

## 温度对半导体激光器退化的影响\*

杨鹏, 胡业荣, 王贵山

(国防科技大学 智能科学学院 装备综合保障技术重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**采取等效电路模型仿真和加速退化试验相结合的方法研究温度对半导体激光器不同退化模式的影响规律。针对半导体激光器有源区退化和腔面退化进行分析,发现有源区退化会使半导体激光器阈值电流增大,而腔面退化会使半导体激光器斜率效率减小;进行了半导体激光器热特性建模与仿真,发现温度升高会使半导体激光器阈值电流增大;利用半导体激光器加速退化试验平台进行了半导体激光器加速退化试验。仿真与试验结果证明:温度升高会加剧半导体激光器腔面退化,而对有源区退化无显著影响。上述结论对进一步完善半导体激光器温度-退化仿真模型,研究温度对半导体激光器退化的作用机理和防护措施有积极作用。

**关键词:**半导体激光器;退化模式;特征参数;等效电路模型;加速退化试验

**中图分类号:**TN248.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)01-045-06

## Impact of temperature on degradations of laser diode

YANG Peng, HU Yerong, WANG Guishan

(Science and Technology on Integrated Logistics Support Laboratory, College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The impact of temperature on laser diode degradations were studied by equivalent circuit model simulation and accelerated degradation experiment. Two degradation modes of laser diode were analyzed and concluded that the active region degradation will cause the threshold current to increase, and the cavity surface degradation will cause the slope efficiency to decrease. The thermal characteristics of laser diode were modeled and simulated, and were concluded that the threshold current increases with the temperature rise. The accelerated degradation experiments were carried out by a laser diode accelerated degradation experiment platform. The results of simulation and experiment showed that the increase of temperature will aggravate the cavity surface degradation, but has no significant effect on the active region degradation of laser diode. These conclusions will improve the laser diode temperature degradation simulation modelling. The current study is beneficial for the mechanism of temperature on laser diode degradation and protective measures.

**Keywords:** laser diode; degradation mode; characteristic parameter; equivalent circuit model; accelerated degradation test

半导体激光器(Laser Diode, LD)是一种比较常见的激光器,被广泛应用于通信、测距、扫描、照明、激光医疗等领域。随着使用范围的拓展,LD退化机理和可靠性研究逐渐成为一个热点。LD退化模式主要包括有源区生长缺陷、腔面损伤、热沉及电极退化<sup>[1-5]</sup>等。影响LD退化的因素有很多,如温度、密封条件、电过载等,其中温度是诱发和加速LD退化的重要外部因素<sup>[6-9]</sup>。

温度对LD退化的作用机理较为复杂,难以用理论推导出准确的表达式,通常通过经验公式进行描述<sup>[7,9]</sup>,或者通过对LD进行加速退化试验,借助电子显微镜观察LD内部物理结构的变化,从而建立温度对退化的影响关系<sup>[10-11]</sup>。这种

直接观察法不仅实施起来有一定难度,而且难以对LD退化程度进行量化。而事实上,LD可观测的电光特性参数很多,包括各种电流(偏置电流、阈值电流)、端电压、光功率、 $I-P$ 曲线、 $I-V$ 曲线等<sup>[12-17]</sup>,如果利用这些外部特性参数来研究温度对LD退化的影响,将有效解决上述问题。

同时引入LD特性参数也带来了问题,例如温度会造成LD电光特性,如 $I-P$ 曲线发生变化,且LD发生退化也可能造成 $I-P$ 曲线变化。所以想要通过LD特性参数来研究温度与退化的关系,首先要厘清温度与特性参数、退化与特性参数之间的关系。

\* 收稿日期:2018-09-18

基金项目:国家部委基金资助项目(9140C710201140C71003)

作者简介:杨鹏(1978—),男,湖北宜昌人,讲师,博士,E-mail:nudtyp7894@163.com

## 1 LD 等效模型与典型退化分析

### 1.1 LD 本征等效电路模型

要分析 LD 退化特性和热特性,通常需建立 LD 本征模型以模拟 LD 特性参数。采取等效电路方法来构建 LD 本征模型,在本征模型基础上,通过叠加和修改模型参数来建立 LD 退化模型和热特性模型。LD 经典等效电路模型较多,采用文献[1,18]中的模型,如图 1 所示。

