第 18 卷第 10 期　　半 导 体 学 报　　Vol. 18, No. 10
1997 年 10 月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　Oct., 1997

稀土铒的掺入对光晶体管性能的改善*

孙成城　何淑芳　江剑平　黄小康

(清华大学电子工程系　北京　100084)

摘要　使用稀土铒作为吸杂剂可以有效地减少背景载流子浓度达一个数量级以上，和传统工艺条件相比生长溶液的烘烤时间从 60～70 小时减至 3～4 小时，同时获得了高纯度的铟镓砷外延层和高质量的异质结. 用于光晶体管使其光增益高达 4000，和未使用铒吸杂剂相比增加近 3 倍.

PACC: 6855, 8115L;　**EEACC**: 4250

1　引言

稀土掺杂半导体对于制作光电器件和光电子单片集成器件都是非常有前途的材料，其中三价稀土饵离子的掺入特别引起人们的兴趣. 目前的研究都集中在铒掺杂的激光器和光放大器方面，这是因为稀土铒的 1.54μm 发射谱线正好位于石英光纤的低损窗口，它对于光纤通迅无疑是重要的. 然而稀土元素化学活性强的特点还没有引起人们的重视，由于它和 Ⅵ 族元素具有极强的化合力，因此稀土元素可以作为吸杂剂在生长高纯外延层中发挥作用.

高纯 InP、GaAs、InGaAs 和 InGaAsP 外延层的生长是人们长期以来研究的重要课题，对于光探测器的发展具有重要意义. 国外研究[1,2]表明使用稀土元素及其氧化物作为吸杂剂可以有效地减少存在于未掺杂 Ⅲ-Ⅴ 族化合物中的深能级的施主浓度达 1～2 个数量级，这是制备高性能光探测器的关键. 本文利用稀土铒离子作为吸杂剂，提高外延层的纯度和异质结的质量，进一步改善光晶体管的性能.

异质结光晶体管是一种高光增益的新型探测器，由于它具有灵敏度高、噪声低、性能稳定可靠、工作电压低等特点在光存储、光纤传感、光纤通讯和光学信息处理等技术领域有广泛应用. 我们先后对 GaAlAs/GaAs、异质结光晶体管的光增益、光谱响应进行研究，同时还实现了异质结光晶体管与激光器的单片集成，它具有光放大、光双稳和光开关等多项功能[3～10].

稀土铒离子掺杂的电光材料既可以用来制作激光器、光放大器，又可用来制作光波导和光探测器，因此它的研究在集成光电子技术中具有重要意义. 对激光器、光放大器、光波导和光探测器的单片集成具有重要意义.

---

* 国家自然科学基金资助项目(69486003)

孙成城　男，1946 年生，副教授，长期从事半导体光电集成器件的研究. 在国内外学术会议及刊物上发表论文 38 篇，获专利 3 项，成果 4 项

1997 年 3 月 24 日收到初稿，1997 年 6 月 10 日收到修改稿

2　实验

提高外延层的纯度和异质结的质量是制备和改善光晶体管的性能的关键. 利用稀土铒离子作为吸杂剂，必须研究铒在 InGaAs/InP 中液相外延的生长特性，以及稀土铒吸收杂质的机理和规律.

稀土铒在 InGaAs/InP 生长溶液中具有双重作用. 首先稀土铒元素可作为吸杂剂. 由于它对生长溶液中残存杂质具有极强的化合力，并且能够使之转化为化学活性差的化合物，因此它对残存杂质具有捕捉作用. 其次把较高含量的稀土铒元素加入到 InGaAs/InP 生长溶液中可以起到受主杂质作用. 通过实验我们发现把较低含量的稀土铒元素加入到 InGaAs 生长溶液中可对背景残存杂质起捕捉作用.

三族稀土元素铒具有极强的化合力，它可以和生长溶液中的 As、P 溶质形成化合物，也可以和保护气体 H_2、气氛中的微量 O_2 形成化合物，从而对外延层的质量(表面形貌、固相组份等)产生影响. 因此对于稀土铒的氢化物和氧化物的形成应该采取措施加以抑制.

