010 *IEEE Sens. J.* **10** 572
- [3] Demir I, Elagoz S 2017 *Superlattices Microstruct.* **104** 140
- [4] Ramirez D A, Hayat M M, Karve G, Campbell J C, Teich M. C 2005 *IEEE Leos Meeting Conference. IEEE Sydney NSW Australia, October 22-28, 2005* p387
- [5] Hellara J, Hassen F, Maaref H, Souliere V, Monteil Y 2003 *Physica E* **17** 229
- [6] Yerino C D, Liang B, Huffaker D L, Simmonds P J, Lee M L, 2017 *J. Vac. Sci. Technol., B* **35** 010801
- [7] Hellara J, Hassen F, Maaref H, Souliere V, Monteil Y 2002 *Mater Sci. Eng., C* **21** 231
- [8] Bohrer J, Krost A, Heitz R, Heinrichsdorff F, Eekey L, Bimberg D, Cerva H 1997 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1072
- [9] Vignaud D, Wallart X, Mollot F, Sermage B 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 2138
- [10] Vignaud D, Wallart X, Mollot F 1998 *J. Appl. Phys.* **76** 2324
- [11] Duez V, Vanbeisien O, Lippens D, Vignaud D, Wallart X, Mollot F 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 2202
- [12] Pocas L C, Duarte J L, Dias I F L, Laureto E, Lourenco S A, Filho, Toginho D O, Meneses E A, Mazzaro I, Harmand J C 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 8999
- [13] Gocalinska A M, Mura E E, Manganaro M, Juska G, Pelucchi E 2020 *Phys. Rev. B* **101** 165310
- [14] Smiri B, Fraj I, Saidi F, Mghaieth R, Maaref H 2018 *J. Alloys Compd.* **736** 29
- [15] Esmailpour H, Whiteside V R, Hirst L C, Tischler J G, Walters R J, Sellers I R 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 235301
- [16] Smiri B, Fraj I, Saidi F, Mghaieth R, Maaref H 2019 *Appl. Phys. A* **125** 134
- [17] Smiri B, Fraj I, Saidi F, Mghaieth R, Maaref H 2020 *J. Appl. Phys.* **59** 022001
- [18] Madelung O 2004 *Semiconductors: Data Handbook* (1st Ed.) (New York: Springer-Heidelberg Press) p139
- [19] Gong B, Zha F X, 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 013105
- [20] Hurd C M, McAlister S P, McKinnon W R, Stewart B R, Day D J, Mandeville P, SpringThorpe A J 1988 *J. Appl. Phys.* **63** 4706
- [21] Meng X, Tan C H, Dimler S, David J P R, Ng J S 2014 *Opt. Express* **22** 22608
- [22] Gilinsky A M, Dmitriev D V, Toropov A I, Zhuravlev K S 2017 *Semicond. Sci. Technol.* **32** 095009
- [23] Bergman J P, Lundstrom T, Monemar B, Amano H, Akasaki I 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 3456

# Different spectral features near the energy bandgaps of normal and inverse heterostructures of $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}^*$

Wu Yang<sup>1)</sup> Hu Xiao<sup>1)</sup> Liu Bo-Wen<sup>2)</sup> Gu Yi<sup>2)†</sup> Zha Fang-Xing<sup>1)‡</sup>

1) (*Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

2) (*Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

( Received 17 August 2023; revised manuscript received 17 October 2023 )

## Abstract

Photoconductivity (PC) spectroscopy and photoluminescence (PL) spectroscopy were used to characterize two heterostructure configurations of  $\text{InAlAs}/\text{InP}$  grown by molecular beam epitaxy (MBE) on the  $\text{InP}$  (100) substrate. The sample A is the type called normal heterostructure, which has an  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  layer grown on  $\text{InP}$ , while sample B is called the inverse type formed by an  $\text{InP}$  cap layer on  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ . The front excitation was employed in both PC experiment and PL experiment and the measurements were conducted at 77 K. The PC spectrum of sample A shows an abnormal step-like drop when the photon energy is larger than the energy band gap of  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ . The phenomenon implies that the conductance of sample is a multilayer effect including the contribution of interfacial two-dimensional electron gas (2DEG). Moreover, a conductance peak is observed at 916 nm below the bandgap of  $\text{InP}$ . Accordingly, an intense luminescent peak at the wavelength manifests in the PL spectrum. The origin of the 916 nm peak is attributed to the recombination of 2DEG electrons with the valence band holes excited near the interface. However, the spectral feature of the above energy does not exist in both PC and PL spectra of sample B. This difference may be explained by the different interface electronic structures of the inverse interface. For the latter case, considering that a graded variation in In-As-P composition is related to the inverse interface of  $\text{InP}/\text{InAlAs}$ , the band bending effect should be weak. In such a case, the bound energy of 2DEG in the interface potential well is raised closer to the conductance band of the bulk. Consequently, the recombination energy of 2DEG at the inverse interface with the holes in the valence band is close to the band-to-band transition of  $\text{InP}$  bulk and the luminescence is difficult to be distinguished from that of bulk  $\text{InP}$ . The work also demonstrates that the comparative study with both PC technique and PL technique is helpful to provide a full insight into the interface electronic property.

**Keywords:** semiconductor spectroscopy, semiconductor interface, photoconductance, photoluminescence

**PACS:** 78.55.Cr, 78.56.-a, 73.61.Ey, 73.40.-c

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231339

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61874069).

† Corresponding author. E-mail: [guyi@mail.sitp.ac.cn](mailto:guyi@mail.sitp.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [fxzha@shu.edu.cn](mailto:fxzha@shu.edu.cn)



$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$ 的正向和反向异质结在带隙附近的不同的光谱现象

吴洋 胡晓 刘博文 顾溢 查访星

Different spectral features near the energy bandgaps of normal and inverse heterostructures of  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$

Wu Yang Hu Xiao Liu Bo-Wen Gu Yi Zha Fang-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 027801 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231339

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231339>

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

本征富受主型ZnO微米管光致发光的温度调控机制

Thermal regulation mechanism of photoluminescence in intrinsic acceptor-rich ZnO microtube  
物理学报. 2020, 69(19): 197701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200655>

Al纳米颗粒表面等离激元对ZnO光致发光增强的研究

Enhancement of photoluminescence from zinc oxide by aluminum nanoparticle surface plasmon  
物理学报. 2019, 68(10): 107301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190062>

基于p-n结中反常光电转换现象的新型带间跃迁量子阱红外探测器

Anomalous light-to-electricity conversion of low dimensional semiconductor in p-n junction and interband transition quantum well infrared detector  
物理学报. 2018, 67(12): 128101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180588>

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米材料的尺寸调控与光致发光特性

Size Regulation and Photoluminescence Properties of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  Nanomaterials  
物理学报. 2020, 69(10): 108102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200158>

$\text{K}_x\text{Na}_{1-x}\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 铁电体的光致发光和应力发光性能

Properties of Photoluminescence and mechanoluminescence of  $\text{K}_x\text{Na}_{1-x}\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$  ferroelectric  
物理学报. 2022, 71(16): 167801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220501>

$\text{CuPc}/\text{MoS}_2$ 范德瓦耳斯异质结荧光特性

Photoluminescence properties of  $\text{CuPc}/\text{MoS}_2$  van der Waals heterostructure  
物理学报. 2022, 71(12): 128103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220132>