

应用 SEM 和 $V-I$ 特性研究 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP/ InP DH 激光器中掺杂的影响

葛玉如 高淑芬 王 莉 汪孝杰 张盛廉 朱龙德

(中国科学院半导体研究所)

1981年4月6日收到

提 要

本文说明用 SEM 和 $V-I$ 特性法研究 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器中掺杂对 PN 结位置及 PN 结性质的影响。认为用 Zn 作 P 型掺杂剂的 InGaAsP/InP DH 激光器中, 由于 Zn 在 InGaAsP 和 InP 晶体中的快扩散及外延生长期间 Zn 蒸气沾污是 PN 结偏位的主要原因。施主和受主掺杂的高浓度会产生隧道型 PN 结。因此在研制激光器的工艺中, 控制 Zn 的沾污及掺杂剂的浓度是非常重要的。

一、前 言

$1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器能实现异质结界面(有源层和限制层)的晶格匹配, 它的辐射波长满足光纤低损耗窗口; 石英单模光纤在约 $1.3 \mu\text{m}$ 波长处, 材料色散和波导色散相互抵消使总色散为零。因此在这个波长上, 单模光纤的带宽可显著增加; 另外, 发射激光的窄带隙 InGaAsP 有源层夹在不同质的宽带隙(折射率较低)的两层 InP 之间, 形成典型的双异质结构, 使激光器有极好的载流子限制及光限制, 提高了激光器的发射效率。

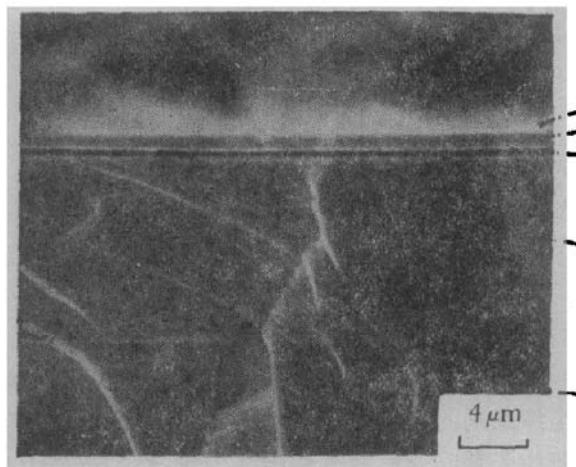
在生长异质结激光器外延片的一系列问题中, 最重要的问题是掺杂不当引起 PN 结从窄隙层边界偏位的现象和隧道结现象。偏位一旦发生, 就使得双异质结构的优点完全消失^[1]。隧道结一出现意味着施主和受主的浓度过高, 易产生严重的自由载流子吸收, 必然导致光学损耗的增加^[2]。总之, 上述两种现象都造成激光器的高阈值和低效率。

我们对上述问题进行研究的有效方法是 SEM 的二次电子貌象, 电子束诱导电流(EBIC) 模式以及表征 PN 结性质的 $V-I$ 特性曲线测试。

二、实 验

我们采用(100) InP 衬底上液相外延生长的 InGaAsP/InP DH 激光器的片子^[3], 其结构如照片(1)所示。把外延片切割成管芯, 将单个管芯装在或烧在镀 In 的铜热沉上进行测量。

我们用 HPS-50B 型 SEM 拍摄 DH 激光器外延片(110)解理面的二次电子貌象,



第一异质结面 第二异质结面

表面 图 1

第二异质结面

表面 图 2

第三异质结面

表面 图 3

照片 1 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器外延生长结构的 SEM 二次电子貌象，除 P^+ -InGaAsP 因解理而破坏外其余各层清晰可见(加速电压 15 kV)

1. P^+ -InGaAsP 顶层；
2. P-InP 限制层；
3. 未掺 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}_{0.59}\text{P}_{0.41}$ 有源层；
4. n-InP 缓冲层；
5. 衬底(位错密度 $\sim 10^4/\text{cm}^2$)。

