

GaAlAs DH 激光器特性的温度效应研究

郑广富* 詹素贞

(永川光电研究所)

提要: 研究和分析了温度对 GaAlAs DH 激光器电光参数的静态和动态特性及工作寿命的影响。 I_{th} 变化率低的激光器, 外推室温连续工作寿命 8×10^4 小时以上。还研究了自脉动和功率扭折现象等。

Investigation of temperature effects on characteristics of GaAlAs DH lasers

Zheng Guangfu, Zhan Suzhen

(Yongchuan Opto-Electronics Research Institute)

Abstract: The temperature effects on the static and dynamic characteristics of electrical and optical parameters and operating lifetime have been investigated and analyzed for the GaAlAs DH lasers. For lasers of lower changing rate of threshold current, at the extrapolated room temperature, the CW operating lifetime is over 8×10^4 hrs, self-pulsating and kinking of lasing output have also been studied.

一、引言

半导体激光器的特性比固体和气体激光器更易受温度的影响, 正由于它的温度特性过于敏感而妨碍了它的应用。因为温度变化导致激光功率输出波动, 高温工作性能不稳定, 还会产生各种异常现象。一般来说, 温度特性是受材料、器件结构、制作工艺、工作条件等多种因素支配的, 有些作者曾做过实验和理论分析^[1, 2]。本文是研究分析了我们制造的^[3, 4]质子轰击条型 GaAlAs 双异质结

(DH)激光器特性的温度效应。

二、基本原理

半导体激光器工作在阈值附近时, 工作电流 I 与外加偏压 V_a 的关系为^[5]:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV_a}{2KT_j}\right), \quad (1)$$

式中 $I_0 = (qD_n n_i / L_n) a$, a 是电流流通的横截面积, D_n 是电子扩散系数, L_n 是电子扩散长

收稿日期: 1982年11月26日。

* 现在暨南大学物理系工作。

度, n_i 是有源区材料本征载流子浓度, $n_i^2 = np$ 。 K 为玻尔兹曼常数, T_j 为结区绝对温度 (K)。当激光器工作在阈值之上时, 则 $V_a - I$ 特性关系为:

$$V_a = IR_s + (V_j)_{th}, \quad (2)$$

式中 $(V_j)_{th}$ 为激光器工作在阈值时的结电压, 它是个常数。所以, 由(2)式两边对 I 求导数, 得激光器串联电阻 R_s 为:

$$R_s = \frac{dV_a}{dI} = \frac{\Delta V_a}{\Delta I}, \quad (3)$$

当环境温度为 T_{x1} 和 T_{x2} 时, 分别测得激光器的串联电阻假定为 R_{s1} 和 R_{s2} , 则串联电阻 R_s 的下降率 $\frac{\Delta R_s}{\Delta T} = \frac{R_{s2} - R_{s1}}{T_{x2} - T_{x1}}$ 。

半导体激光器阈值电流 I_{th} 通常随环境温度 T_x 变化的关系为:

$$I_{th}(T_x) = I_{th}(T_1) \exp\left(\frac{T_x - T_1}{T_0}\right), \quad (4)$$

式中 T_0 是激光器在一定环境温度范围的特征温度, T_1 为初测时环境温度, $I_{th}(T_1)$ 为 T_1 时阈值电流。由 T_1 和 T_x 时分别测出 $I_{th}(T_1)$ 和 $I_{th}(T_x)$, 则阈值电流变化率 $\Delta I_{th}/\Delta T = [I_{th}(T_x) - I_{th}(T_1)]/(T_x - T_1)$, 阈值温度系数为 $I_{th}(T_x)/I_{th}(T_1)$ 。由(4)式得知激光器的特征温度 T_0 为:

$$T_0 = \frac{T_x - T_1}{\ln[I_{th}(T_x)/I_{th}(T_1)]}, \quad (5)$$

考虑长寿命半导体激光器为单一退化机理时, 则结区绝对温度 T_j 时激光器的工作寿命为:

$$\tau(T_j) = \tau_0 \exp(E_A/KT_j), \quad (6)$$

式中 τ_0 为常数, E_A 为失效模式的激活能, K 为玻尔兹曼常数。当由实验知道高温 T_j 下的工作寿命 $\tau(T_j)$ 时, 可得出外推室温寿命 $\tau(T_R)$ 为:

$$\tau(T_R) = A(T_j)\tau(T_j), \quad (7)$$

式中 $A(T_j)$ 为高温退化外推因子, $A(T_j) = \exp\left[\frac{E_A}{K}\left(\frac{T_j - T_R}{T_j T_R}\right)\right]$ 。

