

1. $3\mu\text{m}$ 混合应变量子阱激光器偏振特性分析*

张哲民¹ 金锦炎² 黄格凡² 黄德修¹ 李同宁²

(1 华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

(2 武汉电信器件公司 武汉 430074)

摘要 本文报道了采用混合应变量子阱作为有源区的激光器,并对其进行了测试和分析。偏振 $P-I$ 曲线表明这种激光器的 TE 和 TM 激射模式分别对应于不同的阈值电流, TM 模式的阈值电流在一定温度范围内随温度升高而降低, TM 模式的斜率效率和总的斜率效率在一定温度范围内随温度升高而升高。测试了不同电流和温度下的偏振激射谱,两种激射谱随电流和温度改变都有很大变化,表明 TE 和 TM 激射模式之间有强烈的相互作用。我们认为可能是由载流子分布与强激光辐射之间的非线性效应引起的。

EEACC: 4320J, 0510D, 4250

1 引言

混合应变量子阱结构被用来实现偏振无关的半导体激光放大器。但对混合应变量子阱结构中两种量子阱之间的耦合和两种偏振模式竞争的研究和报道却并不多见。在已报道的双偏振激光器中^[1,2],很少有关于两种偏振模式之间耦合与竞争的研究。众所周知,压应变量子阱对 TE 模式有大的增益,对 TM 模式则几乎没有贡献;张应变量子阱主要对 TM 模式提供增益,但同时对于 TE 模式也有一定的贡献。考虑较简单的情况,文献[3]对混合应变量子阱结构中的增益饱和进行了理论研究。压应变量子阱产生的 TE 模式除了与压应变量子阱内的载流子相互作用外,还会消耗张应变量子阱的载流子,即 TE 模式会使 TM 模式的增益饱和;TM 偏振模式除了消耗张应变量子阱内的载流子外,与压应变量子阱没有关系,即 TM 偏振光不会使 TE 的增益饱和。上述这种耦合过程被称作光子耦合,混合应变量子阱结构中,还有一个耦合过程是载流子耦合。由于处于同一有源区内,载流子会从一个量子阱内逃逸出去,然后被另一个量子阱捕获,从而可能使压应变量子阱和张应变量子阱之间产生耦合。但是文献[3]讨论的是不考虑非线性效应时的情况,所以他们的结论完全不能用来解释激光器中的非线性行为,用他们的结论无法解释我们的测试结果。

半导体激光器的增益谱是非均匀展宽的。当腔内存在强激光时,载流子的分布会受到非线性光学效应影响,表现为增益谱的烧孔效应^[4]。对单偏振激光器,谱烧孔使激射模附近的非激射模增益受到抑制^[5]。而在双偏振激光器中,由于 TE 和 TM 模式分别激射,而且提供

* 本文得到国家高技术 863-307 主题资助

张哲民 男,1970 年出生,现为华中理工大学光电子工程系博士研究生

1998-01-18 收到,1998-06-25 定稿

TE 和 TM 模式增益的空间位置不同, 不可避免地会存在强激光辐射与载流子之间的相互作用, 从而使载流子分布偏离费米分布。所以混合应变材料更适用于研究半导体材料中载流子分布与强辐射之间的非线性过程。

我们制作了混合应变量子阱激光器, 并对其 $P-I$ 特性进行了研究。这种激光器的 TE 和 TM 激光模式之间表现出很强的竞争, 使得其偏振 $P-I$ 曲线出现多个扭折。为了进一步研究两种偏振模式的竞争过程和起因, 我们测试了激光器在不同电流和温度下的偏振激光谱, 观察到许多其它有源区结构激光器中没有的特性。如两种偏振模式的激光谱随温度变化有不同的变化; 观察到两种偏振激光模式之间强烈的互竞争作用; 双波长激光谱。本文报道了测试结果, 并从非线性过程的角度对其进行了初步解释。

2 器件制备和测试

利用 MOCVD 设备低压生长方法, 我们首先分别研究了张应变和压应变量子阱的生长参数, 并在此基础上生长出混合应变量子阱结构的外延片, 进一步制作成双沟道平面掩埋异质结构 (DCPBH) 的激光器。有源区采用三个张应变量子阱和两个压应变量子阱相交替的结构。条宽为 $2\mu\text{m}$, 腔长分别取 250、400、700、850、1000 μm 。