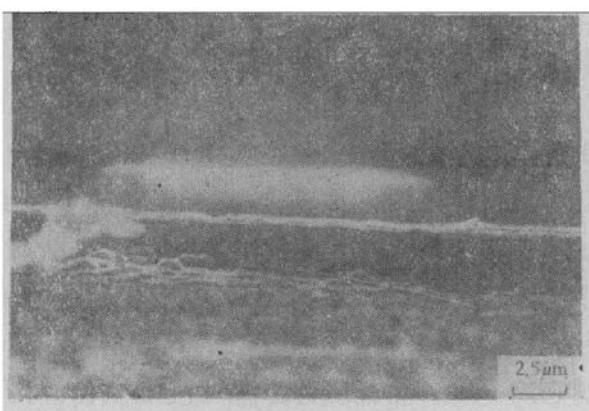
准确测量各层厚度(精度达 3%)。用 SEM-EBIC 模式揭示 DH 激光器(110)面上 PN 结的位置(结深)及有源层的导电类型。然后用标准的 $V-I$ 特性测试法作出激光器的 $V-I$ 特性曲线，标出门限电压值，从而估计 PN 结内建势所对应的带隙并判断 PN 结的性质。

我们对 80-21#、80-37#、80-25# 等样管作了考查，它们的主要工艺特点，检测结果列在表 1 中。

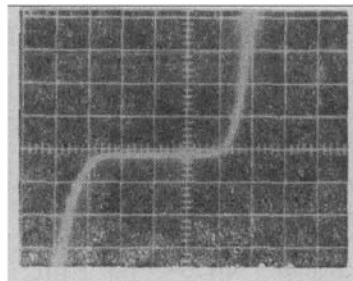
表 1 三种类型 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器的工艺特点，SEM-EBIC 及 $V-I$ 特性检测结果

样品号	有源层生长温度($^{\circ}\text{C}$)	外延冷却速率($^{\circ}\text{C}/\text{分}$)	施主 Te 浓度 n 受主 Zn 浓度 p (cm^{-3})	$V-I$ 特性	正常、偏位、隧道结三种类型的 InGaAsP/InP DH 激光器(110)面上沿 x 方向的零偏压下 EBIC 分布
80-21#	635	0.8	$n \sim 7 \times 10^{18}$ $p \sim 4 \times 10^{17}$	照片 2b	图 1
80-37#	635	0.8	$n \sim 1.8 \times 10^{19}$ $p \sim 5.6 \times 10^{17}$	照片 3b	图 2
80-25#	635	3.5	$n \sim 7 \times 10^{18}$ $p \sim 8 \times 10^{17}$	照片 4b	图 3

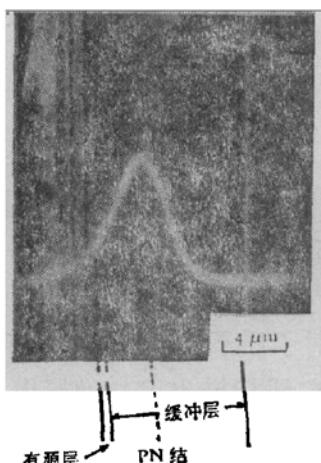
实验表明：在我们制造的 Zn 作受主掺杂剂的 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器中，可出现三种不同的情况。一种叫正常 PN 结型，另一种叫偏位结型，第三种称为隧道结型。



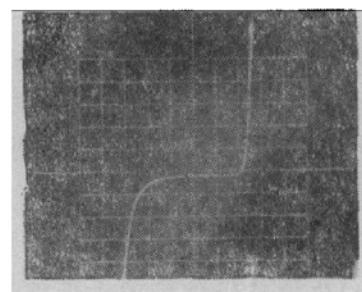
照片 2a 80-21# $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 质子轰击条形激光器的 SEM 二次电子和 EBIC 叠加象(零偏压)照片给出结深 $\sim 2.5\mu\text{m}$, 有源层宽 $0.5\mu\text{m}$, 质子轰击条形宽 $13\mu\text{m}$



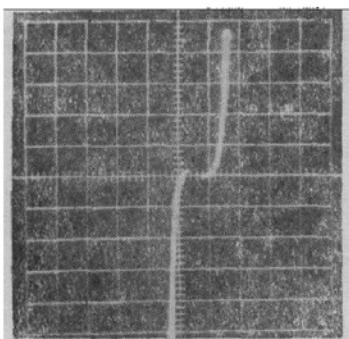
照片 2b 80-21# $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器的 $V-I$ 特性曲线, 正向门限电压值为 $0.8-0.9\text{V}$ 。(正向水平: 0.1 伏/每小格正向垂直: 1 毫安/每小格)