半导体发射光谱随温度变化是很敏感

的, 发射光子能量 E 近似地等于有源材料的带隙 E_g , 它与发射光波长的相应关系为:

$$\lambda_{(\text{微米})} = \frac{hc}{E} = \frac{1.2398}{E_{g(\text{电子伏})}}, \quad (8)$$

而材料带隙 E_g 是随温度 T_x 的变化而变化的, 纯 GaAs 有源材料的变化关系为:

$$E_g(T_x) = 1.519 - 5.405 \times 10^{-4} T_x^2 / (204 + T_x), \quad (9)$$

式中 1.519(电子伏)是 0 K 时 GaAs 的带隙。如果 GaAs p 型掺杂至 1×10^{18} 厘米⁻³ 时, $E_g(T_x)$ 缩小 0.013 电子伏。

此外, 温度升高会容易产生自脉动、噪声、 $I-I$ 曲线曲折及功率饱和等异常现象。

三、实验与结果

我们在掺 Si 的 n 型载流子浓度 1×10^{18} 厘米⁻³ GaAs 衬底上, 依次液相外延掺 Te 的 $n \sim 1 \times 10^{18}$ 厘米⁻³ Ga_{0.92}Al_{0.08}As 缓冲层, 厚度 ~ 7 微米; 掺 Te 的 $n \sim 1 \times 10^{18}$ 厘米⁻³ Ga_{0.64}Al_{0.36}As 限制层, ~ 1.5 微米; 掺 Si 的 $p \sim 5 \times 10^{17}$ 厘米⁻³ Ga_{0.98}Al_{0.02}As 有源层, ~ 0.2 微米; 掺 Ge 的 $p \sim 1 \times 10^{18}$ 厘米⁻³ Ga_{0.64}Al_{0.36}As 限制层, ~ 1.0 微米; 掺 Ge 的 $p \sim 1 \times 10^{18}$ 厘米⁻³ GaAs 表面接触层, ~ 1.5 微米。闭管 Zn 扩散后, p 面用 CrAu 和 n 面用 AuGeNi 作欧姆接触。用质子轰击制成

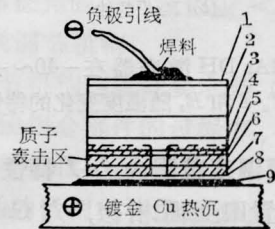


图1 质子轰击条型 GaAlAs DH 激光器内部构造

1— n -AuGeNi 接触层; 2— n -GaAs 衬底; 3— n -Ga_{0.92}Al_{0.08}As 缓冲层; 4— n -Ga_{0.64}Al_{0.36}As 限制层; 5— p -Ga_{0.98}Al_{0.02}As 有源层; 6— p -Ga_{0.64}Al_{0.36}As 限制层; 7— p -GaAs 表面层; 8— p -CrAu 接触层; 9—InSn 焊料

8~15 微米宽的条形结构。用 InSn 作焊料， p 面朝下焊在镀 Au 的无氧 Cu 热沉上，如图 1 所示。

1. 实用温度范围内 V_a-I 特性和 R_s

用液氮冷却与电炉加热，在 $-40 \sim +40^\circ\text{C}$ 内控制恒温，测量 GaAlAs DH 激光器伏-安特性随温度的变化，用 $x-y$ 函数记录仪自动记录其结果如图 2(a)，在不同温度下激光器 V_a-I 特性是不一样的，同样工作电流下，激光器两端电压随温升而下降。由图 2(a) 和 (3) 式算出 R_s 可得出 (b) 的曲线，说明 R_s 随温度上升而下降， $+40^\circ\text{C}$ 比 -40°C 时 R_s 下降 0.77 欧姆， $\frac{\Delta R_s}{\Delta T}$ 为 -9.6×10^{-3} 欧姆/ $^\circ\text{C}$ 。

