

InGaAs/InGaAsP/InP 等异质结构体材料 最窄能带隙的实验确定

丁国庆

(武汉邮电科学研究院 武汉 430074)

(1998 年 9 月 8 日收到;1999 年 2 月 3 日收到修改稿)

报道了几种典型的光压谱(PVS)和光荧光谱(PLS),比较了 PVS 中吸收边 E_a 和 PLS 中峰能值 E_p 的关系,分析指出,最窄能带隙 $E_g = E_p - \frac{1}{2}KT = E_a$,理论分析和实验结果一致.讨论了异质材料多重结的 PVS 问题.

PACC: 7125T; 7820J; 7855

1 引 言

长波长光纤通信系统中采用的光电子器件大多是 InP 系列多薄层异质结构材料制作的.这种多薄层材料中最窄能量隙晶层通常作为有源层(或称作用层、活性层).就其厚度来说,多薄层异质结构材料可分为异质结构体材料和量子阱/超晶格材料.异质结构体材料有源层的能带隙基本上决定了激光波长(DFB-LD 除外).因此有源层带隙的精确控制是十分重要的.然而,由于各种原因,外延生长的异质材料实际能带隙常常偏离实验设计值或工艺参数计算值.利用光荧光谱(PLS)和光压谱(PVS)进行理论分析,可以非破坏性地获得被测材料实际最窄带隙的信息.这对减少后工艺制作浪费,提高器件经济效益是很有意义的.

本文将报告 PVS 和 PLS 的几种材料的典型测试结果,分析 PVS 中吸收边 E_a 和 PLS 中 E_p 与最窄能隙 E_g 的数量关系;对照和比较它们的异同点.最后讨论经常遇到的异质材料多重结的 PVS 问题.

2 PVS 测试原理和实验结果

2.1 测试原理和设备

PVS 测试原理基于被测半导体异质材料/电化学腐蚀液界面形成的类肖特基结光生电压特性.当通入适当波长的光时,被测材料吸收光而产生非平衡电子-空穴对.这些非平衡载流子通过扩散和漂移而达到势垒区边界时,便会产生附加的光生电压.我

们假定只存在一个简单的半导体/腐蚀液类肖特基结.当通入能量大于材料带隙的可见光后,在势垒两边产生的附加光生电压 V_{ph} 为

$$V_{ph} = \frac{KT}{e} \ln \left(1 + \frac{J_{ph}}{J_s} \right). \quad (1)$$

这里 J_s 为反向饱和电流密度, J_{ph} 为短路光生电流,且有^[1]

$$J_{ph} = K\eta\phi_0 \left\{ \int_0^W \alpha(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x} dx + \int_W^\infty \alpha(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)(L+x-W)} dx \right\} \\ = K_1\eta\phi_0 \left[1 - \frac{e^{-\alpha(\lambda)W}}{1 + \alpha(\lambda)L} \right]. \quad (2)$$

这里 η, ϕ_0, L, W 分别为光量子效率,光通量密度,载流子扩散长度和耗尽区宽度, $\alpha(\lambda)$ 为光吸收系数.假定 $J_{ph}/J_s \gg 1, \alpha(\lambda)x < 1$, 则(1)式为

$$V_{ph} \approx \frac{KT}{e} \ln \left\{ \frac{K_1\eta\phi_0}{J_s} \left[1 - \frac{e^{-\alpha(\lambda)W}}{1 + \alpha(\lambda)L} \right] \right\} \\ \approx \frac{KT}{e} \ln \left[\frac{K_1\eta\phi_0}{J_s} \alpha(\lambda)(L+W) \right] \\ \propto \phi_0 \alpha(\lambda)(L+W). \quad (3)$$

(3)式中, K_1, η, T, L, W 与波长无关或是波长 λ 的缓变函数;而 $\alpha(\lambda)$ 在材料吸收边附近,数量急剧变化.对直接带隙材料吸收边,当光能变化 50 meV 左右时, $\alpha(\lambda)$ 可变化 2—4 个数量级.这就是光电子材料低能吸收边的特点. PVS 中确定的低能吸收边 $E_a(\lambda)$ 就是基于 $\alpha(\lambda)$ 的阶跃变化. $E_a(\lambda)$ 定义为 PVS 中曲线急剧变化部分的半高点处^[4].

