文章编号：1000-7032(2009)03-0309-05

晶格失配对 $InAs_xP_{1-x}$/InP 发光特性的影响

阎大伟[1,2]，宋 航[2*]，缪国庆[2]，于淑珍[1,2]，蒋 红[2]，
李志明[2]，刘 霞[1,2]，曹连振[1,2]，郭万国[1,2]，孙晓娟[2]
（1. 中国科学院激发态物理重点实验室，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院 研究生院，北京 100049）

摘要： 采用低压金属有机化学气相沉积(LP-MOCVD)技术，在掺Fe的半绝缘InP衬底上制备了 $InAs_{0.157}P_{0.843}$ 外延层。利用变温光致发光研究了 $InAs_{0.157}P_{0.843}$ 外延层在13～300 K温度范围内的发光特性，通过理论分析与计算，证实了在应力作用下 $InAs_{0.157}P_{0.843}$ 外延层价带顶的轻重空穴带发生了劈裂，并研究了导带底与价带顶轻空穴带之间形成的复合发光峰在应力作用下随温度的变化规律。

关 键 词： $InAs_xP_{1-x}$/InP；低压金属有机化学气相沉积；应力；变温光致发光
中图分类号： O482.31 **PACS：** 78.55.Cr **PACC：** 3250F；7855 **文献标识码：** A

1 引 言

InAsP/InP材料具有高迁移率、高吸光系数等优点，为制作1～3 μm近红外波段光电器件的重要材料。与InGaAsP材料相比，InAsP材料生长工艺简单，组分和厚度容易控制。由于InAsP更适于制作具有高特征温度的激光器[1]和高饱和功率的电吸收调制器[2]，因而受到了人们越来越多的关注。但是，因缺少与InAsP晶格相匹配的衬底材料，由晶格失配导致的应力不仅使得 $InAs_xP_{1-x}$ 外延层具有较高的缺陷密度，还会使其能带发生变化，严重影响器件的性能，这就使得研究晶格失配对InAsP材料的影响显得极为重要。关于应力对 $InAs_xP_{1-x}$/InP 量子阱能带结构的影响已有很多报道[3,4]，在应力作用下 $InAs_xP_{1-x}$ 材料价带顶的轻重空穴带发生了劈裂，其室温光致发光光谱出现两个发光峰，其中主发光峰为 $InAs_xP_{1-x}$ 材料导带底与价带顶重空穴带之间复合产生，另一发光峰为导带底与价带顶轻空穴带之间复合产生。

通过测量 $InAs_xP_{1-x}$/InP 异质结构在13～300 K温度范围内的变温光致发光光谱，发现样品在13～100 K温度范围内出现了两个主要的发光峰，但随着温度的升高在低能方向的发光峰逐渐减弱，当温度超过100 K时只能观察到高能方向的发光峰。我们利用温度和应力对能带影响的理论模型，对 $InAs_xP_{1-x}$/InP 异质结构发光特性在应力作用下随温度的变化进行了研究，并对得到的结果进行了分析。

2 实 验

实验中所用 $InAs_xP_{1-x}$/InP 样品采用低压金属有机化学气相沉积(LP-MOCVD)技术生长在掺Fe的半绝缘InP衬底上。以高纯 H_2 为载气，三甲基铟(TMIn)为Ⅲ族源，浓度为10%的砷烷(AsH_3)和浓度为10%的磷烷(PH_3)为Ⅴ族源。

生长室压力为10 kPa，生长温度为600 ℃。H_2 总流量为2 L/min，通入TMIn流量为180 sccm，AsH_3 流量为1.3 sccm，PH_3 流量为209 sccm，生长时间为1 h。通过XRD测量(Ricoh D/max-rA)，我们可得到实验中所用 $InAs_xP_{1-x}$ 样品的As组分，由扫描电子显微镜(Hitachi S-4800)观察断面可得到样品厚度。不同As组分的 $InAs_xP_{1-x}$ 样品可通过调节砷源(AsH_3)流量的方法得到。变温光致发光(PL)测量(Jobin Yvon-Labram Infinity)选用YAG激光器作激发光源，激发波长为355 nm，采用He循环改变样品温度，信号经单色仪分光