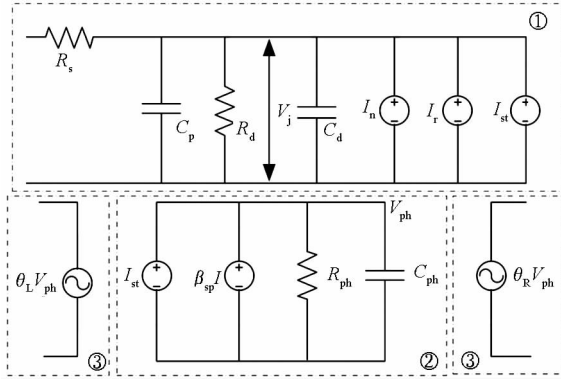


图 1 半导体激光器本征等效电路图

Fig. 1 Eigen equivalent circuit diagram of LD

图 1 包括三个部分:①为 LD 电学部分的等效电路;②为 LD 光学部分的等效电路;③为 LD 光功率转换部分的等效电路,分为左右两个。图 1 中的参数和各部分等效电路的方程式详见文献[18-19]。基于上述模型,只要修改模型参数即可模拟 LD 退化特性和温度特性。基于该等效电路,设置参数以后进行仿真,得到 LD 的  $I-P$  曲线,如图 2 所示。

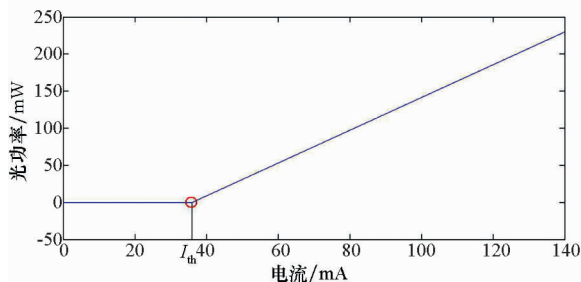


图 2 基于 LD 等效电路模型的  $I-P$  曲线

Fig. 2  $I-P$  curve based on LD equivalent circuit

图 2 中折线拐点处的横坐标即为 LD 的阈值电流,折线右侧部分的斜率称为 LD 的斜率效率,这两个参数可用于反映 LD 光电特性,且它们的变化趋势还可反映 LD 是否发生退化以及发生何种退化。

### 1.2 LD 典型退化模式分析

已有研究<sup>[2,20]</sup>表明:LD 主要退化模式包括有

源区缺陷生长导致的有源区退化、腔面损伤导致的腔面退化、热沉和电极退化等。从激光产生过程来看,有源区是产生光子的区域,腔面是反射光子区域,这两个区域的退化是造成 LD 退化乃至失效的主要原因,因此重点考察温度对这两种退化模式的影响。

首先,文献[18-19]对这两种退化进行了仿真分析,发现在恒电流工作模式下,这两种退化都会导致 LD 输出光功率下降;而在恒功率工作模式下,都会导致 LD 工作电流增加。绘制  $I-P$  曲线后发现,有源区退化会导致阈值电流增大,而斜率效率不变;腔面退化会导致斜率效率减小,而阈值电流几乎不变。因此阈值电流和斜率效率可分别作为有源区退化和腔面退化的表征参数。

其次,从两种退化之间的影响关系来看,有源区退化会吸收载流子,被吸收的载流子不产生光子;腔面退化会吸收光子,被吸收的光子自然无法回到有源区。理论上这两种退化模式之间不存在相互促进或相互抵消的关系,两种退化模式之间可以看作是相互独立的。