PVS 测试设备 PN4350 为电化学 C-V 仪 PN4300 的附件.它和 C-V 测试可交替进行.该设备主要由稳定化光源、单色器(包括球面镜、滤色片、斩光器、耦合透镜、狭缝、凹面光栅等)、传输光纤、样品台和计算站等组成.

2.2 几个典型的 PVS

英国 EPI 公司的 InGaAs/InP 体材料的 PVS 如图 1.

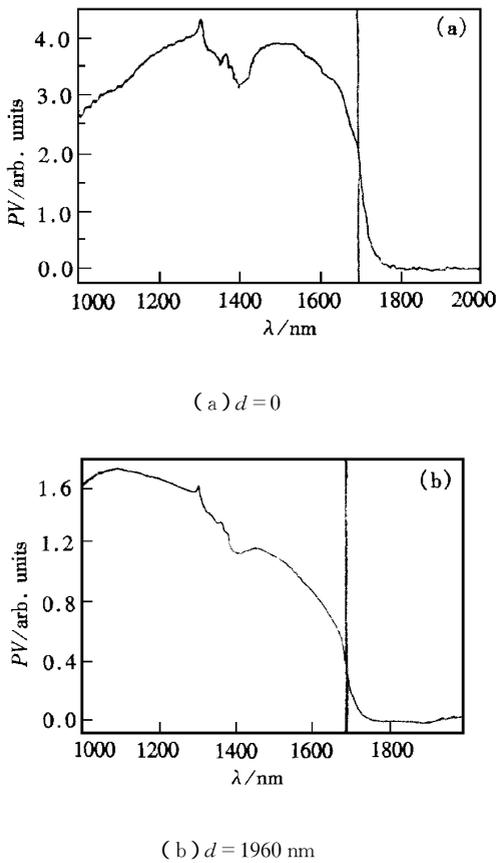


图 1 EPI 公司的 InGaAs/InP 材料的 PVS

图 1 被测材料结构为 :InGaAs(200 nm)/InP (500 nm)/InGaAs(2000 nm)/InP 缓冲层及衬底. 在图 1(a) 中 , 腐蚀深度 $d=0$, 吸收边 $\lambda_a=1699$ nm , $E_a=0.730$ eV ; 图 1(b) 中 , 当 $d=1960$ nm 时 , $\lambda_a=1692$ nm , $E_a=0.733$ eV. 说明第一层 InGaAs(200 nm 厚) 和第三层 InGaAs(2000 nm 厚) 吸收边 E_a 仅相差 3 meV.

武汉电信器件公司生产的 InGaAsP(1)/InGaAsP(2)/InP 异质结构材料 , 其 PVS 如图 2.

图 2(a) 表明 , 当 $d=0$ 时 , 仅出现一吸收边 $E_a=1.068$ eV , $\lambda_a=1160$ nm ; 图 2(b) 中 , $d=1340$ nm 时 , 有两个吸收边 , 分别为 $\lambda_{a1}=1280$ nm , $E_{a1}=0.969$ eV , $\lambda_{a2}=1160$ nm , $E_{a2}=1.068$ eV. 这里要说明的是 , 由于入射光谱范围为 1000 nm 至 2000 nm , 所以图中 $\lambda < 950$ nm 时 , PV 强度突变为 0. 如图 2 右边所示.

内部含深 p-n 结异质结构体材料的 PVS. 采用 LPE 技术制作的 n-InGaAs(3500 nm)/n-InP/p-InP

缓冲层/p-InP 衬底外延材料 , 在不同深度 d 处的 PVS 如图 3 所示.