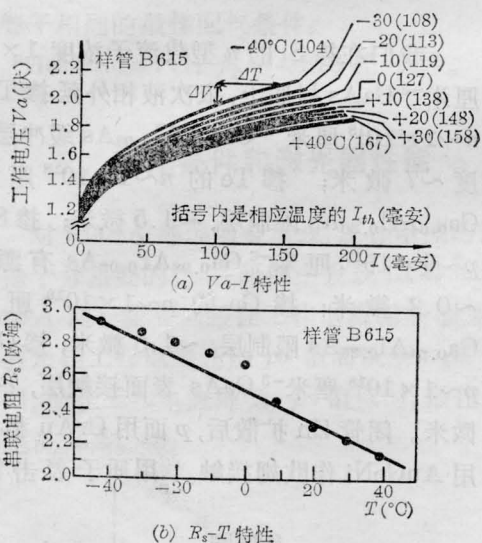


图 2 GaAlAs DH 激光器在 $-40 \sim +40^\circ\text{C}$ 范围内 V_a-I 和 R_s 随温度变化的特性

2. 实用温度范围内 $L-I$ 特性

实验装置跟上面相似，对 GaAlAs DH 激光器光功率输出-工作电流特性随温度变化作试验。图 3 给出了样管 B595 测得的 $L-I$ 曲线。在 $-40 \sim +40^\circ\text{C}$ 内， $\frac{\Delta I_{th}}{\Delta T} \approx 0.54$ 毫安/ $^\circ\text{C}$ ，在这一温度范围内，激光外微分子效率基本不变。

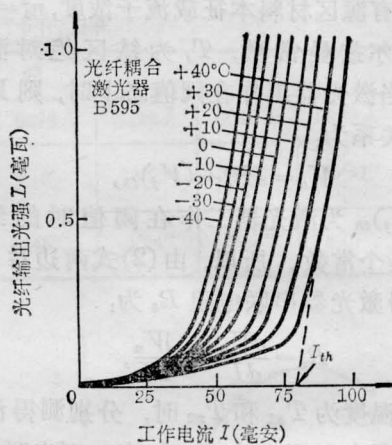


图 3

3. 高温范围内 $L-I$ 特性

把 24 只键合在管座上未封装的激光器，分别置于电热恒温箱内，通 N_2 ，在某一高温恒定后加直流工作，用 $x-y$ 函数记录仪自动记录测得的 $L-I$ 曲线。结果表明： $20 \sim 70^\circ\text{C}$ 内， $\frac{\Delta I_{th}}{\Delta T}$ 平均为 0.65 毫安/ $^\circ\text{C}$ ， $\frac{I_{th}(70)}{I_{th}(20)}$ 平均为 1.3，外微分子效率也基本不变。实验还表明：阈值电流变化率低的激光器，没有镜面等外部损伤时，其工作寿命较长。管 B636 在 $25 \sim 70^\circ\text{C}$ 内 $\frac{\Delta I_{th}}{\Delta T} = 0.45$ 毫安/ $^\circ\text{C}$ ，在 70°C 高温老化由 (7) 式外推室温连续工作

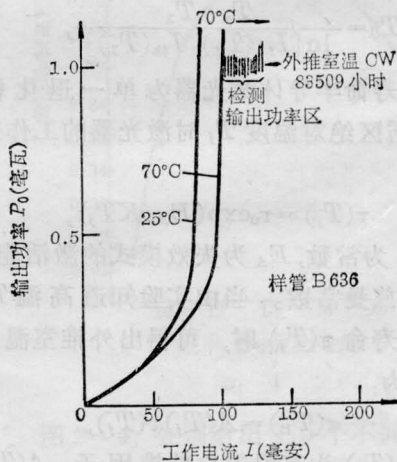


图 4 样管 B636 在 70°C 高温加速退化寿命试验的检测记录 (约在 20~48 小时检测一次而作出一根高温工作的 $L-I$ 曲线)

8万3千多小时(E_A 取0.7电子伏, $A(T_j)$ 取122)^[6]。

4. 最高连续工作环境温度

取四只键合在管座上未封装的激光器, 置于电热恒温箱内, 通 N_2 , 做恒定各种高温的直流工作试验。结果表明: 四只激光器都能在环境温度 110°C 以上连续激射, 最好的样管 B385 最高连续工作环境温度可达 150°C 以上, 图 5 给出它的一些参数: 在 $20\sim 110^\circ\text{C}$

