

1.3 μm InGaAsP/InP 脊形波导激光器 偏振输出的测量

郝素君

(上海交通大学光纤技术研究所, 上海 200052)

提 要

本文对发射波长为 1.3 μm , 具有不同脊形波导宽度 InGaAsP 激光器的 TE、TM 模偏振输出特性进行了测量. 实验观察到脊形波导比较窄的器件具有 TE、TM 模竞争现象, 而脊形波导比较宽的器件在阈值电流以上, 只有 TE 模激射, 没有模式竞争. 利用偏振度概念计算了阈值电流以上和阈值电流以下的偏振度, 并对其进行了讨论. 本文指出, 只要严格选择激光器的参数, 并控制环境温度, 合理使用器件, 就可获得稳定的偏振输出, 而不必使用任何起偏系统.

关键词 阈值电流, 偏振, 竞争.

1 引 言

Mou-Shing Lin^[1] 等人研究了半导体放大器 TE、TM 模增益和自发发射功率对温度的依赖关系, 分别测量了 TE 模主导、TM 模主导及 TE 模和 TM 模发射功率相等的三种类型的器件, 并用增益方程解释了实验结果. 文献[2]给出 GaInP/AlGaInP 双异质结激光器的 TE 和 TM 模偏振输出的实验研究, 指出对于适当的样品, 改变环境温度和激光器的腔长, 可选择 TE 或 TM 模输出. 此外, Cassidy 等^[3]给出偏振度的定义:

$$\rho = (I_{\text{TE}} - I_{\text{TM}}) / (I_{\text{TE}} + I_{\text{TM}}) \quad (1)$$

其中 I_{TE} , I_{TM} 分别是 TE 模和 TM 模发射光功率, 并认为利用阈值电流以下的偏振度 ρ_0 可测量激光器激活区中的应力.

本文研究了 1.3 μm InGaAsP 脊形波导激光器 TE、TM 模的偏振输出特性. 实验观察到阈值电流以下, 偏振度 ρ_0 在 0 到 -0.3 之间, 而在阈值电流以上, 在较低温度下有些激光器有 TE、TM 模竞争, 偏振度 ρ 随着注入电流的增加而显示振荡变化; 有些激光器没有模式竞争现象, 它们的 TE 模光功率大约是 TM 模光功率的 2~4 倍. 对偏振度与条宽及环境温度的关系进行测量, 在较高的温度下, 任何激光器都没有观察到二个模式的竞争. 还测量了不同注入电流下纵模的偏振输出, 观察到具有模式竞争现象的激光器, TE 模、TM 模在波长上是分开的, 能量间隔大约为几个 meV.

2 实验设备和样品

采用图 1 所示的测试系统,使用温度控制器控制激光器热沉底的温度,激光器连续工作.激光器发出的光束经过数值孔径为 0.35、放大倍数为 20 的显微物镜,到达格兰-泰勒(Glan-Taylor)偏振棱镜,旋转棱镜得到的偏振光由锗光电探测器接收,全套系统由计算机控制,并自动打印出图形.图 2 为样品的剖面图,表 1 给出 5 只样品的基本参数及其 TE、TM 模光功率之比的最大值.为了保证实验参数的正确,在实验前对所选用的激光器的远场和近场进行了测量,均为 TEM_{00} 模输出.