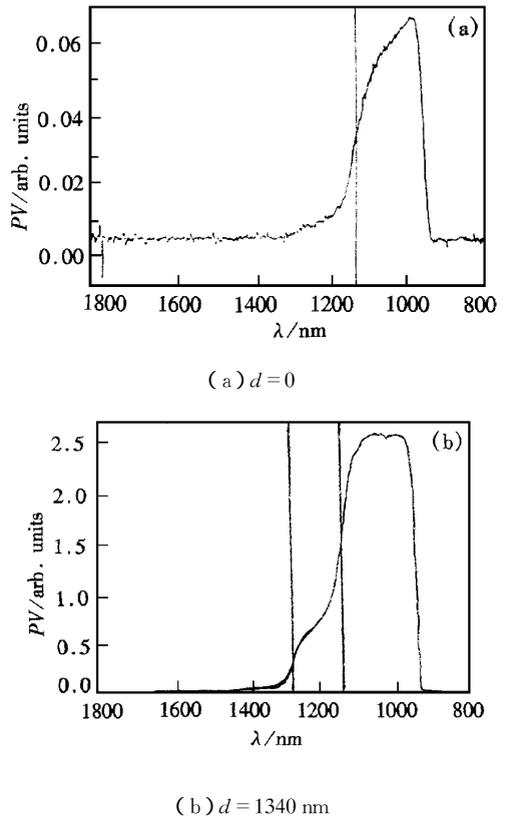


图 2 InGaAsP(1)/InGaAsP(2)/InP 材料的 PVS

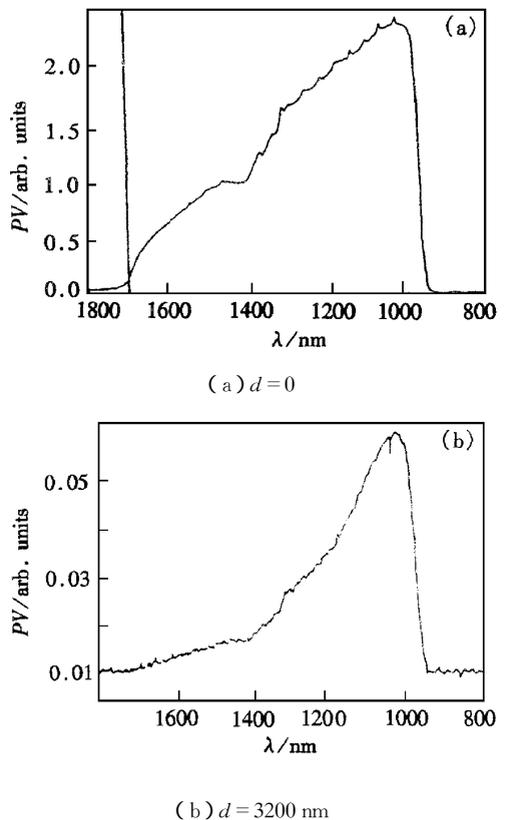


图 3 含深 p-n 结 InGaAs/n-InP/p-InP 的 PVS

图 3 表明,内含深 p-n 结的异质材料,其 PVS 呈大范围倾斜状.图 3(a)在 $\lambda = 1685 \text{ nm}$, $E = 0.736 \text{ eV}$ 处有较明显的吸收边,它反映了 InGaAs 层的光吸收情形,而在图 3(b)中,PVS 无明显吸收边跃变,这可能与内部深含 p-n 结影响有关.

3 PLS 测试设备与测试结果

PLS 也可提供异质结构材料中最窄能带隙的信息.它的测试原理是基于光激发下被测材料的自发发射谱^[2].

PLS 测试设备为快速傅里叶变换荧光光谱仪 PL6120.它主要由 488 nm 或 514 nm 氩离子气体激光器,655 nm 氦氖参考激光器,迈克尔逊干涉仪,样品室,Ge 探测器,计算站,密闭氦气循环低温恒温槽组成.

3.1 高掺杂 n-InP 衬底材料和非故意掺杂 InGaAsP 的 PLS

室温下 n-InP 衬底和 InGaAsP 的 PLS 如图 4.