我们主要测试了不同温度下, 器件的偏振 $P-I$ 曲线和偏振激光谱。测试时, 由激光器发出的光首先经起偏器滤出 TE 或 TM 模式, 然后利用激光器电源和 $X-Y$ 记录仪得到偏振 $P-I$ 曲线, 或通过单色仪和光功率计、 $X-Y$ 记录仪绘出偏振激光谱。与普通激光器不同, 不同偏振模式对应有不同的阈值电流, 我们记为 $I_{\text{TE}}^{\text{th}}$ 和 $I_{\text{TM}}^{\text{th}}$; 对应于总的 $P-I$ 曲线 (测试时不加偏振片), 激光器也有一个阈值电流, 记为 $I_{\text{LD}}^{\text{th}}$; $I_{\text{LD}}^{\text{th}}$ 与两个偏振模式阈值电流中小一个相等。我们还测试了固定电流时, 不同温度下器件的偏振激光谱的变化; 以及固定温度时不同电流下器件的偏振激光谱的变化。由于偏振片的插入对两种偏振光的损耗不一样, 测定的偏振激光谱不能用来比较两种偏振模式的强度。

3 器件特性

我们测试了不同腔长激光器偏置在阈值以下时, 两种偏振放大的自发辐射谱峰值波长。TE 模式的峰值波长总比 TM 模式的要长, 表明压应变量子阱的跃迁波长比张应变量子阱的跃迁波长要长。在不加致冷的条件下 (室温 5 $^{\circ}\text{C}$), 不同腔长激光器的不同偏振模式对应的阈值电流见表 1。很明显可以看到, 每个激光器可以同时工作在两种偏振模式下, 可以同时输出两种偏振光。两种偏振模式对应的阈值不同, 阈值主要由有源区结构决定。在所有不同腔长的激光器中, TE 模式的阈值电流都比 TM 模式的阈值电流低 (参见表 1)。

表 1 不同腔长的双偏振激光器的阈值电流

腔长/ μm	250	400	850	1000
TE 阈值电流/mA	21	23	42	36
TM 阈值电流/mA	27	37	80	64

注: 由于其它原因, 腔长为 850 μm 的激光器阈值电流有点异常

3 1 温度效应

我们在不同热沉温度下测试了各激光器的偏振 $P-I$ 曲线和偏振激射谱. 不同腔长激光器的特性随温度变化有相似的变化规律, 所以我们仅以 $700\mu\text{m}$ 长的激光器为例进行说明

图 1 为一个激光器在热沉温度为 16 和 18 时的偏振 $P-I$ 曲线, 在 16 的热沉温度下, TE 模式的阈值电流低, 先激射; 热沉温度升到 18 时, TM 模式的阈值电流降低, 而且比 TE 模式的阈值要低, 先于 TE 模式激射. 在两个温度下, $P-I$ 曲线都存在扭折, 18 时的扭折区与 16 时的扭折区相比, 对应的电流要高一些

偏置在 65mA 的电流下, 激光器在 16 时的输出无扭折, 而在 18 时激光器输出出现扭折, 所以我们在图 2 给出该激光器偏置在 65mA 时, 改变热沉温度引起的偏振激射谱变化, 以作比较. 测试时只调节温控仪而光路不变, 故可以比较不同温度下同一偏振的输出功率. 从图 2 可以看到, 激光器的 TE 和 TM 模式激射谱在 18 时出现重合, 说明此时存在着两种偏振激射模式的竞争. 而在 16 时的 TE 和 TM 模式激射谱没有重合, 对应 $P-I$ 曲线的点也在线性区. 比较不同温度下的偏振激射谱, 可以总结出以下规律:

- (1) 温度升高, 激射谱红移;
- (2) 温度升高, TE 模式功率减小, TM 模式功率增强, 而且阈值电流反而下降 (在测试温度范围内);
- (3) TM 模式有两个波长激射, 假设为 λ_s (短波长) 和 λ_l (长波长). λ_s 附近的激射随温度降低由单纵模变为多纵模, λ_l 的强度随温度升高而增强

我们知道, 能产生激射的波长一定处于激光器增益谱的峰值附近. 图 2 中 TM 和 TE 模式在 18 时的双波长激射表明此时激光器的增益谱峰值处出现了谱烧孔或是局部的增益