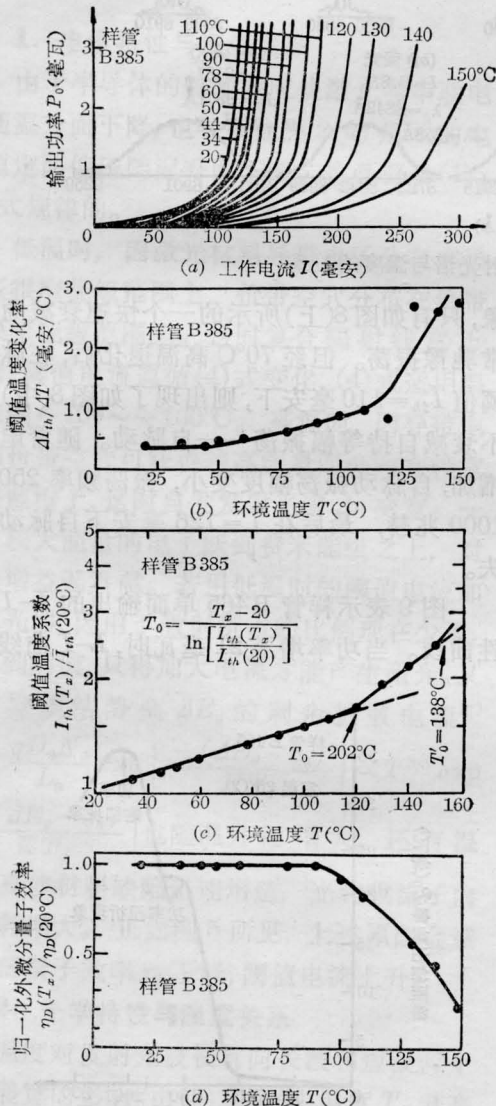


图 5 样管 B385 在不同环境温度下的特性

- (a) P_0 - I 特性 (b) 阈值电流变化率
(c) 阈值温度系数和特征温度 T_0 (d) 外微分子效率

内, 其特征温度 $T_0=202^\circ\text{C}$; 在 90°C 以内, 外微分子效率变化不大; $20\sim 50^\circ\text{C}$ 内, $\frac{\Delta I_{th}}{\Delta T}$ 为 0.36 毫安/ $^\circ\text{C}$, $I_{th}(50)/I_{th}(20)\approx 1.15$ 。

5. 不同温度下的工作寿命

把键合在管座上未封装的激光器, 通 N_2 , 作恒定输出激光功率 $P_0\geq 1$ 毫瓦连续工作寿命试验。由几只电光参数大致相同的激光器试验表明: 实际室温连续工作可达 10^4 小时以上, 而 70°C 下连续工作 $10^3\sim 10^2$ 小时, 在 70°C 比在室温 ($21\pm 3^\circ\text{C}$) 下工作寿命约短 2 个数量级。

图 6 表示样管 B804 在 70°C 下工作到外推室温连续工作 3 万 5 千多小时后退化, 把工作电流降至零, 紧接着又加上工作电流, 再能在 70°C 下连续工作, 得出曲线 (1); 于 70°C 下停止工作 5 小时后再加直流, 得曲线 (2); 当它不能维持在 70°C 下工作, 温降至 60°C , 它又能连续工作一段时间, 如曲线 (3); 同样, 温降至 38°C , 它又连续工作了相当长一段时间, 如曲线 (4)。而且温度愈低, 阈值电流愈低, 工作寿命愈长。