## 2 LD 热特性建模与仿真

### 2.1 LD 热特性等效电路模型

目前对 LD 热特性的研究较多,一般认为温度对 LD 的影响包括两个方面:一是对 LD 本征特性造成影响;二是会加速 LD 的退化。

已知 LD 在工作中,除一小部分电流用于受激发产生激光,大部分电流转化为热量被耗散,将其定义为热耗散电流  $I_{HT}(T)$ ,其括号中的  $T$  表示温度,通常利用下式进行估算<sup>[19]</sup>:

$$I_{HT}(T) = I_{th0} \exp\left(\frac{T - T_0}{T}\right) \quad (1)$$

式中, $I_{th0}$ 表示在温度  $T_0$  (表征 LD 温度稳定性的参数,称为特征温度,同一种 LD 的  $T_0$  为一常数) 时 LD 的阈值电流。

将热耗散电流叠加到本征等效电路模型中,于是图 1 修改为如图 3 所示的考虑热特性的等效电路模型。图 3 虚线框中的是由于 LD 热特性所产生的热耗散电流。

文献[19]指出,温度对 LD 本征特性影响主要有三个方面:一是随着 LD 温度升高,耗损系数增大,内量子效率降低,漏电流增加,阈值电流将增大;二是随着 LD 温度升高,LD 输出波长会产生红移现象;三是在恒电流模式下,随着 LD 温度升高,其平均和最大输出光功率会降低。

其中最直观的影响就是增大阈值电流。根据

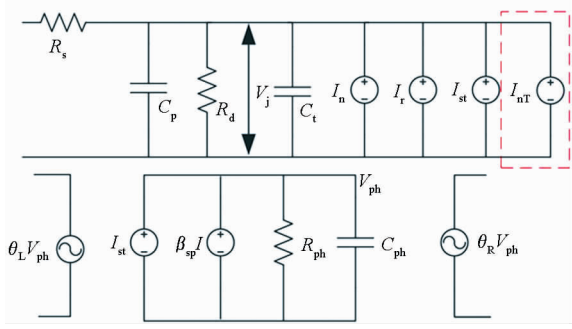


图 3 考虑热特性的 LD 等效电路图

Fig. 3 LD equivalent circuit diagram considering thermal characteristics

试验测定结果可知,阈值电流随温度的变化满足式(2)指数关系<sup>[21]</sup>。

$$I_{th}(T_m + \Delta T) = I_{th}(T_m) \exp\left(\frac{T - T_m}{T_0}\right) \quad (2)$$

式中,  $T_m$  为室温,  $I_{th}(T_m)$  为室温下的阈值电流。

### 2.2 温度对 LD 性能影响的仿真

利用所构建的考虑热特性的 LD 等效电路模型来做进一步仿真分析。在温度区间 298 ~ 333 K 中设置 5 个温度挡位, 输入电流从 0 ~ 140 mA 逐渐增大, 保持其他条件不变, 得到 5 种温度下的  $I - P$  曲线, 如图 4 所示。

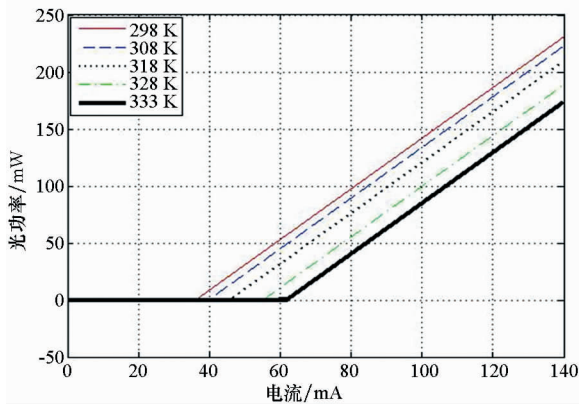


图 4 温度对  $I - P$  曲线的影响

Fig. 4 Influence of temperature on  $I - P$  curve

可以看出, 温度对  $I - P$  曲线的斜率基本没有影响, 而阈值电流随着温度的升高而增大, 曲线向右平移。由此可知, LD 工作温度仅对 LD 阈值电流有影响, 这与有源区退化对 LD 本征特性的影响相同。