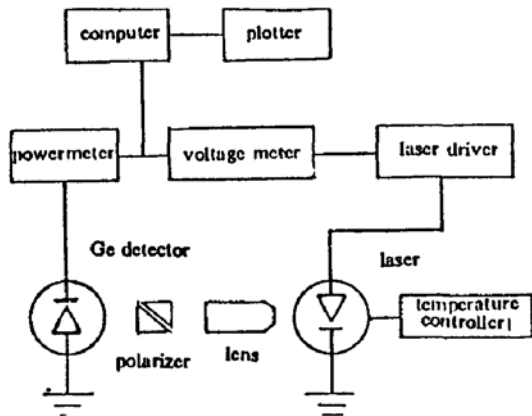


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

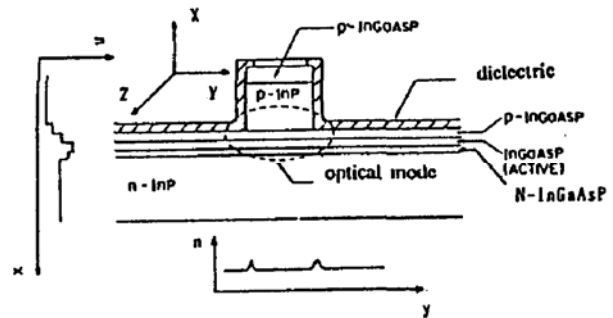


Fig. 2 Cross section of the ridge waveguide laser

平板介质波导激光器具有电场偏振方向垂直传播方向的 TE 模和磁场偏振方向垂直传播方向的 TM 模.使激光器工作在阈值以上,旋转偏振棱镜,探测器得到的讯号最小时所对应的棱镜的角度方向就是 TM 模的方向,从 TM 模角度方向,旋转棱镜 90° ,就是 TE 模的角度方向.通过测定,认为 TE 模矢量垂直于异质结平面, TM 模矢量平行于异质结平面.在平面波导内,电场、磁场及传输方向是互相正交的.

利用图 1 的测试系统,将单色仪放在偏振棱镜与锗探测器之间,旋转偏振棱镜,可分别测量激光器的 TE、TM 模的纵模谱.

Sample parameters and the maximum polarization power output ratio of TE to TM mode

sample	ridge width W (μm)	length of cavity L (μm)	active layer thickness d (μm)	threshold current I _{th} (mA, 20°C)	$\frac{P_{\text{TE}}}{P_{\text{TM}}}$
1	2.6	300	0.15	34	6.81
2	3.1	300	0.15	26	6.50
3	4.1	300	0.15	42	4.33
4	4.2	300	0.15	27	4.13
5	5.5	300	0.15	31	3.60

3 结果和讨论

3.1 激光器光功率的偏振输出曲线

图 3 为样品 2 的 TE、TM 模阈值电流随温度的变化曲线.特征温度 $T_0(\text{TE}) = 52.17 \text{ K}$, $T_0(\text{TM}) = 21.50 \text{ K}$.在相同的温度下, TM 模的阈值电流大于 TE 模的阈值电流.

图 4(a)为样品 2 在 18°C 时 TE、TM 的功率对注入电流的依赖关系. TE 模的阈值电流为 27 mA, TM 模的阈值电流为 47 mA,在 82 mA 到 94 mA 范围, TM 模光功率稍大于 TE 模光功率,当电流继续增加时, TE 模光功率大于 TM 模光功率,观察到模式竞争现象.同时,看到光功

率输出-电流特性的非线性,这种非线性与光模式沿结平面的运动有关,与发射模式向着高阶模的转换有关,也可能与 TE 模转变到 TM 模有关^[5]. 图 4(b)给出样品 2 在阈值电流以下 TE、TM 模自发发射功率的偏振输出,接近阈值时,TE 模光功率急剧上升,对这类器件我们称之为 TE/TM 型. 图 5(a)(b)给出样品 5 在 18°C 时,TE、TM 模偏振输出曲线,阈值以上,TE 模光功率大于 TM 模光功率,没有模式竞争现象;在阈值以下,TM 模自发发射功率稍大于 TE 模自发发射功率,称之为 TE 型. 事实上,通过测量纵模谱线,可以确认 TE 模是激光, TM 模是荧光.