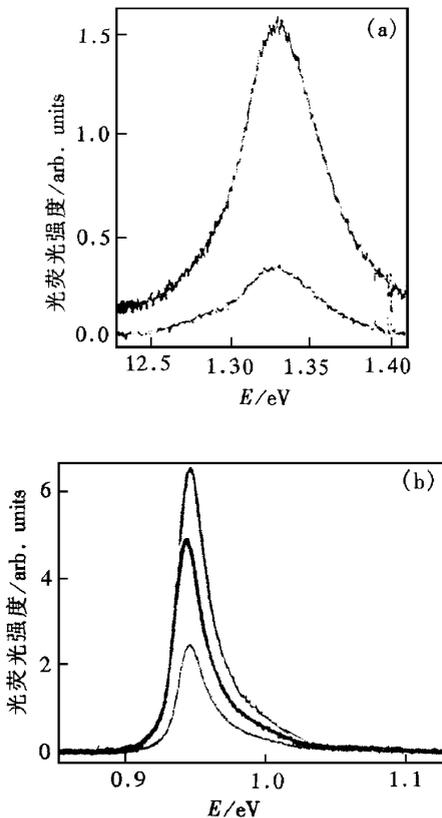


图 4 (a)n-InP 衬底材料和(b)InGaAsP 材料的 PLS

图 4(a)表明,室温下 n-InP 衬底材料的 PLS 峰能值 E_p 为 1.329 eV (b)中 InGaAsP 材料的峰能值

E_p 为 0.951 eV .图中几条曲线为同一外延片、相同入射光功率下不同测试点的 PLS 谱.几条曲线在 E_p 位置、曲线形状和半高全宽度(FWHM)、曲线光滑度几乎完全一致,说明波长均匀性好.

3.2 内含深 p-n 结异质结构材料的 PLS

为便于比较,把图 3 中被测的内含深 p-n 结的异质结构材料在室温,77 K,10 K 下的 PLS 如图 5 所示.室温下 E_p 为 0.749 eV ,而 77 K 和 10 K 下 E_p 分别为 0.793 eV 和 0.804 eV .

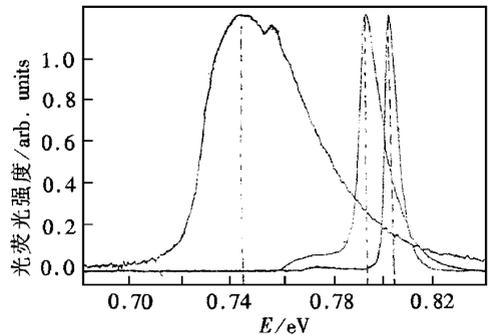


图 5 内含深 p-n 结 InGaAs/n-InP/p-InP 材料的 PLS

4 分析与讨论

4.1 PVS 吸收边 E_a 与 PLS 峰能值 E_p 比较

如前所述,PVS 基于材料的光吸收特性,而 PLS 基于材料的激光吸收——荧光自发发射特性.虽然它们都与能带隙 E_g 有关,但谱的形状及 E_a , E_p 值是有差别的.对相同材料和结构, E_a , E_p 比较如表 1.

表 1 几种典型材料之 E_a , E_p 比较

被测材料	E_a/eV	E_p/eV	$(E_p - E_a)/\text{meV}$
EPI 9602015	0.733	0.745	13
Eng-001	1.086	1.103	17
MOCVD-593	0.810	0.822	12
内含深 p-n 结的 InGaAs /n-InP/p-InP	0.736	0.749	13

表 1 说明,对相同组分结构的材料, E_p 比 E_a 均大 13 meV 左右.