在生长溶液中加入铒势必增加 InGaAs 三元层和 InP 衬底的晶格失配度. 为了准确研究生长溶液中铒的重量百分比和晶格失配度之间的关系，特别配制了铒含量为 1% 的 Er-In 合金用来实验. InGaAs 外延层和 InP 衬底垂直结平面的晶格失配度 $\Delta\alpha_{\perp}/\alpha_0$ 与生长溶液中铒的重量百分比的关系如图 1 所示. 当铒的重量百分比在 0～0.2% 之间变化时可获得表面光亮、界面平整的外延层. 当铒的重量百分比大于 0.2% 时外延片表面开始变得粗糙、并有黑白相间的颗粒生成；当铒的重量百分比大于 0.4% 时外延片表面形貌急剧劣化，结平面有夹杂物生成. 当铒的重量百分比在 0～0.2% 之间变化时，垂直结平面的晶格失配度从 -1.6×10^{-4} 变化到 -3.0×10^{-3}. 表明晶格失配度随着生长溶液中铒含量的增加而向负方向增加. 由 645℃开始生长的厚度大于 3μm 的无位错的 InGaAs 三元层和 InP 衬底的晶格失配度 $\Delta\alpha_{\perp}/\alpha_0$ 介于 -6.5×10^{-4} 和 -1.0×10^{-3} 之间.

InGaAs 外延层的电子浓度与生长溶液中铒的重量百分比的关系如图 2 所示. 当铒的重

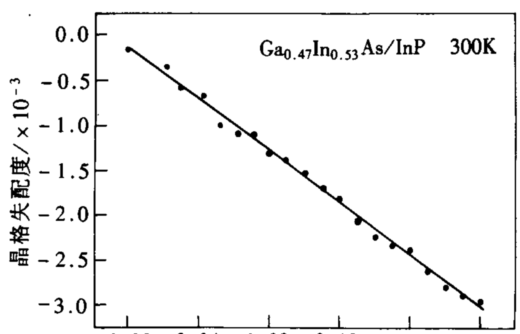

图 1　InGaAs 外延层和 InP 衬底垂直结平面的晶格失配度 $\Delta\alpha_{\perp}/\alpha_0$ 与生长溶液中铒的重量百分比的关系

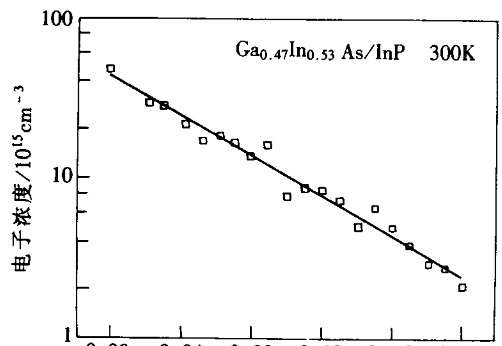

图 2　InGaAs 外延层的电子浓度和生长溶液中铒的重量百分比的关系

量百分比从 0 变化到 0.2%时，样品室温下的载流子浓度从 $4.8\times10^{16}/cm^3$ 迅速下降到 $2.1\times10^{15}/cm^3$，室温下的霍耳迁移率从 $3200cm^2/V\cdot s$ 上升到 $4315cm^2/V\cdot s$. 这些结果比单纯依靠延长烘烤时间要有效得多. 而为获得高纯度的 InGaAs/InP 外延层通常的作法是延长烘烤时间，即在高纯 H_2 气氛中长时间烘烤 In-P 和 In-Ga-As 生长溶液，旨在去除溶液中的杂质. 外延层的背景载流子浓度随烘烤时间的增加而减少. 如制备载流子浓度为 $2.3\times10^{15}/cm^3$ 的 n-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 外延层烘烤时间在 700℃时需 65 小时[11]，制备载流子浓度为 $1.9\times10^{15}/cm^3$ 的 n-InP 外延层烘烤时间在 670℃时需 72 小时[12]. 如此长时间的烘烤，对生长溶液中的 As、特别是对 P 挥发有很大的影响. 为了更有效地去除溶液中的杂质，实验中的 H_2 气还需引入微量的水蒸汽或氧气. 而用稀土铒作为吸杂剂制备载流子浓度为 $2.1\times10^{15}/cm^3$ 的 n-InP 和 n-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 外延层的烘烤时间在 670℃时仅需烘烤 3～4 小时.