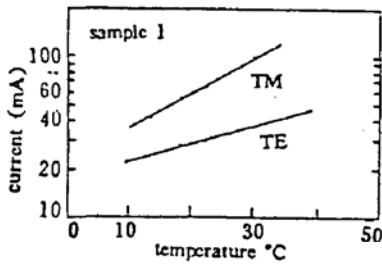


Fig. 3 Threshold current of TE, TM mode against temperature for sample 1

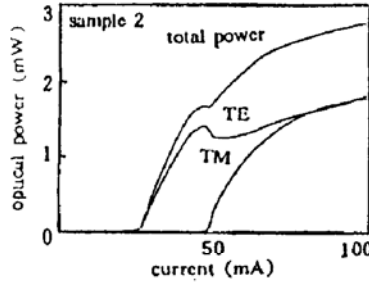


Fig. 4a Polarization power output of TE, TM mode above spontaneous power versus injected current under I_{th} for sample 2 at 18°C

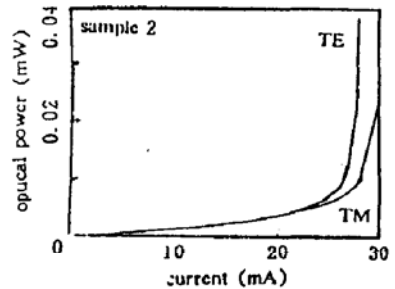


Fig. 4(b) TE, TM mode polarization spontaneous power versus injected current under I_{th} for the sample 2 at 18°C

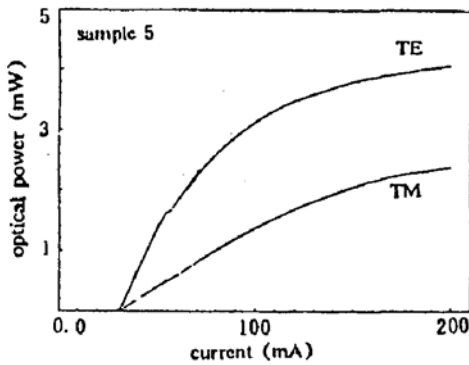


Fig. 5(a) Polarization power output of TE, TM mode above I_{th} for sample 5 at 18°C

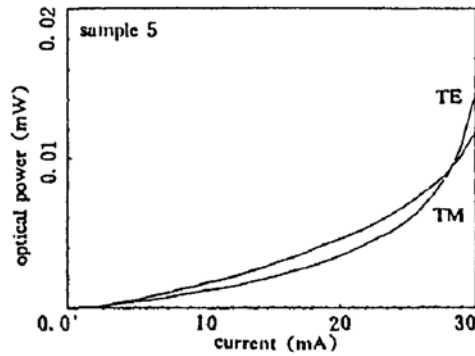


Fig. 5(b) TE, TM mode polarization spontaneous power versus injected current under I_{th} for the sample 5 at 18°C

我们测量了 12 只不同脊形波导宽度的激光样品,对于脊形波导比较窄的器件,基本上属于 TE/TM 型,具有 TE、TM 模式竞争效应. 对于条宽比较宽的器件,基本上属于 TE 型,没有观察到模式竞争现象.

对激光器芯片施加外压力的情况下,Adams^[4]等人计算了半导体激光器激活区的应力分布,认为激活区存在应力的情况下,能带结构将发生变化,如图 6 所示. 当应力为零时,价带中的重、轻空穴带是简并的;当存在伸张力时,轻空穴带向上移,重空穴带不动;当存在收缩力时,重空穴带向上移,而轻空穴带基本不动;因而,他们认为 TE 偏振光是导带电子跃迁到轻空穴带复合产生的,而 TM 偏振光是导带电子跃迁到重空穴带复合产生的. 尽管 Adams 的实验和计算是针对外压力引起半导体激光器激活区内能带结构产生变化,从而导致激光偏振输出的变化. 然而用同样的效应也可以解释器件内部的应力变化也将影响激光器的偏振输出特性. 器件内部存在的应力对于激光器的阈值电流、发射波长、偏振特性、增益及量子效率等都有影响. 一般认为,应力来自异质界面的晶格不匹配,外延生长引入的位错,层错以及器件的设计结构. 此外,当激光器工作在连续或脉冲状态时,由于非发射复合电流引起的晶格温升,以及环境温

度的改变将影响器件内部应力,从而明显影响激光器偏振输出特性的变化.