4.2 E_a , E_p 与 E_g 之关系

(3)式表明,PVS 中突变区主要取决于光吸收系数 $\alpha(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$ 可表示为^[2]

$$\alpha(\lambda) = \frac{2}{3\pi} \cdot \frac{(2m_r^*)^{3/2} e^2}{\eta h^2 \epsilon_0 m_e^*} f_{vc} (h\nu - E_g)^{1/2}. \quad (4)$$

这里 f_{vc} 为与光跃迁概率 M_{cv} 有关的振子强度, 它是光波长的缓变函数; m_e^* , m_r^* 分别为电子有效质量及电子、空穴折合质量; ϵ_0 为真空电容率, h 为普朗克常数, ν 为光子频率. 当刚开始光吸收时, $\alpha(\lambda) \approx 0$, 那末, 据 (4) 式有

$$E_a = h\nu = E_g. \quad (5)$$

这里需要指出的是, PVS 实际上和光吸收谱 $\alpha(\lambda) \sim \lambda$ 还是有差别的^[3,4]. 如 (2) (3) 式所示, V_{ph} 不仅与 $\alpha(\lambda)$ 有关, 而且与 J_s, ϕ_0, W, L 等都有关. 对内含多重结、深 p-n 结或同型异质结材料, 其光电压 V_{ph} 表式是比较复杂的, 它将包含各个结的光生电压贡献. 当在两种异质材料界面附近显示 PVS 时, 跨越两种材料势垒区中的总光生电压, 与两种材料的组分、浓度等有关, 从而可能使吸收边跃变区不明显或者畸变. 如图 3(b) 所示.

E_a 的精确度与吸收边阶跃陡度有关. 对非故意掺杂的单一材料, 阶跃变化陡而窄, 如图 1 所示, E_a 比较精确; 对结构复杂或掺杂浓度较高 ($> 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 的材料, PVS 中吸收边通常较宽缓, E_a 不确定度, 可能大于 30 meV 或者找不到突变区 (如图 2(a), 图 3(b) 所示). 统计表明, E_a 的不确定一般在 5 至 35 meV 范围.

关于光荧光, 有多种可能的复合辐射机制^[5]. 但对室温下的体材料, 认为其荧光峰为最窄能隙材料带间本征辐射复合引起的. 根据半导体带间复合理论, 其自发发射速率 $R_{sp}(h\nu)$ 为

$$R_{sp}(h\nu) = -np\epsilon(h\nu, T) \cdot \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \cdot \left[\frac{(m_{r,h}^*)^{3/2} + (m_{r,l}^*)^{3/2}}{m_e^{*3/2} \cdot (m_{r,h}^{*3/2} + m_{r,l}^{*3/2})} \cdot (h\nu - E_g)^{1/2} - \exp\left(\frac{E_g - h\nu}{kT}\right) \right]. \quad (6)$$

这里

$$\alpha(h\nu, T) = \frac{2e^2}{m_e^{*2} \cdot A} \cdot \left(\frac{2\pi h^2}{kT}\right)^{3/2} |M_{cv}|^2 \eta h\nu. \quad (6')$$

这里 A 为光速, e 为电子电荷, M_{cv} 为量子跃迁矩阵元, η 为光量子效率, $h\nu$ 为光子能量, m_e^* , $m_{r,h}^*$, $m_{r,l}^*$ 分别为电子、重空穴、轻空穴有效质量, η, p 为自由电子、空穴浓度, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温标, h 为普朗克常数. 对 (6) 式求极值, 即当

$$\frac{dR_{sp}(h\nu)}{d(h\nu)} = 0 \quad (7)$$

有极值 E_p , 且可得

$$E_p = E_g + \frac{1}{2}kT. \quad (8)$$

当 $T = 300 \text{ K}$ 时, $\frac{1}{2}kT \approx 13 \text{ meV}$, 因而

$$E_p = E_g(\text{室温下}) + 13(\text{meV}). \quad (19)$$

这一分析结果和表 1 中实验值相一致.

PLS 中 E_p 的精确度远比 PVS 中 E_a 为高. 如果不计探测噪声, E_p 的不确定度可小于 2 meV; 如果计及叠加在有用信号上的噪声, E_p 的不确定度一般也小于 5 meV.

4.3 关于异质结构材料中多重结问题

PVS 测试中常遇到有多重结的材料. 所谓多重结, 即除了固/液界面的肖特基结外, 其内部还存在一个或多个同型异质结或同质异型结 (即 p-n 结). 这些结区电场或异质界面能带偏移将对光生非平衡载流子的分布和输运产生影响.