收稿日期： 2008-08-25；**修订日期：** 2008-11-24
基金项目： 国家自然科学基金重点(50632060)资助项目
作者简介： 阎大伟(1984－)，男，河南焦作人，主要从事Ⅲ-Ⅴ族半导体材料的研究。
E-mail：clever1984@sina.com
*：通讯联系人；E-mail：Songh@ciomp.ac.cn，Tel：(0431)84627073

后由 InGaAs 光电探测器接收。

3 结果与讨论

实验中所用 $InAs_xP_{1-x}$ 样品的 As 组分为 $x = 0.157$，外延层厚度约为 600 nm。为研究 $InAs_xP_{1-x}$ 样品的光学特性，我们测量了其在 13 K 的光致发光(PL)光谱，如图 1 所示。发现 13 K 时，在能量为 1.305 eV 的主发光峰高能方向还存在能量约为 1.323 eV 的较弱发光峰。较弱发光峰的出现我们认为是由于外延层与衬底间晶格失配产生的应力使得 $InAs_xP_{1-x}$ 外延层价带顶的轻重空穴带发生了劈裂，使样品出现了两个发光峰。

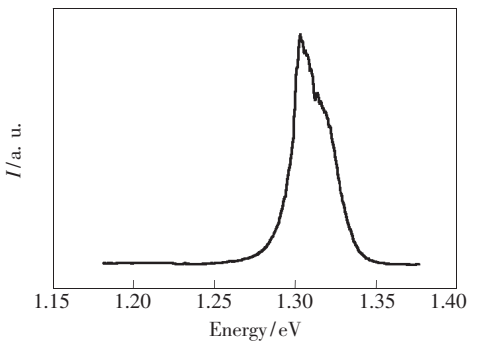

图 1 样品在 13 K 时的 PL 光谱

Fig. 1 Photoluminescence spectra of sample at 13 K

在半导体异质结构材料中，由于应力的作用使得价带顶轻重空穴带的简并性被破坏，使得在无应力状态下的禁带宽度 随着价带顶轻重空穴带的劈裂而变为 $E_g^{hh} = E_g + \Delta E^{hh}$ 和 $E_g^{lh} = E_g + \Delta E^{lh}$，其中 hh 与 lh 分别代表了重空穴与轻空穴。由于导带底与价带顶重空穴带之间复合为带边复合，因而我们只研究导带底与价带顶轻空穴带之间的复合，其变化关系可表示为[5,6]：

$$\Delta E^{lh} = \left(2A\frac{G_{11} - C_{12}}{C_{11}} + B\frac{C_{11} + 2C_{12}}{C_{11}}\right)\varepsilon$$

式中 A 和 B 为形变势常数，ε 为应变量，被定义为 $\varepsilon = (a_{InP} - a_{InAs_{0.157}P_{0.843}})/a_{InAs_{0.157}P_{0.843}}$[3]，其值可由 XRD 测量得到。$C_{11}$ 和 C_{12} 为弹性模量，由上式我们可得到 ΔE^{lh}。

由于弹性模量 C_{11} 和 C_{12} 为温度的函数，为进一步研究应力对能带的影响，我们测量了样品在 13～300 K 温度范围内的变温 PL 光谱，如图 2 所示。从图中可观察到，随着温度的升高，PL 的峰位向低能方向移动。在低温状态下(13～100 K)，两个发光峰都可观察到。但随着温度的继续升高，低能方向的发光峰逐渐减弱，只能观察到高能方向的发光峰。