3.2 偏振度随着注入电流、脊形波导宽度及环境温度的变化关系

图 7 给出波导宽度 $W = 2.6, 4.1, 5.5 \mu\text{m}$ 激光器的偏振度随注入电流变化曲线. 样品 1 在阈值以下时 $\rho_b \approx 0$, 阈值以上 ρ 振荡变化, 变化范围 $-0.2 < \rho < 1.0$. 对于样品 3、4, ρ_b 是负值. 在阈值以上, ρ 上升并随着注入电流的增加而趋向于一个稳定值. 图 8 给出了不同脊形波导宽度 W , TE 型激光器偏振度与注入电流的关系曲线. ρ_b 随着条宽的增加而减小, ρ 随着条宽的增加而下降. 图 9 给出了样品 2 在 14°C 和 34°C 下偏振度随注入电流的变化. 14°C 时 ρ 显示振荡变化属 TE/TM 型器件, 在 34°C 时转成 TE 型器件, 没有模式竞争现象. 当降低温度时, 又转变成 TE/TM 型了, 是可逆变化.

脊形波导激光器, 有较强的侧向电流限制, 同样热传导在侧向也受到限制. InGaAsP 激活区材料的热膨胀系数大于 InP 限制层材料的热膨胀系数, 因而由于注入电流而引起的激活区的应力在垂直于异质结方向上将产生较大的变化, 从而引起激光器偏振输出特性产生变化.

由于激光器是平面波导型, 因此波导结构和波导性能也会影响激光器偏振模式的竞争效应. 对于 TE/TM 型器件, 在阈值电流以下, ρ_b 从 0 到 -0.1 , TE、TM 模处于自发辐射状态, 自发辐射的几率正比于导带上电子占有几率和价带上空穴占有几率, 但和光密度无关.

$$\gamma_{21}(\text{自}) = A_{21} \cdot f_2(1 - f_1) \quad (2)$$

A_{21} 是自发辐射系数, f_1, f_2 分别是激活区限制层的费米能级. 电子从 E_2 跃迁到 E_1 而发射的光子除频率对应为 E_{21} 外, 光子互相之间的位相、偏振方向和传播方向都没有固定的关系, 是无规的. 所以, 可认为自发辐射的光子在平衡状态下, 50% 是 TE 偏振, 50% 是 TM 偏振. 当注入电流加大时, 由于 TE 模的面反射率 0.34 大于 TM 模的面反射率 0.28, TE 模首先激射, TM 模受到抑制, $\rho \approx 1$. 当注入电流继续加大时, TM 模克服了损耗, 开始激射, 光功率上升. 平衡状态下, TE、TM 模光功率大致相等, ρ 趋向于零. 当注入电流进一步增加时, 激光器进入饱和区. 考虑到激光器的大电流特性, 波导限制因子 Γ_T 对于 TE、TM 是不同的, $\Gamma_T(\text{TE}) = 0.35$, $\Gamma_T(\text{TM}) = 0.24^{[5]}$, 由于注入电流非发射复合部分引起晶格温升, 使得 $\Gamma_T(\text{TE})$ 进一步增大, 而 $\Gamma_T(\text{TM})$ 变小, 导致了 TE 模光功率上升, TM 模光功率下降, 偏振度 ρ 约为 0.5.

对于 TE 型器件, 阈值电流以下, ρ_b 从 -0.1 到 -0.3 , 注入电流加大, TE、TM 模同时工作, 通过测量纵模谱, 确定 TE 模是激光, TM 模是荧光. 如图 2 所示, 对于脊形波导激光器, 发射光模的一部分是与绝缘层重迭, 绝缘层的折射率 1.83 小于上限制层的折射率 3.22, 这种重迭导致了 y 方向的侧向有效折射率台阶形成, 图 2 给出 x 方向、 y 方向折射率变化示意图. 侧向有效折射率台阶的数量级与激活区的厚度和上限制层的厚度有关. 对于比较厚的波导, 侧向折射率台阶变得很小, 脊形波导激光器的性能与增益波导激光器相似; 对于比较薄的波导, 侧向有效折射率台阶比较大, 对于 TM 模限制较好. 若工艺控制不好, 使侧向有效折射率台阶非常小, 不能进行光限制, 那么激光器 TM 模损耗大, 不能激射, 只有 TE 模激射, 因而产生了 TE 型.