照片 3a 80-37# $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器(110)面上的二次电子貌象和 EBIC 线扫描的叠加象(零偏压) EBIC 峰值位置说明 PN 结从有源区偏位 $3\mu\text{m}$ (试样经过染色显结)



照片 3b 80-37# $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器的 $V-I$ 特性曲线, 正向门限电压值是 $1.1-1.3\text{V}$ (正向水平: 0.1 伏/每小格正向垂直: 1 毫安/每小格)



照片 4 80-25# $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器的 $V-I$ 特性曲线, 曲线的形状说明此 PN 结是隧道型, 正向门限电压值为 $0.8-0.9\text{V}$ (正向水平: 0.1 伏/每小格, 正向垂直: 1 毫安/每小格)

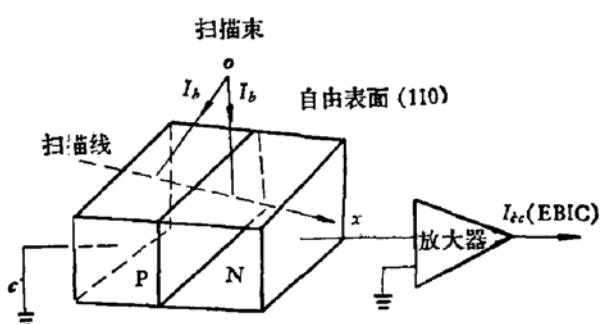


图 4 说明电子束在 PN 结侧面(110)面的正视扫描图, 电子束在(110)自由表面作扫描或沿垂直于结面的 x 方向作线扫描

80-21[#], 80-37[#], 80-25[#], 样管分别属于这三种类型的器件。80-21[#]的 SEM-EBIC 检测结果说明 EBIC 信息峰值位于 InGaAsP 有源层与 n-InP 缓冲层的界面上(照片 2a)。80-21[#]的 V-I 特性表明它的 PN 结门限电压值为 0.8—0.9 V(照片 2b), 对应着 InGaAsP 带隙。并且它的发光光谱只有一个峰值, 峰值波长为 1.3 μm, 这正是 1.3 μm InGaAsP/InP DH 激光器所要求的。80-37[#]的 EBIC 信息强度峰值已离开 InGaAsP 有源层移到 n-InP 缓冲层中, 偏位宽度 ~3 μm(照片 3a)。V-I 特性曲线测试说明 80-37[#]样管的 PN 结门限电压值为 1.1—1.3 V(照片 3b), 对应着 InP 的带隙。80-37[#]电荧光光谱测量指出它具有双峰, 一个峰值波长是 1.3 μm, 另一个是 0.96 μm, 这个 0.96 μm 的峰值正对应着 InP 的带隙。80-25[#]的 EBIC 测试说明它的 PN 结位置在有源区*, 没发生偏位。但 80-25[#]的 V-I 特性测量说明它的 PN 结属于隧道型(照片 4b), 它的电荧光光谱峰值波长为 1.3 μm, 但发光较弱。值得注意的是在 80-25[#]样管有源层的 EBIC 面象中发现平行于〈100〉方向的暗线缺陷(照片 5)。

三、结 果 分 析

1. 1.3 μm InGaAsP/InP DH 激光器的 EBIC 象衬的定性分析

我们的实验中采用电子束平行于 PN 结的方向垂直入射 DH 器件(110)面, 当电子束在(110)表面扫描时可得到 EBIC 象衬的面分布; 当电子束沿垂直于 PN 结面方向(设为 x 方向)作线扫描时, 可得到沿 x 方向 EBIC 的线分布曲线(如照片 2a 和 3a 所示), 图 4 示出电子束入射方向和样品的几何位置。利用 EBIC 的面分布可识别 PN 结的位置及生长界面的不均匀性, 还可揭示有源区的晶体缺陷。对于质子轰击条形的 DH 激光器, 可以明确给出 PN 结的形状。沿垂直于 PN 结面的 EBIC 线扫描也可准确标出 PN 结位置(照片 3a)及测量少数载流子扩散长度。