对多重结进行 PVS 理论上分析是非常困难的. 不仅结区势垒分布复杂, 而且尚需考虑异质界面能带偏移、界面复合和界面应力, 求解多个连续性方程将变得非常复杂, 而且对多个异质结, 边界条件很难确定. 从而很难求得光生附加电压 V_{ph} 的解析解. 即使有复杂的解析解, 其物理意义也不清晰. 因此, 只有简单材料结构的 PVS, 才有清晰的物理意义.

对于实测 PVS, 由于材料结构、层次顺序和结位置的不同, PVS 的强度、曲线形状、吸收边陡度是不同的. 对不含 p-n 结的多个异质结材料, 除窄带隙低能吸收边变化较陡峭外, 其他较宽带隙的吸收边一般都不明显. 对含有深 p-n 结的多异质结材料, 其 PVS 多呈大倾斜状; 表面高掺杂的多异质结材料, 将存在光生电压“死区”, 即 PVS 中无光压信号; 当固/液界肖特基结在两异质界面附近时, 其光压信号是两种材料光压信号的叠加, 从而可能使吸收边突变区不明显. 这些都是大量 PVS 测试的经验性结果. 由于牵涉因素很多, 如上所述, 其理论分析目前国内外尚未见报道.

5 结 论

1. PVS 和 PLS 都可提供异质材料中最窄能带隙的信息. 理论分析表明, $E_a = E_g$; 而 $E_p = E_g + \frac{1}{2}kT$. 理论分析和实验结果一致.

2. 实验表明, E_a 不确定度在 5 meV 至 35 meV 范围, 而 E_p 的不确定度一般小于 5 meV, 因而 PLS

确定的 E_g 比 PVS 确定的 E_g 精确.

3. 实验表明,对于不含 p-n 结、只含多重异质结的材料,在光作用区和载流子扩散长度范围内,一般在 PVS 和 PLS 中可以找到相应最窄能带隙的有用信息,而对其较宽带隙材料层,由于跃迁概率相差悬殊和相互竞争,PLS 中一般没有相应的荧光峰,而在 PVS 中也难于确定较宽隙的吸收边.当进行 PVS 测试且肖特基结在两异界面附近时,PVS 所反映的是两种材料光生电压的综合结果,一般难于精确确定材料的吸收边.

- [1] 尹长松,半导体器件物理(武汉大学出版社,武汉,1984),172 [Chang-shong Yin, Semiconductor Device Physics (the press of Wuhan University, Wuhan, 1984) p. 172 in Chinese].
- [2] 沈学础,半导体光学性质(科学出版社,北京,1992),108 [Xue-chu Shen, Optical properties of semiconductor(Science Press Beijing, 1992) p. 108 in Chinese].
- [3] M. T. Furtado, M. S. S. Lourai, A. C. Sachs, *J. Appl. Phys.* **62** (1987) 4926.
- [4] Instruction manual, PN4300 semiconductor profile plotter BIO-RAD Microscience Division, pp. 1-4, 1-7.
- [5] S. M. Olsthoorn, M. Driessen, L. J. Giling, *J. Appl. Phys.* **77** (1993), 7804.

THE TEST DETERMINATION FOR THE MOST NARROW BAND-GAP OF InGaAsP/InGaAs/InP HETEROSTRUCTURE BULK MATERIALS

DING GUO-QING

(Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications ,
the Ministry of Posts and Telecommunications , Wuhan 430074)

(Received 8 September 1998 ; revised manuscript received 3 February 1999)

ABSTRACT

Several typical photovoltage and photoluminescence spectroscopies are reported in this paper. The absorption edge E_a in photovoltage spectroscopy (PVS) and the peak energy value E_p in photoluminescence spectroscopy (PLS) are compared. It is indicated theoretically that $E_p = E_p + \frac{1}{2} kT$; the theoretical analysis is in good agreement with the measured results. The precision of E_a in PVS and E_p in PLS and the problem on the multijunction are discussed.

PACC : 7125T ; 7820J ; 7855