如图 7 所示, 条宽窄的脊形波导激光器, 偏振度振荡变化, 这是因为在谐振腔中, 光场比较集中, 侧向有效折射率台阶比较大, 对光模侧向限制好, TE、TM 模都可以激射. 但是由于工艺

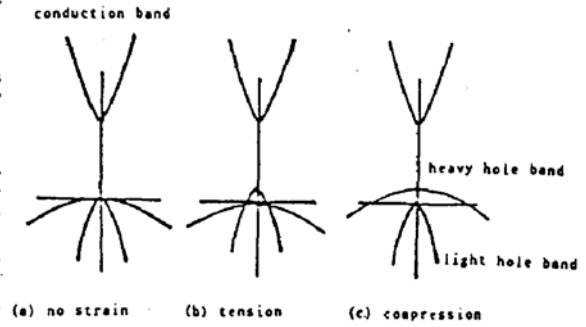


Fig. 6 The energy-band structure under different strain

材料等因素的引入,少数窄条宽的激光器也有可能存在 TE 型器件,如图 8 所示.随着条宽的增加,光场分布发生变化,侧向折射率台阶变小,光限制变差, TM 模损耗大,不能激射.文献^[6]给出条宽与激活区有效折射率 Δn (TE)、 Δn (TM)的关系,指出条宽比较大时,光功率 P_{TE} 、 P_{TM} 之间的差别减小.从表 1 和图 8 可明显看出随着条宽的增加,激光器 TE、TM 模光功率 P_{TE}/P_{TM} 比值下降.图 9 给出样品 2 在低温下显示模式竞争,而在高温下转变成 TE 型的实验结果.在高温下,激活区中 Auger 复合增加,载流子在异质结上的泄漏增加,发射复合数减小,反转粒子数减少,阈值电流上升.异质结界面由于热应力引起的晶格失配及激活区晶体的热膨胀,使侧向有效折射率台阶变小, TM 模损耗加大,不能形成激光.

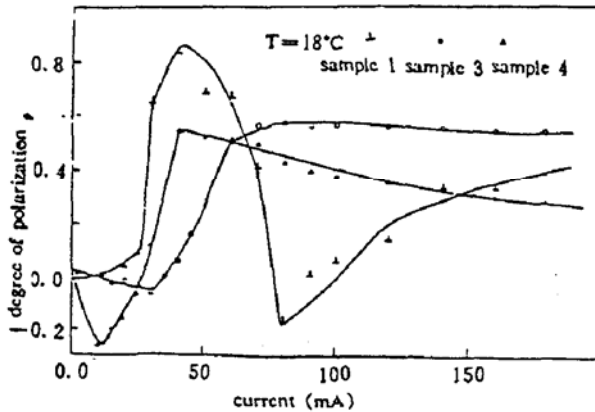


Fig. 7 The degree of polarization ρ versus injected current for sample 1, 3, 4

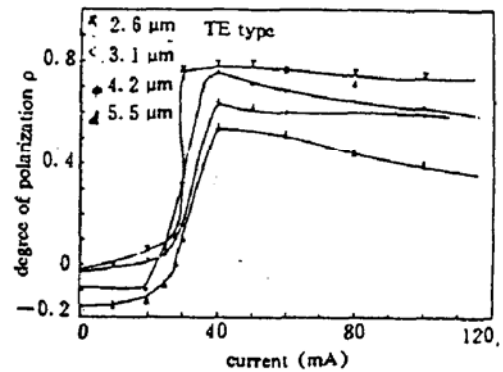


Fig. 8 The polarization degree of TE type laser versus injected current for different ridge width