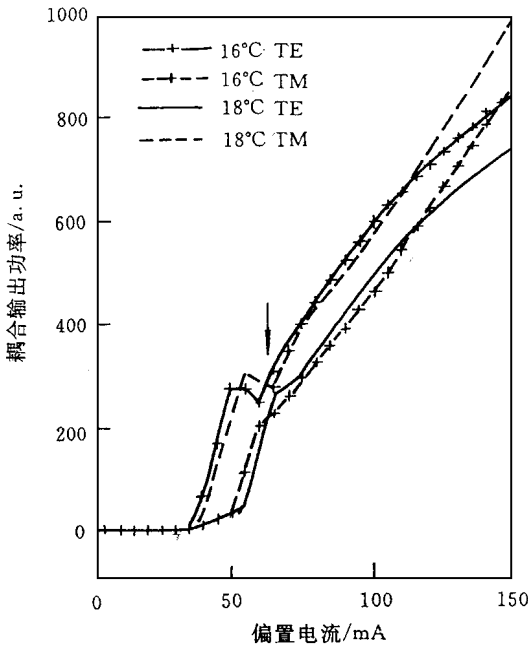


图 1 一个 $700\mu\text{m}$ 激光器的偏振 $P-I$ 曲线

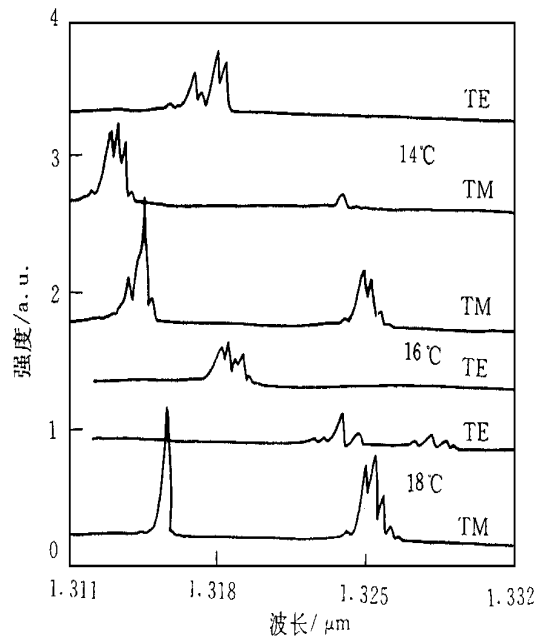


图 2 腔长 $700\mu\text{m}$ 激光器在不同温度下的偏振激射谱
偏置电流 65mA.

增强 增益谱的峰值与自发辐射谱的峰值相对应, 我们测量了激光器偏置在阈值以下时的自发辐射峰值波长, 并没有发现自发辐射谱有双峰 所以激射谱的双峰一定是与激光器内的激射现象相伴随

3.2 不同电流下的激射谱

图 3 为热沉温度在 0 和 20 时另一个长 700 μm 激光器的偏振 $P-I$ 曲线 可以看到, 在 0 时随电流增加 TE 模式先激射, 而 TM 模式的激射使 TE 的 $P-I$ 曲线产生扭折; 电流的继续增加使两种偏振模式的 $P-I$ 曲线都产生扭折, 根据箭头所示位置, 可以认为 TE 模式输出功率的减小伴随着 TM 模式输出功率的提高, 而 TE 模式输出功率的提高也伴随着 TM 模式功率的减小, 说明此时存在着两种偏振模式之间的互相竞争和耦合

图 4 为 0 下, 不同电流下的偏振激射谱 随着注入电流的增加, TM 和 TE 模式都从单峰激射转化为双峰激射, 而 TE 模式最终又变为单峰激射 结合图 3, 在 60~70mA 之间, 偏振 $P-I$ 曲线存在扭折, 此时 TM 模式的激射谱从单峰变为双峰; 第二个波长 λ_2 激射引起第一个波长 λ_1 激射强度的降低 在 100mA 附近, $P-I$ 曲线也有一个扭折, 此时 TE 模式的激射谱从单峰变为双峰, 然后又变成单峰 从 TM 和 TE 的激射波长位置可以认为在这些电流偏置下, 两个偏振增益谱峰值产生重合 这些现象同样说明偏振 $P-I$ 曲线产生扭折的根源在于两种模式之间的竞争