我们用近似一维的模型对上述电子束入射方式的 EBIC 象衬作定性分析。当电子束沿器件(110)面的 x 方向作扫描时(图 4)外电路电流可表示为

$$I(x) = A(\eta \cdot G \cdot I_b) e^{-x/L}. \quad (1)$$

其中: L 是少数载流子的扩散长度, A($\eta \cdot G \cdot I_b$)是和电子-空穴对产生率 G, PN 结的收集效率 η 及电子束束流 I_b 有关的常数。从(1)式可见电子束注入样品所产生的电子-空穴对到达 PN 结的浓度是指数衰减的, 衰减的快慢由扩散长度 L 决定。同时指出, 在 $x = 0$ 的 $I(x)$ 值是曲线峰值, 也是 PN 结面所在的位置, 这就是我们用 EBIC 法判断 PN 结位置的理论依据。

1.3 μm InGaAsP/InP DH 激光器的 InGaAsP 有源层沿 x 方向与 InP 层形成两个异质结, 由于掺杂水平或杂质沾污, 这两个异质结可以是 PN 结, 也可以是同型异质结(p-p 或 N-N 结), 异质 PN 结与同质 PN 结能带的显著区别在于界面处出现的导带底和价带顶的不连续, 它对电子和空穴的输运有很大的影响。而对于同型异质结的特性则取决于多数载流子行为, 它的特性类似于金属-半导体接触的肖脱基势垒。

* 80-25[#] 样管的 EBIC 像说明其 PN 结位置在有源区, 情况和 80-21[#] 相似。在这里省略了照片 4a。

80-21# $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器是 PN 结正常位置的异质 PN 结, PN 结位于第一异质结面上(有源层与缓冲层界面上), 它的 V-I 特性曲线属于轻掺异质 PN 结类型(照片 2b), 势垒宽度应大于载流子平均自由程, 因而它的载流子输运可用扩散模型处理, 电子束产生的电子-空穴对扩散到结区的浓度的指数衰减同 PN 结收集效率与少数载流子产生位置的关系是一致的。我们根据 PN 结收集效率与少数载流子产生位置(即电子束轰击位置)的关系, 可测定少数载流子的扩散长度。按照这个理论, 我们估计了 80-21# 样管 P 区少子扩散长度 $L_n \sim 1.4\mu\text{m}$ 。80-37# 是 PN 结偏位在 n-InP 缓冲层的 DH 激光器, 它的 PN 结是属于同质 PN 结, 80-37# 的第一异质界面变成同型异质结。80-37# EBIC 衬度分布说明它的 L_n 较大, 按(1)式及 80-37# 的 EBIC 线扫描估计出它的 $L_n \sim 2.4\mu\text{m}$ 。我们认为 80-37# 的 L_n 较大的原因除了重补偿的因素之外, 还应考虑直接带隙来自电子束激发荧光(CL)的再吸收复合辐射(RRR)对少数载流子扩散长度的增加效应(通过 RRR 产生的电子-空穴对参与 EBIC)。这种效应与 P 区厚度有关, 当 P 区厚度大于少子扩散长度时是不能忽略的。

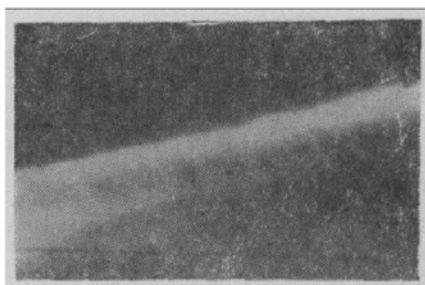
2. 偏位产生的原因

我们采用 Zn 作 P 型掺杂剂, 而 Zn 在 InGaAsP 和 InP 晶体中的扩散速度是相当快的^[3], 特别是在掺杂浓度过高时, 可在外延生长期间内扩散到 InP 缓冲层中去, 使 n-InP 层部分补偿或反型变成 P-InP, 造成 PN 结偏位。这种情况的偏位深度与 Zn 的浓度有关, 更确切的说与受主 Zn 浓度与施主 Te 的浓度比值有关。比如 80-37# 样管同 80-21# 样管比较, 虽然 Zn 的浓度增加不大, 但因为 80-37# 的施主浓度减少太多而造成偏位。另一方面, 由于在外延生长温度(635°C)之下, Zn 的挥发蒸气压已相当高(在 608°C 时 Zn 的饱和蒸气压为 11.0mm Hg), 如果含 Zn 的熔液屏蔽不好, 可在初始外延生长 n-InP 缓冲层便引入严重的 Zn 沾污。这种 Zn 沾污的 DH 器件的偏位深度相当深, 有时使整个 n-InP 层反型, PN 结偏位到衬底与 n-InP 缓冲层界面上。