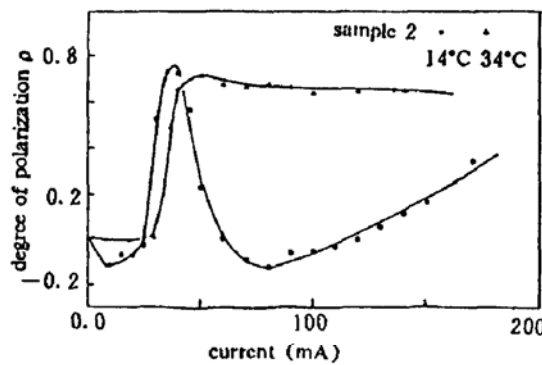


Fig. 9 The degree of polarization versus injected current for sample 2 at 14°C, 34°C respectively

3.3 不同的注入电流下, TE、TM 模的纵模谱

图 10(a)、(b)、(c)给出样品 2 在三个不同的注入电流下的 TE、TM 模纵模谱.当注入电流为 44 mA 时,只有一个 TE 模,峰值波长 λ_0 (TE) = 1.2888 μm ,没有观察到 TM 模;在 49 mA 时,观察到 2 个 TE 模, λ_1 (TE) = 1.2908 μm , λ_2 (TE) = 1.2938 μm ,一个 TM 模, λ (TM) = 1.2856 μm ;在 54 mA 时一个 TE 模, λ (TE) = 1.2938 μm ,一个 TM 模, λ (TM) = 1.2873 μm .

图 10 与文献^[7]是一致的, TE 模的波长大于 TM 模的波长,在大电流下, TM 模是多纵模, TE 模是单纵模.表 2 给出二只样品在阈值附近 TE 模的峰值波长 λ_0 (TE),大电流下,二个模式的峰值波长 λ (TM)、 λ (TE).得到 λ (TM) < λ_0 (TE) < λ (TE).考虑到注入电流引起的热效应对能带结构的影响,因为 InGaAsP 材料的热膨胀系数比较大,因而在激活区与限制层界

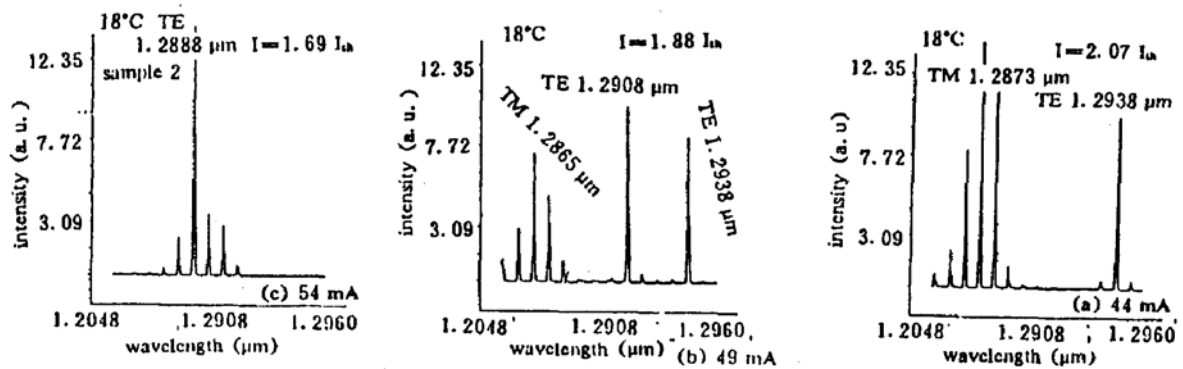


Fig. 10 The vertical spectrum of sample 2 at three different injected currents

面上,在 InGaAsP 一边存在伸张应力,而在 InP 一边存在收缩应力.激活区中的伸张应力导致轻空穴带向上移,重空穴带向下移,所以 TE 模能量小, TM 模能量大. TE 模偏振方向垂直于异质结,在这个方向上是强折射率波导,从纵模的测量结果看,随着注入电流的增加,多纵模很快就变成单纵模.而 TM 模偏振方向平行于异质结,在这个方向上是弱折射率波导,光限制不好,即使增大激发电流, TM 纵模的数目并没有明显减小.