6. 不同温度下发射光谱特性

用液氮冷却与电炉加热, 在 $-40\sim +$

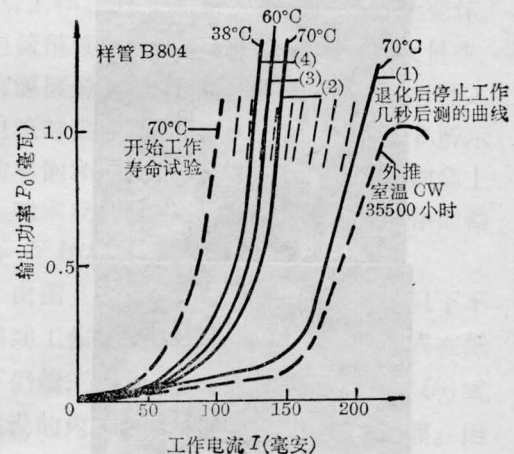


图 6 70°C 高温加速退化后不同温度下测得的 P_0 - I 特性

(实线是退化后测得的; 虚线是加速退化寿命试验时测得的)

40°C 内控制恒温, 对 GaAlAs DH 激光器用 GDM 1000 型双光栅单色仪作光谱测试。如图 7 所示, 激光器荧光光谱随温升而展宽, 峰值波长往长波漂移, +40°C 的荧光长波端比

-40°C 时伸长了 250 Å; 激光峰值波长也随温升而往长波漂移, 在环境温度 -40~+40°C, 其漂移率约 2.78 Å/°C。同一温度下, 激光峰值波长比荧光峰值波长约长 9.4 Å。

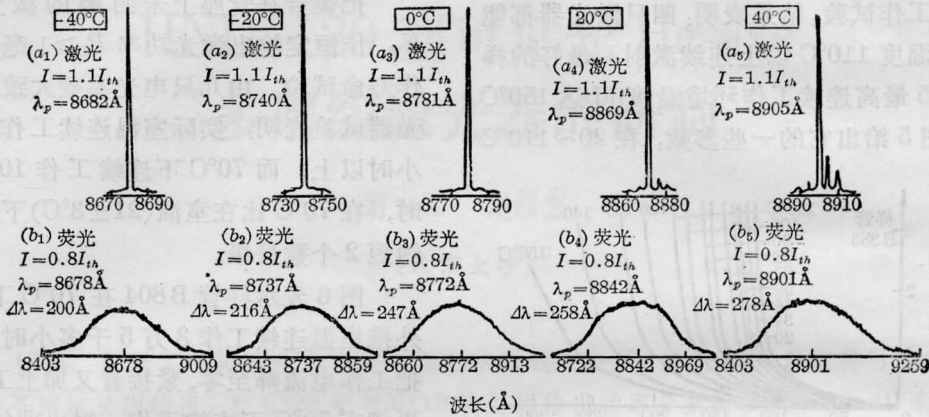


图 7 GaAlAs DH 激光器发射光谱与温度的关系

7. 自脉动和 $L-I$ 曲线扭折现象

我们的激光器在室温 $\tilde{I} = 1.5\tilde{I}_{th}$ 条件下进行过大批测试, 尚未见有明显的自脉动现

象, 只有如图 8(上)所示的一个快速衰减的正常弛豫振荡。但经 70°C 高温退化后, 在脉冲阈值 $\tilde{I}_{th} = 110$ 毫安下, 则出现了如图 8(中)的不衰减自持等幅振荡——自脉动。随着电流增加, 自脉动振荡幅度变小, 振荡频率 250~1000 兆赫, 最后在 $\tilde{I} = 126$ 毫安下自脉动消失。