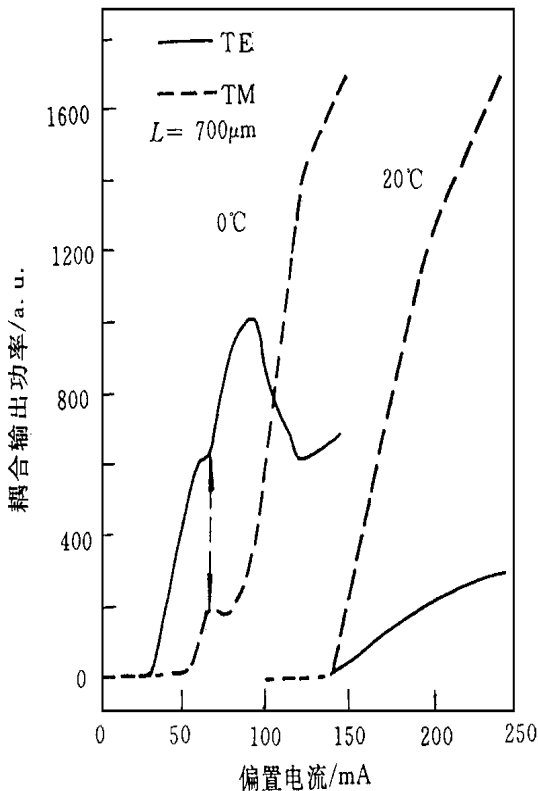


图 3 腔长 700 μm 的激光器在 0 和 20 时的偏振 $P-I$ 曲线 两组曲线在横轴方向上被分开 100mA.

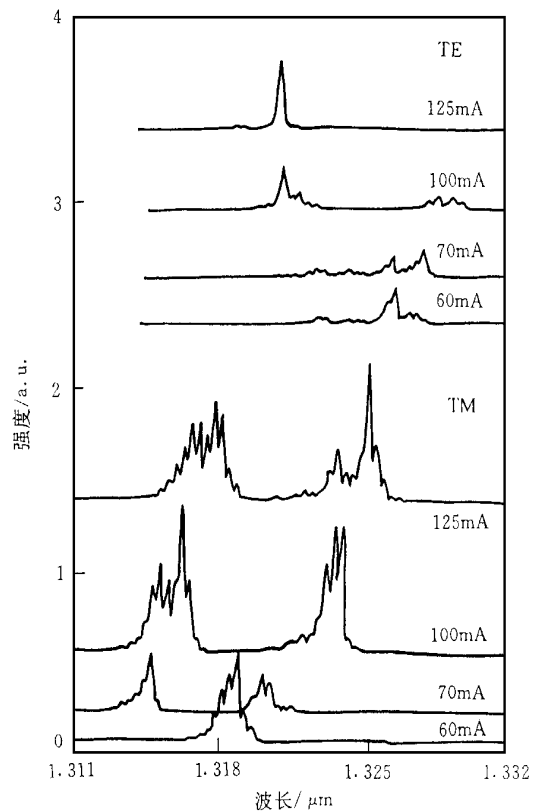


图 4 0 时, 腔长 700 μm 的激光器在不同偏置电流下的偏振激射谱

从注入电流增加引起的激射谱变化来看, TE 模式双峰激射是一种暂时的现象, 是由 TM 激射模式引起的激射谱分裂 而 TM 模式的双峰激射则很稳定, 一旦电流注入增加导致双峰产生, 会在很大电流范围内保持这种激射状态

4 结果分析

综合上面的测试结果, 混合应变量子阱激光器的激射谱与普通激光器的激射谱有较大不同, 表明在这种结构中存在着某些普通激光器内不存在的过程 两种偏振的激射模式之间存在激烈的竞争 对 TM 模式双波长激射出现的原因, 我们排除高能级跃迁激射的可能性 因为两激射波长之间只相差几个 nm, 对应于几个 meV 的能量, 一般来讲, 同一个量子阱内两个轻空穴能级对应的跃迁能量差要大得多 而且无法解释随温度降低, λ 对应强度降低的现象 根据自发辐射谱的峰值波长, 我们认为 TM 的 λ_1 与张应变量子阱的峰值增益波长相对应, 而 λ_2 则与 TE 模式的激射相关 另一个需要解释的现象是 TM 激射使 TE 激射谱产生分裂