Table 2 The peak wavelength of TE, TM mode near threshold current and at large current for sample 1, 2

sample	$\lambda_0(\text{TE}, I_{th}) (\mu\text{m})$	$\lambda(\text{TM}) (\mu\text{m})$	$\lambda(\text{TE}) (\mu\text{m})$
sample 1	1.2881	1.2804	1.2948
sample 2	1.2888	1.2873	1.2938

4 结 论

作者测量了 1.3 μm 脊形波导激光器偏振输出特性,计算了偏振度,观察到两类激光器,一类随着注入电流的增加, TE、TM 模有竞争;另一类 TE 模占主导地位, TM 模受到抑制.测量了偏振度与脊形波导宽度、温度的关系.指出脊形波导激光器的弱自建波导的形成对器件的偏振度有决定性影响,因此,简单考虑激活区有效折射率对 TE、TM 模的影响是不够的.另外,测量了不同注入电流下, TE/TM 型激光器的纵模谱, TM 模的能量稍大于 TE 模的能量.从器件的结构,温度对激光器阈值的影响,热应力对器件的影响等方面初步分析了以上实验结果,认为合理选择条宽,严格控制工艺,并在一定的环境温度下使用器件,可以获得理想的偏振输出.此外,由于半导体激光器的输出偏振特性(TE 模、TM 模的大小)是表征半导体激光器的重要参数,而量子井半导体激光器的 TE 偏振输出远大于 TM 偏振输出就是一大优点,因此本文的研究结果,对将来量子井半导体激光器的偏振输出研究也是很有意义的.

参 考 文 献

- [1] Lin Moushing *et al.*, Temperature dependence of polarization characteristics in buried facet semiconductor laser amplifiers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, QE-26: 1772~1778
- [2] M. J. B. Boermans *et al.*, Investigation of TE and TM polarized laser emission in GaInP/AlGaInP laser by

- growth-controlled strain. *Electron. Lett.*, 1990, **26**: 1438~1439
- [3] Daniel T. Cassidy *et al.*, Polarization of the output of InGaAsP semiconductor diode lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **QE-25**: 1156~1160
- [4] Charles. Adams *et al.*, Effects of stress on threshold, wavelength and polarization of the output of InGaAsP semiconductor diode laser. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(12): 6631~6638
- [5] G. P. Agrawal, N. K. Dutta, *Long-Wavelength Semiconductor Laser*. New York, Van Nostrand Reinhold Inc., : 180 ~ 181
- [6] Markus-Christian Amann, Polarization control in ridge-waveguide-laser diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(16): 1038 ~ 1040
- [7] Engelbert Hartl *et al.*, Polarization of $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ InGaAsP ridge-waveguide lasers. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1988, **27**(1): L104 ~ L106

The measurement of polarization characteristics in 1.3 μm InGaAsP/InP ridge-waveguide laser diode

HAO Sujun

(Shanghai Jiaotong University Research Institute of Optical Fiber Technology, Shanghai 200052)

(Received 1 April 1993; revised 26 July 1993)

Abstract

The polarization characteristics of TE, TM modes output from the 1.3 μm InGaAsP/InP lasers with different ridge-waveguide width are measured. It is observed that there is the polarization competition between TE and TM modes in narrow ridge-waveguide laser. For wider ridge-waveguide laser, the polarization of the stimulated emission above threshold current exhibits only TE mode, there is no competition. The degree of polarization above and under threshold currents are calculated and discussed. The results show that it is possible to get stable polarization output if we choose strictly the parameters of the laser, control the environmental temperature and rationally use the devices, and it is not necessary to use any polarizer.

Key words threshold current, polarization, competition.