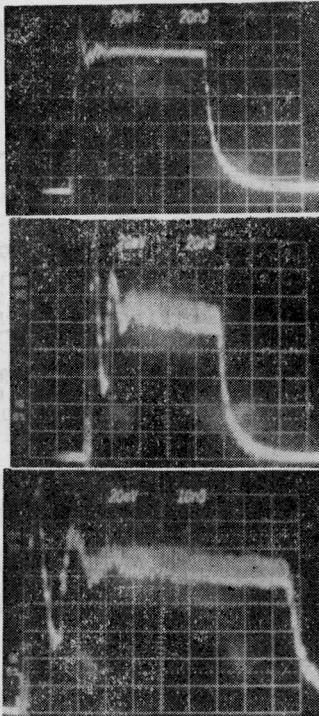


图 8 样管 B 816 振荡特性照片

(上) 高温老化前的快速衰减弛豫振荡; (中) 高温老化后的自脉动现象; (下) 是中的横坐标放大 2 倍的照片。

图 9 表示样管 B 465 单面输出的 $L-I$ 特性曲线。当功率增至 21 毫瓦时, $L-I$ 曲线出

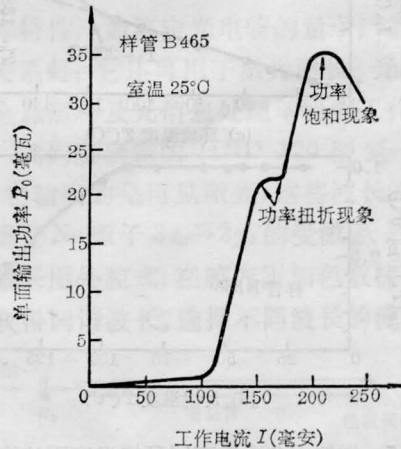


图 9 质子轰击型 GaAlAs DH 激光器输出功率的扭折现象及热饱和效应

现了第一次扭折；功率增至 22 毫瓦时，出现了第二次扭折；功率再增至 35 毫瓦时，功率达到饱和，此后功率随电流增大而下降。

对功率扭折和自脉动现象的关系曾作过对应研究，实验表明：室温连续工作输出几毫瓦有 $L-I$ 扭折的激光器，基本上出现自脉动；但有自脉动的激光器不一定出现 $L-I$ 扭折。

四、分析与讨论

1. 电学特性与温度关系

由于半导体的热敏效应使激光器串联电阻随温升而下降，也导致如图 2(a) 所示的电流恒定而偏压随温升而下降，这是符合(1)、(2)式规律的。

低温时，因激光材料导带电子分布在导带底很窄能级范围上，价带空穴分布在价带顶很窄能级范围上。这时复合辐射线宽 $\Delta\nu$ 很窄，阈值电流遵循(4)式变化，(4)式适用温度范围 $-100 \sim +100^\circ\text{C}$ 。高温时，因导带电子和价带空穴可获得较高能量而分布在较宽能级范围上，这时自发发射光谱 $\Delta\nu$ 变宽。一些有较大能量的电子跃到费米能级之上，对激光增益无贡献。若用低温时的阈值电流加于激光器，因用于激射所占的比例现在少了，达不到阈值，只得加大电流才能产生激光。又穿透异质结势垒 ΔE_g 的剩余扩散电流^[7]

$$J_2 = \frac{qD_n N_c}{L_n} \exp\left[\frac{-(\Delta E_g - \delta_n)}{KT_j}\right] \propto T^{3/2} \exp\left[\frac{-(\Delta E_g - \delta_n)}{KT_j}\right]$$

也随温升而增大。还有温度升高使材料缺陷迅速增殖，光和载流子内部损耗增大。正如图 5 所见，上述原因会造成内部量子效率 η_i 下降，阈值电流上升。

2. 光学特性与温度关系

温度对发射光波长有向长波和短波两个方向展宽的影响：由(9)式可知，温度 T_x 升高时，有源材料带隙 E_g 变小，由(8)式可知波长向长波漂移；电学特性与温度关系的分析中已指出，温升时一些获得较高能量的电子跃

到费米能级之上，这些能量比 E_g 大的电子跟价带空穴复合，发射光波长移向短波。图 7 的实验结果就说明了这两种效应，且因材料受热使波长向长波漂移起主导作用。另外，材料折射率随温度变化也会变化，GaAs 折射率变量 Δn 随温度增量 ΔT_x 的关系为 $\Delta n \approx 4 \times 10^{-4} \Delta T_x$ ，可能是温度变化引起光波长变化而使材料折射率发生变化。

3. 特性异常现象与温度关系

由于有源区存在晶体缺陷，一部分注入电流和光子被缺陷吸收，使局部发热温升，增益随折射率变化 $\left|\frac{dg}{dn}\right|$ 增大，这可能导致图(8b)所示的非本征性自脉动，也可能还有别的原因。自脉动的出现妨碍了激光器的高速率运用。