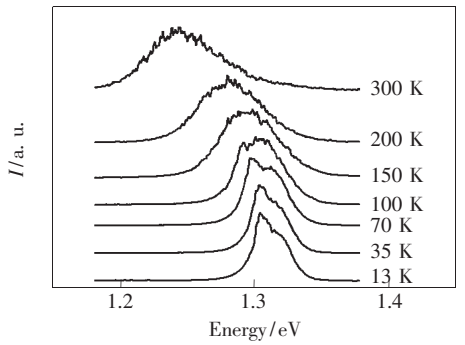

图 2 样品光致发光谱随温度的变化

Fig. 2 Photoluminescence spectra of sample at various temperatures

InP 体材料的禁带宽度随温度的变化可表示为：

$$E_g(T) = 1.421 - 4.9 \times 10^{-4}T^2/(T + 327)$$

C_{11} 和 C_{12} 是温度的函数，可表示为[7]：

$$C_{11}(\mathrm{dyn/cm^2}) = 1.076 \times 10^{12} - 1.397 \times 10^8\ T$$

$$C_{12}(\mathrm{dyn/cm^2}) = 6.080 \times 10^{11} - 8.344 \times 10^7\ T$$

InAs 体材料的禁带宽度随温度的变化可表示为[8]：

$$E_g(T) = 0.420 - 2.5 \times 10^{-4}T^2/(T + 75)$$

C_{11} 和 C_{12} 是温度的函数，可表示为[9]：

$$C_{11}(\mathrm{dyn/cm^2}) = 0.835 \times 10^{12} - 1.10 \times 10^8 T$$

$$C_{12}(\mathrm{dyn/cm^2}) = 0.454 \times 10^{12} - 0.43 \times 10^8 T$$

在此基础上由 Vegard 法则可以得到 InAsP 禁带宽度与弹性模量 C_{11} 和 C_{12} 的值。

$$\varepsilon = (a_{InP} - a_{InAs_{0.157}P_{0.843}})/a_{InAs_{0.157}P_{0.843}} = 0.005\,052,$$

在 300 K 时由 XRD 测量得到，这个值与 Zhao 等[3]报导的实验结果相近。已有文献证明外延层所受的应力有两个来源[10～12]，分别是外延层与衬底间的晶格失配和外延层与衬底间不同的热膨胀系数。外延层与衬底间的热膨胀系数在 80 K 附近时基本相等，当温度高于 80 K 后外延层与衬底间热膨胀系数的差别随着温度的升高而发生改变[3]，使得 ε 随之发生变化，但该变化很小，因而我们忽略它对 ε 的影响，并认为 ε 为不随温度变化的常数。其它参数都通过 Vegard 法则由 InP 和 InAs 的数据得到，计算所需参数如表 1 所示。

我们计算了 $E_g(T)$，发现其在 13～300 K 范围内的变化约为 70 meV，再利用方程 $E_g^{lh}(T) = E_g(T) + \Delta E^{lh}$ 得到了 E_g^{lh} 在 13～300 K 范围内的变

表 1　计算所需的常数

Table 1　Physical constants of InP and InAs for calculation

	A(eV)	B(eV)
InP	−8.0[8]	−1.70[14]
InAs	−6.9[13]	−1.80[15]

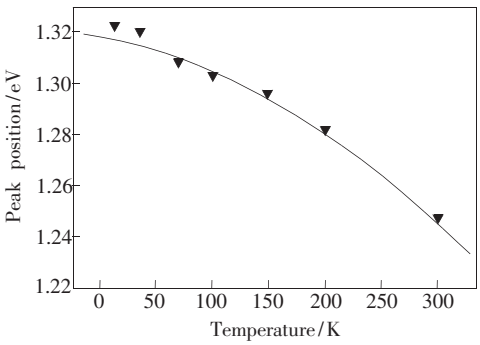

图 3　不同温度下 lh 发光峰位置，其中▲为 lh 发光的实验值，实线为理论计算值

Fig. 3　Peak position of lh emissioin under different temperature, ▲ represents experimental data of lh emissioin, the solid line represents theoretical calculation results.

化，如图 3 所示。我们发现 E_g^{lh} 的实验值与理论计算吻合良好。

由以上分析可知，外延层价带顶的轻重空穴带在应力的作用下发生了劈裂。当温度在 100 K 以下时观察到的两个发光峰是由导带底分别与价带顶重空穴带（E^{hh}）和价带顶轻空穴带（E^{lh}）之间的复合形成。随着温度的升高，低能端的发光峰消失而只能观察到高能方向的发光峰，这是由于导带底与价带顶轻空穴带（E^{lh}）之间的复合强度逐渐增加，当温度升高到 100 K 以上时，lh 发射的强度远远大于 hh 发射的强度，因而只能观察到 lh 发射。图 4 为 13 ~ 100 K 范围内导带底与价带顶轻重空穴带之间复合发射强度的比值 I^{lh}/I^{hh}。