### 2.3 温度对 LD 退化影响的定性分析

温度对 LD 退化, 尤其是上述两种退化模式是否会造成影响呢? 考虑到 LD 是一种典型的半导体器件, 借鉴已有的半导体温度退化模型来开展定性分析。

阿伦尼乌斯基于大量试验数据和经验提出了半导体器件的速率公式<sup>[22]</sup>:

$$k = Ae^{-E_a/(RT)} \quad (3)$$

式中,  $k$  为反应速率,  $A$  为提前因子,  $E_a$  为活化能,  $R$  为摩尔常量,  $T$  为温度。若把  $k$  视为半导体缺陷的扩散速率, 可以得出随着温度升高, 缺陷扩散速度加快的结论。

LD 作为半导体器件, 其退化过程基本符合式(3)。但是式(3)并不能解决温度究竟会对哪种退化模式起到加速作用的问题, 目前也没有专门的理论研究, 本文尝试通过试验的方法来解决这个问题。

## 3 温度对 LD 退化影响的试验

### 3.1 试验平台设计

以温度和电流作为加速双应力对 LD 进行加速退化试验。设计开发了 LD 加速退化试验平台, 其功能组成如图 5 所示。

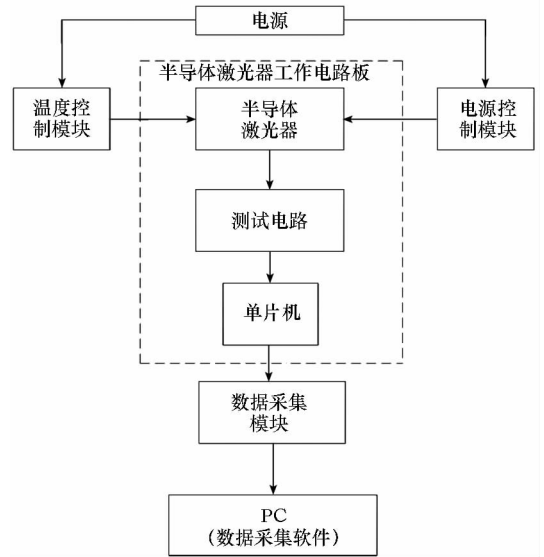


图 5 LD 加速退化试验平台功能框图

Fig. 5 LD accelerated degradation experiment platform

该试验平台包括硬件部分和软件部分, 其中硬件部分包括温度控制模块、电源控制模块、数据采集模块、半导体激光器工作电路板和电源。工作电路板中包含半导体激光器、测试电路和单片机, 单片机主要完成测试电路的数据采集与处理。

试验平台的软件部分主要是利用 Labwindows/CVI 开发的计算机数据采集软件, 安装在一台 PC 机上, 其工作界面如图 6 所示。

### 3.2 试验方案设计

以温度和电流作为加速应力来实施加速退化试验, 进而分析不同温度对有源区退化和腔面退化的影响。试验步骤如下:

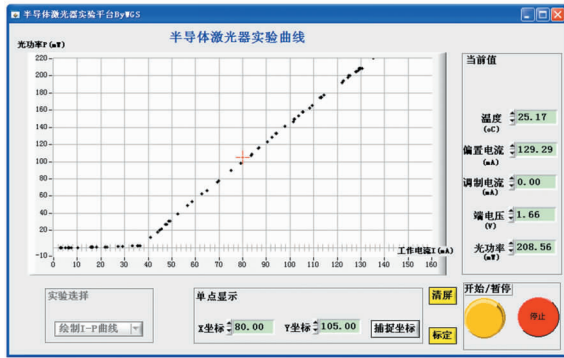


图 6 计算机数据采集软件界面

Fig. 6 Computer data acquisition software interface

**Step1:**以 Sharp 公司的 830 nm 同轴型双异质结 LD 为试验对象,选择 3 个经过标定的全新 LD,它们在温度 298 K 下的  $I-P$  曲线基本重合,即阈值电流和斜率效率基本一致。

**Step2:**从上述 3 个 LD 中取第 1 个 LD,通过温控电路将初始试验温度设置为 293 K,在此温度下 LD 工作特性较好。通过电流控制器使通过

LD 的电流控制在 200 mA。在该条件下让 LD 工作满 120 h。

**Step3:**将温度调节到 298 K,调节 LD 工作电流从小到大缓慢升高,直到 160 mA 或者输出光功率达到 220 mW,记录下电流和光输出功率数据。

**Step4:**按照 Step3 所述方法在温度 298 K 下继续重复 4 次,对 1 个 LD 一共采集 5 组  $I-P$  数据。

**Step5:**选取第 2 个 LD,按照上述方法在 313 K 温度下进行加速退化试验,试验结束后在 298 K 温度下采集 5 组有效试验数据。

**Step6:**选取第 3 个 LD,在 333 K 温度下进行加速退化试验,试验结束后在 298 K 温度下采集 5 组有效试验数据。

**Step7:**利用 MATLAB 对采集到的数据进行曲线拟合,对拟合后的  $I-P$  曲线进行分析,主要对阈值电流和斜率效率进行分析。

### 3.3 试验结果分析

按照上述步骤得到表 1 所示的 3 组数据。

表 1 在 293 K, 313 K 和 333 K 温度下加速退化测到的  $I-P$  数据

Tab. 1  $I-P$  data measured after accelerated degradation in 293 K, 313 K and 333 K

|       |               |        |        |        |        |         |         |         |         |         |
|-------|---------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | $I/\text{mA}$ | 1.298  | 0.975  | 0      | 0      | 0       | 2.677   | 22.043  | 3.592   | 3.764   |
|       | $P/\text{mW}$ | 0      | 0      | 0.036  | 0.009  | 0       | 0       | 0       | 0.094   | 0.157   |
| 293 K | $I/\text{mA}$ | 6.425  | 6.921  | 3.822  | 5.323  | 6.655   | 7.000   | 12.384  | 13.887  | 12.970  |
|       | $P/\text{mW}$ | 0.201  | 0.243  | 0.257  | 0.342  | 0.399   | 0.517   | 0.752   | 1.006   | 0.974   |
|       | $I/\text{mA}$ | 15.794 | 19.164 | 19.608 | 23.115 | 24.007  | 28.002  | 26.558  | 26.611  | 29.687  |
|       | $P/\text{mW}$ | 1.041  | 1.460  | 1.454  | 1.590  | 1.724   | 1.906   | 1.878   | 1.880   | 2.031   |
|       | $I/\text{mA}$ | 27.709 | 27.544 | 28.887 | 31.961 | 32.495  | 31.385  | 35.556  | 37.192  | 39.486  |
|       | $P/\text{mW}$ | 2.047  | 2.019  | 2.005  | 2.195  | 2.400   | 2.386   | 2.959   | 8.513   | 11.674  |
|       | $I/\text{mA}$ | 38.273 | 41.088 | 42.821 | 50.450 | 50.817  | 55.879  | 54.867  | 61.323  | 59.022  |
|       | $P/\text{mW}$ | 17.258 | 19.613 | 21.773 | 24.702 | 26.482  | 31.645  | 32.496  | 35.403  | 37.986  |
|       | $I/\text{mA}$ | 60.484 | 61.424 | 62.635 | 66.439 | 67.239  | 70.416  | 73.072  | 73.193  | 74.488  |