$L-I$ 曲线扭折现象是增益波导激光器沿有源区的结平面方向上，由于载流子注入和复合使折射率变化，当电流增大、功率增加时，热效应使局部温升也改变折射率，导致光增益局部变化，使条型区中心附近的载流子受激发射光场变形，沿结平面的光场向低增益或损耗区偏移，这就减少趋向功率饱和的光增益而导致图 9 所示的 $L-I$ 扭折现象。显然，工作在 $L-I$ 扭折区会使调制特性变坏。当电流继续增大时，载流子复合产生大量热，使有源区急剧升温，各种缺陷迅速增殖，注入的电流对激光增益已无贡献，达到图 9 所示的功率饱和。此后，电流再增大，温度加急上升，功率反而下降，在这种状态下工作的器件， $p-N$ 结很容易被“烧穿”。

由图 6 的工作寿命试验可知，高温下不能继续工作的激光器，停止工作片刻或在低温下仍能工作相当长时间，这表明并非(6)式所假设的内部缺陷生长的单一退化机理。因为激光器高温下长期工作会使键合和焊料变质，接触电阻大增，热沉难于及时散热，结温升剧增而造成高温下失效，这是又一种退化机理。

(下转第 27 页)

转光谱中可能包含着热带, 因为硝基苯分子中 NO_2 —基团绕 C—N 键扭动的频率很低 ($\sim 50 \text{ 厘米}^{-1}$)^[6], 而热带的存在也会使振转光谱的轮廓变宽。这样的解释是否合乎实际, 还需进一步的研究。

我们测得的硝基苯谱线在相变中的位移与 H. S. Green 等人^[6]在普通 Raman 谱及红外谱中所得的结果是一致的, 他们得出硝基苯此谱线的红外相变频移为 6 厘米^{-1} , 频移方向和本实验相同。A. V. Sechkarev 等人^[7]对硝基苯气、液、固三相 Raman 谱的测量表明, 硝基苯的 Raman 谱线中由 $-\text{NO}_2$ 基团决定的振动模, 其 Raman 频率多数随相变发生位移。 $-\text{NO}_2$ 基团的强极性使硝基苯分子在液态时由于强偶极相互作用而有形成二聚物的倾向(与结晶态中的相似), 而在气

相中分子可以比较自由地转动。这可能是液相 Raman 频率与气相不同的主要原因。 $-\text{NO}_2$ 反对称伸缩振动模的气液相变位移可达 23 厘米^{-1} ^[6], 频移方向与对称振动模相同。

参 考 文 献

- [1] W. Nitsch, W. Kiefer; *Opt. Commun.*, 1977, **23**, No. 2, 240.
- [2] A. C. Eckbreth; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**, 421.
- [3] W. M. Tolles *et al.*; *Appl. Spectrosc.*, 1977, **31**, No. 4, 253.
- [4] International Critical Table, Vol. III, p. 221.
- [5] Jens H. Hg *et al.*; *J. Mol. Structure*, 1971, **7**, 111.
- [6] J. H. S. Green *et al.*; *Spectrochimica Acta*, 1961, **17**, 486.
- [7] A. V. Sechkarev *et al.*; *Chemical Abstract*, 1971, **74**, 17789.

(上接第 33 页)

4. 特性的温度效应控制和利用

实用中把激光器与散热器或致冷器组装在一起能起到稳定内部温度的作用。也有考虑用珀尔帖器件等控制和稳定有源区的温度^[1]。

其实, 半导体激光器特性的温度效应并不都是坏事, 可利用温度变化改变激光波长的原理, 已制出发射波长 $2\sim 34$ 微米的铅盐材料可调谐半导体激光器, 且波长变化与上述相反, 温升时, 铅盐材料激光峰值波长往短波方向移动。

最后, 作者感谢支持过本工作的各位同志。

参 考 文 献

- [1] M. Asada *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, **QE-17**, 611, 619, 787, 796.
- [2] D. Botez; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, **QE-17**, 2300~2302.
- [3] 郑广富等; 《半导体光电》, 1982, No. 2, 10~14, 19~26.
- [4] 郑广富等; 《半导体学报》, 1983, **4**, No. 2, 199~204.
- [5] H. C. Casey, Jr., M. B. Panish; "Heterostructure Lasers, Part A, Part B"; Academic Press, 1978.
- [6] 陈新之等; 《激光》, 1982, **9**, No. 2, 77~80.
- [7] H. Kressel, J. K. Butler; "Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs"; Academic Press, 1977, 253.