在 InP/GaAs 体系材料中也观察到了同样的现象[16]，产生这种现象的原因是随着温度的升高，

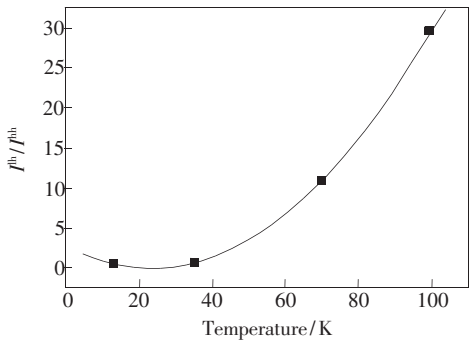

图 4　导带底与价带顶轻重空穴带之间复合强度的比值。其中 I^{lh} 中为导带底与价带顶轻空穴带间的复合发射强度，I^{hh} 为导带底与价带顶重空穴带间的复合发射强度，实线由实验数据拟合得到。

Fig. 4　The ratio of recombinations between conduction to the split valence bands. I^{lh} represents the recombination between conduction band to the light-hole state at the top of the valence band and I^{hh} represents the recombination between conduction band to the heavy-hole state at the top of the valence band, the solid line is obtained from fitting experimental data.

热激发使得轻空穴带出现了比重空穴带数量大的多的空穴，因而主发光峰改变为导带底与价带顶轻空穴带（E^{lh}）之间的复合形成。

4　结　　论

采用低压金属有机化学气相沉积技术在掺 Fe 的半绝缘 InP 衬底上制备了 $InAs_{0.157}P_{0.843}$ 外延层，利用变温光致发光研究了外延层在 13 ~ 300 K 内的发光特性。在应力作用下 $InAs_{0.157}P_{0.843}$ 外延层的价带顶轻空穴带（lh）和重空穴带（hh）发生了劈裂。随着温度的升高，$InAs_{0.157}P_{0.843}$ 外延层的禁带宽度逐渐减小。在低温下（13 ~ 100 K）观察到导带底与价带顶轻、重空穴带的复合，随着温度的升高，由于热激发使得导带底与价带顶轻空穴带之间复合增强且远大于与价带顶重空穴带之间的复合，因此只观测到导带底与价带顶轻空穴带之间复合。

参　考　文　献：

[1] Yamamoto Mitsuo, Yamamoto Nori, Nakano Junichi. MOVPE growth of strained InAsP/InGaAsP quantum-well structures for low-threshold 1.3-μm lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, **30**(2):554-561.

[2] Mei X B, Loi K K, Wieder H H, *et al*. Strain-compensated InAsP/GaInP multiple quantum wells for 1.3 μm waveguide modulators [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(1):90-92.

[3] Zhao Y G, Masut R A, Brebner J L, *et al*. Temperature dependence of photoluminescence in InAsP/InP strained multiple quantum wells [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(10):5921-5926.

[4] Lee Chong-Yi, Wu Meng-Chyi, Shiao Hung-Pin, *et al*. Temperature dependence of photoluminescence from InAsP/InP strained quantum well structures grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *J. Crystal Growth.*, 2000, **208**(1-4):137-144.

[5] Olego D J, Okuno Y, Kawano T, *et al*. Structural and optoelectronic properties and their relationship with strain relaxation in heteroepitaxial InP layers grown on GaAs substrates[J]. *J. Appl. Phys.*,1992, **71**(9):4492-4501.

[6] Asai H, Oe K. Energy band-gap shift with elastic strain in $Ga_xIn_{1-x}P$ epitaxial layers on (001) GaAs substrates [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(4):2052-2056.

[7] Jordan A S. Some thermal and mechanical properties of InP essential to crystal growth modeling [J]. *J. Cryst. Growth*, 1985, **71**(3):559-565.

[8] Casey H C, Jr, Parrish M B. *Heterostructure Lasers* [M]. New York: Academic, 1978, Part B, p.9.

[9] Orlova N S. Anharmonic effects in semiconductors with sphalerite structure from data of pressure and temperature dependences of elastic constants [J]. *Cryst. Res. Technol.*, 1989, **24**(3):K39- K41.

[10] Matthews J W. *Enifaxial Growth B* [M]. New York: Academic, 1975, p. A560.

[11] Hull R, Bean J C. *Strained Layer Superlattices: Materials Science and Technology, Semiconductors and Semimetals, Vol.* 33 [M]. edited by T. Pearsall. San Diego: Academic, 1991, p.1 and references therein.

[12] Stolz W, Guimaraes F E, Ploog K. Optical and structural properties of GaAs grown on (100) Si by molecular-beam epitaxy [J]. *J. Appl. Phys.*, 1988, **63**(2):492-499.