|       | $P/\text{mW}$ | 38.186 | 38.562 | 43.571 | 46.679 | 49.857  | 52.481  | 58.207  | 58.202  | 58.438  |
| 313 K | $I/\text{mA}$ | 75.226 | 77.572 | 79.226 | 79.325 | 82.485  | 87.316  | 84.687  | 91.256  | 90.493  |
|       | $P/\text{mW}$ | 61.107 | 61.199 | 66.614 | 66.634 | 71.040  | 73.509  | 75.697  | 80.828  | 83.123  |
|       | $I/\text{mA}$ | 92.880 | 98.367 | 99.592 | 98.419 | 100.839 | 104.807 | 106.084 | 105.831 | 108.979 |
|       | $P/\text{mW}$ | 85.349 | 93.715 | 93.878 | 93.739 | 96.518  | 101.859 | 102.017 | 103.976 | 106.368 |
|       | $I/\text{mA}$ | 0.977  | 1.173  | 0.954  | 0.469  | 0       | 0.053   | 0.427   | 2.935   | 1.864   |
|       | $P/\text{mW}$ | 0.005  | 0.041  | 0      | 0.002  | 0.006   | 0       | 0.021   | 0       | 0       |
|       | $I/\text{mA}$ | 3.331  | 3.527  | 7.962  | 9.460  | 13.043  | 15.827  | 20.021  | 18.559  | 20.391  |
|       | $P/\text{mW}$ | 0.119  | 0.152  | 0.323  | 0.570  | 0.693   | 0.484   | 0.824   | 1.121   | 1.398   |
|       | $I/\text{mA}$ | 21.717 | 21.747 | 28.177 | 17.083 | 16.799  | 18.890  | 23.784  | 22.493  | 22.828  |
|       | $P/\text{mW}$ | 1.368  | 1.373  | 0.373  | 0.814  | 1.318   | 1.523   | 1.183   | 1.960   | 1.444   |
| 333 K | $I/\text{mA}$ | 25.145 | 30.122 | 31.832 | 30.919 | 37.935  | 35.119  | 35.234  | 36.077  | 39.716  |
|       | $P/\text{mW}$ | 1.533  | 1.059  | 2.056  | 1.596  | 1.958   | 1.523   | 2.407   | 2.283   | 2.117   |
|       | $I/\text{mA}$ | 37.769 | 39.873 | 43.105 | 45.521 | 46.648  | 52.334  | 48.202  | 48.731  | 46.948  |
|       | $P/\text{mW}$ | 3.148  | 1.980  | 4.477  | 8.332  | 8.023   | 13.028  | 13.228  | 12.982  | 12.683  |
|       | $I/\text{mA}$ | 51.349 | 50.612 | 54.735 | 55.350 | 55.430  | 54.643  | 54.463  | 57.017  | 55.858  |
|       | $P/\text{mW}$ | 13.670 | 16.794 | 18.305 | 21.517 | 21.667  | 21.109  | 24.313  | 27.537  | 27.589  |
|       | $I/\text{mA}$ | 58.944 | 62.422 | 64.406 | 66.820 | 71.102  | 72.447  | 72.354  | 73.384  | 77.421  |
|       | $P/\text{mW}$ | 27.646 | 32.638 | 38.559 | 41.327 | 44.031  | 47.204  | 47.306  | 47.845  | 52.651  |
|       | $I/\text{mA}$ | 81.602 | 81.062 | 79.825 | 83.159 | 83.184  | 84.250  | 84.431  | 88.969  | 89.313  |
|       | $P/\text{mW}$ | 55.546 | 54.792 | 54.607 | 54.161 | 54.819  | 56.723  | 58.831  | 63.455  | 64.738  |