异质结光晶体管是由异质发射结和同质收集结构成的双极型晶体管. 它由 N 型宽带隙发射区，p 型窄带隙基区和 n 型窄带隙收集区组成. 异质结光晶体管的制作采用液相外延方法. N^+-InP(100)衬底经常规清洗后在多熔池石墨舟上进行外延生长，氢气经钯管净化器纯化. 考虑到稀土铒的化学活性强、容易氧化的特点，先用磷酸腐蚀掉铒表面的氧化层，然后经去离子水冲洗，乙醇脱水，保存在高纯氮中. 生长之前高纯 In、GaAs 多晶、InAs 多晶和稀土铒一起装入石墨舟中并在 670℃高温下和高纯氢气氛中烘烤 3 小时，然后降温至 650℃加入 InP 和掺杂剂，熔源 1 小时. 起始生长温度是 645℃. N-InP：Te 发射区采用两相法生长，p-InGaAs：Cd 基区和 n-InGaAs：Sn 收集区采用过冷法生长，过冷度为 8℃. 降温速率均为 0.5℃/分. 发射区的厚度是 6μm，载流子浓度为 $1\times10^{18}/cm^3$；基区的厚度是 0.8μm，载流子浓度为 $8\times10^{16}/cm^3$；集电区的厚度是 3μm，载流子浓度为 $1\times10^{17}/cm^3$. 用 X 射线双晶衍射测得晶格失配度 -6.7×10^{-4}，InGaAs：Er 外延层的电子迁移率 $3950cm^2/(V\cdot s)$. 外延片减薄后双面蒸镀 AuGeNi/Au，在 420℃氮气氛中合金 2 分钟后形成欧姆接触. 在背面刻蚀出直径为 160μm 的光窗. 最后解理成 400μm×400μm 的管芯.

器件制作完成后，对其直流工作的 I-V 特性进行了测试. 异质发射结正向偏置，同质收集结反向偏置，基区悬浮. 波长为 1.55μm 发光二极管的光通过光纤耦合到光晶体管的光窗上，不同光强下的光增益曲线如图 3 所示. 光晶体管的光增益定义为单位时间内产生的电子数与单位时间内注入的光子数之比：$G=(I_c/q)/(P_i/h\nu)$；式中 I_c 为光晶体管的集电极电流；q 为电子电量；P_i 为入射光功率；$h\nu$ 为注入的光子能量. 由此测得的光增益高达 4000. 这一结果和我们研制的器件结构、工艺条件相同但未使用铒吸杂剂的光晶体管[13]相比，其光增益增加近 3 倍. 图 4 为器件的归一化光谱响应曲线，可见在 0.92～1.65μm 光谱范围内，该器件都有很好的响应，在 1.55μm 附近有一极大值. 由于异质结光晶体管相当于一个光电二极管(PD)和异质结晶体管(HBT)的单片集成，所以光增益又可以表示为：$G=\eta(\beta+1)\approx\eta\beta$，$\eta$ 为量子效率；β 为晶体管的电流增益. 可以看出光增益近似等于电流增益与量子效率的乘积，因此要获得大的光增益应尽可能地增大电流增益和量子效率. 理论分析和实验结果[3]均表明：减少基区宽度，降低基区掺杂浓度，提高基区内少子扩散长度，都有利于提高异质结光晶体管的光增益. 本文利用稀土铒作为吸杂剂能够有效地降低基区的杂质浓度、提高基区的少子扩散长度，从而增大了电流增益. 另外稀土铒掺杂剂在 1.54μm 附近的吸收带，对于提高异质结光晶体管的量子效率，也起了很大作用.