为了解释本文已给出的实验结果及其它没给出的测试结果, 我们假设在混合应变量子阱激光器中存在着与增益压缩效应(产生谱烧孔)相反的非线性过程(产生局域谱增强). 即压应变量子阱内 TE 模式达到激射条件, 在腔内产生强 TE 辐射 在一定条件下, 强 TE 辐射会与张应变量子阱内的载流子产生互作用, 使张应变量子阱内的载流子分布偏离费米分布规律, 表现为 TM 增益谱出现局部增强(与增益压缩效应产生的谱烧孔正好相反).

在一定温度范围内, 随着温度升高, 上述非线性过程得到加强, TE 辐射转化为 TM 辐射的几率变大, 有更多的 TE 偏振态的光子被转化为 TM 偏振态 正如在图 2 中所示, 温度升高使 TE 强度降低, TM 的长波长处的强度提高 而且 TM 模式的跃迁被诱发增强后, 张应变量子阱内有更多的载流子参与 TM 激射, 表现为激光器的斜率效率提高

图 4 中, 电流较小时, TE 模式先激射, 由于非线性增益增强过程使 TM 在 λ_1 先激射 电流增加产生热效应使波长红移, 但同时电流的增加会由于能带填充效应使激射波长蓝移 综合的结果是 TE 和 TM 模式的波长移动速度不同, 在 100mA 时 λ_1 正好移到 TE 激射谱的中间, 使 TE 模式的激射谱分裂(换一种说法, 是 TE 激射谱中间部分的光子被用于 TM 模式的非线性增益增强). TE 模式在高电流注入下激射波长稳定在 TM 的两个激射波长 λ_1 和 λ_2 之间

显然非线性增益增强效应的产生是有条件的, 并不是所有激射的 TE 偏振光被该效应消耗掉 对此我们将进一步研究

5 结论

总之, 我们测试了激光器的偏振 $P-I$ 曲线和偏振激射谱, 观察到许多其它有源区结构激光器中没有的特性, 并用强辐射产生的非线性过程对其进行了初步解释

致谢 感谢武汉电信器件公司的刘涛、刘自力、李云樵、周宁、杨新民、王任凡、张冬香、王彩玲、赵俊英等人在 MOCVD 外延生长、激光器后工艺制作、器件测试中给予的大力协助; 感

谢华中理工大学光电子工程系的刘德明教授、孙军强副教授在器件测试方面的支持

参 考 文 献

- [1] D. P. Bour *et al* , IEEE J. Quantum Electron , 1994, **30**(12): 2738~ 2741.
- [2] A. Mathur, P. D. Dapkus, Appl Phys Lett , 1992, **61**(24): 2845~ 2847.
- [3] S. Dubovistky *et al* , IEEE J. Quantum Electron , 1994, **30**(2): 380~ 391.
- [4] M. A sada, Y. Suematsu, IEEE J. Quantum Electron , 1985, **21**(5): 434~ 441.
- [5] N. Ogasawara, R. Ito, Jpn J. Appl Phys , 1988, **27**(4): 615~ 626

Polarization Property Analysis of 1.3 μm Mixed Strained-Layer Quantum-Well Lasers

Zhang Zhem in¹, Jin Jinyan², Huang Gefan², Huang Dexiu¹, Li Tongning²

(1 Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

(2 Wuhan Telecommunication Devices Co., Wuhan 430074)

Received 18 January 1998, revised manuscript received 25 June 1998

Abstract The polarized $P-I$ curves and the polarized lasing spectra of mixed strained-layer quantum well lasers under different currents and at different temperatures are tested and analyzed. The polarized $P-I$ curves reveal that TE mode and TM mode have different threshold currents. The threshold current of TM mode decreases with the heat-sink temperature in particular temperature range. The slope efficiency of TM mode and the total slope efficiency increase in particular temperature range. The lasing spectra of both polarizations change greatly with the biased current and the heat-sink temperature, which means that TE and TM lasing mode compete with each other drastically. In our opinion, it is caused by the nonlinear effect between the carrier distribution and the strong lasing emission.

EEACC: 4320J, 0510D, 4250