[13] Nolte D D, Wahrkiewicz W, Haller E E. Band-edge hydrostatic deformation potentials in III-V semiconductors [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(4):501-504.

[14] Hou H Q, Tu C W. Optical and structural characterization of InAsP/InGaP strain compensated multiple quantum wells grown by GSMBE [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(9):4673-4679.

[15] Landolt-Boernstein: *Numerical Data and Functional Relationship in Science and Technology* [M]. New series, edited by O. Madelung, Berlin: Springer, 1982, 17.

[16] Olego D J, Okuno Y, Kawano T. Structural and optoelectronic properties and their relationship with strain relaxation in heteroepitaxial InP layers grown on GaAs substrates [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**(9):4492-4501.

Lattice Mismatch Effect on Photoluminescence from $InAs_xP_{1-x}$/InP Heterostructuer

YAN Da-wei[1,2], SONG Hang[2], MAO Guo-qing[2], YU Shu-zhen[1,2],
JIANG Hong[2], LI Zhi-ming[2], LIU Xia[1,2], CAO Lian-zhen[1,2], GUO Wan-guo[1,2], SUN Xiao-juan[2]

(1. *Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanism and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The variable-temperature photoluminescence spectra of strained $InAs_xP_{1-x}$/InP heterostructuer were experimentally determined in the temperature range 13 ~ 300 K. A theoretical calculation was presented that takes into account the temperature-induced variations in band gap and biaxial strain to explain the PL spectra. The results showed that strain which is induced by lattice mismatch between epitaxial layer and substrate removes the degeneracy between the light- and heavy-hole states at the top of the valence band, and with temperature under 100 K, the recombinations from the conduction band to the split valence bands are both observed in the photoluminescence spectra. As temperature is raised, it results in an increasingly larger light-

hole population than that of heavy-hole due to thermalization, so when temperature is beyond 100 K only the recombination from the conduction band to the light-hole state can be observed. We also find that the energy of the recombination between the conduction band and the light-hole and heavy-hole state changes as a function of temperature.

Key words: $InAs_xP_{1-x}$/InP; LP-MOCVD; stress; variable-temperature photoluminescence

CLC number: O482.31　　**PACS**: 78.55.Cr　　**PACC**: 3250F; 7855　　**Document code**: A

Received date: 2008-08-25

LASER2009'Beijing 第十九届全国激光学术会议征文通知

由中国光学学会和中国电子学会联合主办，中国电子科技集团公司第十一研究所和固体激光技术国家级重点实验室承办，LASER2009'Beijing 第十九届全国激光学术会议将于 2009 年 10 月中旬在满载奥运风姿、魅力金秋的北京召开。

本次大会将邀请我国激光光电子领域的院士、知名专家、技术带头人作专题报告，大会将共同探讨国内外激光与光电子领域新思想、新概念、新技术等热点问题。大会热诚欢迎从事激光与光电子技术研究及其相关领域的专家学者、工程技术人员踊跃投稿。

一、会议主题/征稿范围

1. 激光物理（激光器动力学、激光等离子体物理、X 光激光、激光光谱等）
2. 非线性光学与量子光学
3. 全固态激光器及新型激光器
4. 激光信息及处理技术
5. 激光生物与激光医学
6. 工业激光及其应用
7. 激光材料、薄膜及元器件
8. 光束传输、控制及光束特性

二、应征论文作者请于 2009 年 6 月 30 日前将 500 ~ 800 字的论文摘要（用于审稿）和 300 字提要（用于出版）各一份，以电子邮件附件的形式发送至：laser2009@ ncrieo. com. cn，并请作者在文章左上角注明征稿范围的第几类，来稿时请附第一作者的详细通讯地址、工作单位、联系电话、邮政编码及职务、职称等。

三、经审稿录用或参加会议交流的论文，将推荐给相关核心期刊出版。

四、参加会议请咨询：李燕兰，电话：010-84321070，13681086430，传真：010-64362779，电子邮箱：kjc@ ncrieo. com. cn；

投稿请咨询：林晓明、柴欣，联系电话：010-84321112，传真：010-64387667。

中国光学学会激光专业委员会
中国电子学会量子电子学与光电子学分会
中国电子科技集团公司第十一研究所
固体激光技术国家级重点实验室
二〇〇九年三月二十五日