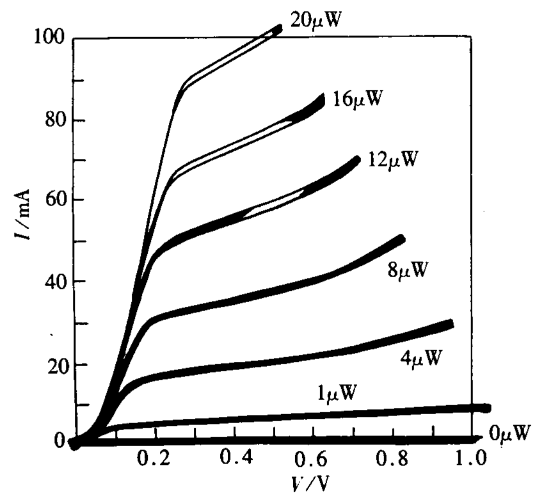

图 3　异质结光晶体管的直流工作特性

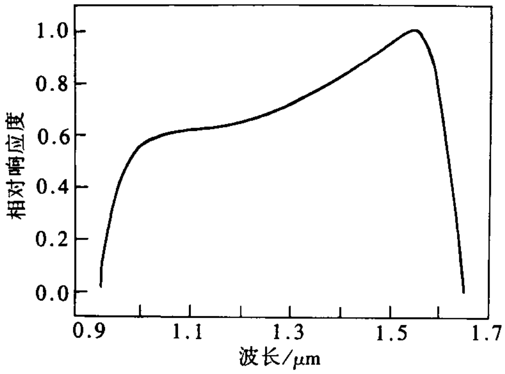

图 4　异质结光晶体管光谱响应特性

3　结论

本文研究了稀土铒作为吸杂剂在铟镓砷磷化合物半导体材料中液相外延生长特性，其中包括稀土铒离子在外延生长中吸收施主杂质的机理和规律，以及对晶格失配度、电子迁移率、载流子浓度的影响. 实验结果表明使用稀土铒作为吸杂剂可以有效地减少背景载流子浓度达一个数量级以上，和传统工艺相比生长溶液的烘烤时间从 60～70 小时减少到 3～4 小时，同时获得了高纯度的铟镓砷磷外延层和高质量的异质结. 用于光晶体管使其光增益高达 4000，和未使用铒吸杂剂相比增加近 3 倍. 稀土铒作为吸杂剂对于高纯材料和光探测器的研究都具有重要意义.

参　考　文　献

[1] A. K. Chatterjee and J. Haigh, Journal of Crystal Growth, 1990, **106**: 537～542.

[2] J. Novak *et al.*, Journal of Crystal Growth, 1991, **110**: 862～866.

[3] 黄小康，孙宝寅，孙成城，等，半导体学报，1986，**7**(5)：543～546.

[4] Huang Xiaokang, Wang Zuning and Sun Baoyin, Electronics Letters, 1986, **22**(8): 435～436.

[5] Baoyin Sun, Xiaokang Huang, Jie Dong, The 10th IEEE semiconductors Lasers conference, 1986, No. 090, Tokyo Japan.

[6] Dong Jie, Huang Xiaokang and Sun Baoyin, IEEE J. Quant. Electro., 1987, **QE-23**(11): 1868～1874.

[7] Xiaokang Huang, Baoyin Sun, Chengcheng Sun *et al.*, CLEO, USA, 1987, 55.

[8] 黄小康，孙宝寅，孙成城，等，半导体学报，1988，**9**(4)：373～379.

[9] 孙成城，何淑芳，江剑平，等，量子电子学，1989，**6**(4)：379.

[10] 孙成城，何淑芳，江剑平，清华大学学报，1992，**32**(1)：32～37.

[11] Groves S. H., and Plonko, M. C. Conf. Ser.-Inst. Phys., 1979, No. 45: 71.

[12] Oliver, J. D., Jr. and Eastman, L. F. J. Electron. Mater., 1980, **9**: 693.

[13] Yan Yingcao, Sun Chengcheng and He Shufang *et al.*, SL. 5. 4. 1-4 '89 Topic meeting of Solid State and Simiconductor Laser.

Improving Phototransistor's Performance By Doping Rare-Earth Erbium

Sun Chengcheng, He Shufang, Jiang Jianping and Huang Xiaokang

(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084)

Received 24 March 1997, revised manuscript received 10 June 1997

Abstract Using Erbium as getter in the growth of $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$ by LPE can rapidly and effectively reduce background impurity concentration over one order of magnitude, and decrease baking time of the growth melt from 60～70 hours to 3～4 hours, compared with the conventional procedure. High purity epitaxial layers and high quality heterojunction were obtained. The optical gain of the phototransistors with doping Er-getter is as high as 4000, 3 times more than that of the phototransistors without doping Er-getter.

PACC: 6855, 8115L; **EEACC**: 4250