实验指出: 控制 Zn 掺浓度使受主浓度 $p \sim 8 \times 10^{16} - 4 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$; 控制 Te 掺浓度使施主浓度 $n \sim (3-7) \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 比较合适。另外适当的 Zn 掺量还应考虑 InGaAsP 层的本底浓度, 一般由于外延系统的硅沾污和 In 本身的不纯, 生长不掺杂 InGaAsP 层实际上是由 n-InGaAsP。如果 Zn 掺过少, 不足以补偿 n-InGaAsP 层, 可造成在 P-InP 限制层中的偏位。

3. 隧道 PN 结的产生

异质 PN 结势垒的宽度反比于各自的掺杂浓度, 当 PN 结的 P 区和 N 区的掺杂浓度特别高时, 它是一个势垒区很薄, 自建场极强的突变结。80-25# 样管的施主浓度 $n \sim 7 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, 受主浓度 $p \sim 8 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 就可成为典型的隧道型 PN 结了(表 1 中照片 4b), 实验证明隧道结型 DH 激光器的 PN 结都没偏位。这是因为当施主和受主浓度都高时, Zn 扩散进入 n-InP 缓冲层的效应变得不显著。此外, 80-



照片 5 80-25# DH 激光器有源层的 EBIC 面貌($8000\times$), 图中揭示的暗线缺陷, 其方向平行于 $\langle 100 \rangle$ (亮衬度表示 EBIC 讯号小)

25# 样管同 80-21# 比较，外延生长温度没变，但因冷却速率比 80-21# 高四倍，使得它的外延生长速率加快。不适当提高外延生长速率易导致生长界面上杂质的不均匀和晶体缺陷。80-25# 样管的有源层的 EBIC 面扫描象揭示了暗线缺陷的形貌，它们是平行于 $\langle 100 \rangle$ 方向的直线(照片 5)。一般认为暗线缺陷与三维位错网络有关，它可造成激光器短寿命和快退化。

四、结 束 语

PN 结是我们研制 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH 激光器的核心，PN 结的位置和性质集中反映了激光器的质量。我们的工作证明；应用 SEM 和 $V-I$ 特性法研究 DH 激光器中的 PN 结偏位及掺杂影响是很有意义的。为得到低阈值，长寿命，室温连续相干的高质量 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP/InPDH 激光器，必须用上述方法严格控制器件制备中的掺杂量，进而控制 PN 结位置和性能，以获得光纤通信系统中最理想的光源。

本文所用样品的制备得到七室器件工艺组的大力协助，完稿后经王守武教授审阅、指导，在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] J. J. Coleman and F. R. Nasa, *Electronics Letters*, 14, 558 (1978).
- [2] Yoshio Itaya Yasuharu Suematsu, Shinya Kata Yama, Katsumi Kishino and Shigehisa Arai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 18, 1795 (1979).
- [3] G. H. Olsen and T. J. Zamerowski, *Prog. Crystal Growth Charact.* 2, 309 (1979).
- [4] 朱龙德等，半导体学报，2, 212 (1981).

A Study of Doping Effects on $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DH Laser by Means of SEM and $V-I$ Characteristic

Ge Yuru, Gao Shufen, Wang Li, Wang Xiaojie,

Zhang Shenglian and Zhu Longde

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

The doping effects on the position and properties of PN junction in $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP/InP laser by means of SEM and $V-I$ characteristics are studied. It is considered that Zn vapor contamination during the epitaxial growth and Zn fast diffusion of Zn doped InGaAsP, InP crystals is the dominant cause for PN junction deviation and that high concentration of donor or acceptor dopant will result in tunneling-type PN junction. Therefore, in the fabrication technology of lasers, control on Zn contamination and dopant concentration is of extreme importance.