表 1(续)

|               |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $I/\text{mA}$ | 0      | 0      | 0.769  | 3.411  | 0      | 2.504  | 2.120  | 6.816  | 3.902  |
| $P/\text{mW}$ | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0.057  | 0.208  | 0.177  |
| $I/\text{mA}$ | 7.389  | 9.851  | 10.792 | 12.250 | 12.048 | 15.651 | 16.490 | 20.289 | 20.180 |
| $P/\text{mW}$ | 0.319  | 0.653  | 0.677  | 0.859  | 0.875  | 1.020  | 1.204  | 1.357  | 1.206  |
| $I/\text{mA}$ | 22.884 | 21.761 | 24.137 | 25.452 | 25.125 | 25.623 | 28.335 | 25.880 | 27.203 |
| $P/\text{mW}$ | 1.464  | 1.539  | 1.782  | 1.930  | 1.889  | 1.840  | 1.772  | 1.847  | 2.004  |
| $I/\text{mA}$ | 30.947 | 31.594 | 37.023 | 37.374 | 37.101 | 41.749 | 44.319 | 43.887 | 42.890 |
| $P/\text{mW}$ | 2.170  | 2.356  | 2.992  | 8.455  | 8.504  | 13.890 | 14.232 | 14.270 | 14.198 |
| $I/\text{mA}$ | 42.032 | 44.005 | 46.230 | 50.495 | 47.409 | 47.759 | 46.615 | 48.758 | 48.988 |
| $P/\text{mW}$ | 14.471 | 17.539 | 19.988 | 22.338 | 22.397 | 21.909 | 21.851 | 21.520 | 23.910 |
| $I/\text{mA}$ | 49.839 | 52.435 | 52.082 | 55.385 | 57.166 | 57.104 | 55.518 | 57.833 | 60.437 |
| $P/\text{mW}$ | 24.089 | 28.789 | 29.647 | 35.773 | 35.843 | 35.959 | 35.939 | 38.536 | 41.566 |
| $I/\text{mA}$ | 64.667 | 66.950 | 66.044 | 70.490 | 74.130 | 78.234 | 75.292 | 77.825 | 77.770 |
| $P/\text{mW}$ | 44.649 | 48.330 | 50.175 | 53.699 | 59.018 | 61.913 | 63.997 | 64.025 | 66.905 |
| $I/\text{mA}$ | 80.114 | 82.295 | 84.487 | 85.515 | 85.386 | 83.467 | 84.198 | 89.778 | 88.899 |
| $P/\text{mW}$ | 69.834 | 70.536 | 72.421 | 73.925 | 75.480 | 75.493 | 75.559 | 80.697 | 80.757 |

用 MATLAB 软件绘制加速温度为 293 K、313 K 和 333 K 的  $I-P$  曲线,如图 7 所示。图中, 293 K 和 313 K 曲线在 0 mA 处功率不为 0,经分析这可能是设备刚运行时电流有跳动造成的误差。

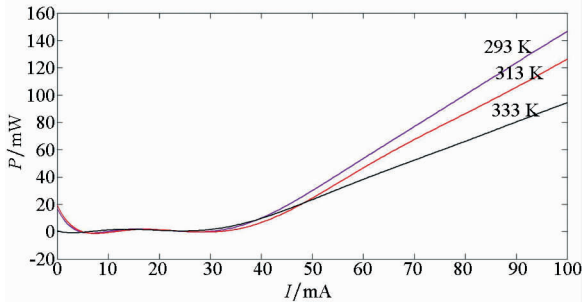


图 7 不同温度加速后的  $I-P$  曲线图

Fig. 7  $I-P$  curves after different temperature acceleration

首先,因为 3 条曲线都是在 298 K(LD 正常工作温度)下测得的,可排除温度对  $I-P$  曲线的影响。3 条曲线主要反映 3 个 LD 的退化区别和趋势,而且 3 条曲线没有完全重合,应该发生了不同程度的退化。其次,3 条曲线前端水平部分除了 0 mA 处的误差其余基本重合,即阈值电流基本相同,据此可排除有源区退化,并推断温度升高对 LD 有源区退化作用不明显。再次,3 条曲线后端有规律性的变化:第一,斜率效率不同,说明发生了腔面退化;第二,随着工作温度升高斜率依次降低,可推断温度升高会加剧腔面退化。

综合前文仿真分析和本节试验结果,得到温度-退化(有源区退化、腔面退化)-参数(阈值电流、斜率效率)之间的关系,图 8 所示。

图 8 中右侧的“有源区退化”和“腔面退化”

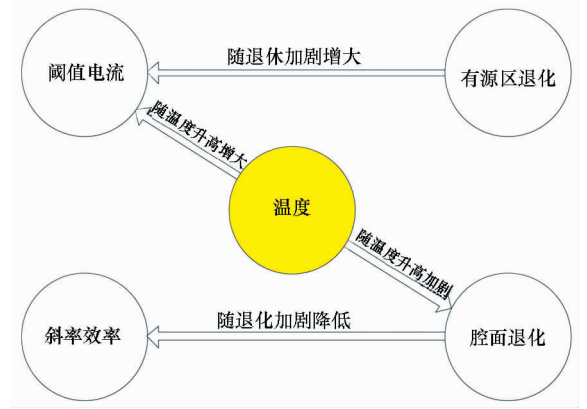


图 8 温度-退化-参数的关系图

Fig. 8 Relationships among temperature, degenerate and parameter

是 LD 两种典型退化模式,左侧的“阈值电流”和“斜率效率”是 LD 特性和退化表征参数,中间的“温度”既是 LD 工作参数,也是影响 LD 退化的因素。通过退化建模与仿真发现,有源区退化会造成 LD 阈值电流增大,而斜率效率不变;腔面退化会造成斜率效率增大,而阈值电流不变。通过热特性建模与仿真发现,温度升高会造成 LD 阈值电流增大,而斜率效率不变。通过双应力下的加速退化试验发现,温度升高会造成腔面退化加剧,而对有源区退化无显著影响。

#### 4 结论

本文通过建模仿真和加速退化试验相结合的方法来研究温度对 LD 退化的影响,得到以下结论:

1) 阈值电流和斜率效率可分别表征有源区

退化和腔面退化,这对于加速退化试验后辨识 LD 发生何种退化模式有重要作用。

2) 通过在不同温度下的加速退化试验,结合退化表征参数,揭示了温度升高会加剧腔面退化,而对有源区退化影响不明显的规律。

所揭示的规律如经过大量试验和标定,可用于构建更为准确的 LD 温度 - 退化仿真模型。此外,温度对单一退化模式加速的结论可用于研究 LD 靶向加速退化试验方法。

## 参考文献 (References)

- [1] Häusler K, Zeimer U, Sumpf B, et al. Degradation model analysis of laser diodes [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2008, 19(1): 160 - 164.
- [2] Oosenbrug A. Reliability aspects of 980 nm pump laser in EDFA application [C]// *Proceedings of SPIE*, 1998: 20 - 27.
- [3] Sanayeh M B, Jaeger A, Tautz S, et al. Investigation of dark line defects induced by catastrophic optical damage in broad-area AlGaInP laser diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(10): 101111 - 101113.
- [4] 黄云, 安振峰. 半导体激光器的主要失效机理及其芯片烧结工艺的相关性 [J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2002, 8(5): 11 - 14.  
HUANG Yun, AN Zhenfeng. The relationship of failure mechanisms and die sinter process of semiconductor laser [J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2002, 8(5): 11 - 14. (in Chinese)
- [5] Huang J S. Reliability-extrapolation methodology of semiconductor laser diodes: is a quick life test feasible [J]. *IEEE Transactions on Device & Materials Reliability*, 2006, 6(1): 46 - 51.
- [6] 范贤光. 脉冲注入式半导体激光器电 - 光 - 热特性及其测试技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 30 - 35.  
FAN Xianguang. Study on the electro-opto-thermal characteristics and its testing technology of laser diode with pules injection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 30 - 35. (in Chinese)
- [7] 王雨三, 张中华. 光电子学原理与应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 36 - 42.  
WANG Yusan, ZHANG Zhonghua. Principles and applications of optoelectronics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002: 36 - 42. (in Chinese)
- [8] 汪瑜. 半导体激光器热特性分析研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2009: 15 - 20.  
WANG Yu. Analysis and research for the thermal characteristic of the semiconductor laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009: 15 - 20. (in Chinese)
- [9] 荣宝辉, 王晓燕, 安振峰, 等. 大功率半导体激光器加速寿命测试方法 [J]. *半导体技术*, 2008, 33(4): 360 - 362.  
RONG Baohui, WANG Xiaoyan, AN Zhenfeng, et al. Accelerated life-time test of high-power laser diode [J]. *Semiconductor Technology*, 2008, 33(4): 360 - 362. (in Chinese)
- [10] 石家纬. 半导体激光器退化及其筛选 [J]. *半导体光电*, 1997, 18(1): 14 - 19.  
SHI Jiawei. Degradation and screen of semiconductor lasers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1997, 18(1): 14 - 19. (in Chinese)
- [11] Deshayes Y, Bechou L, Mendizabal L, et al. Early failure signatures of 1310 nm laser modules using electrical, optical and spectral measurements [J]. *Measurement*, 2003, 34(2): 157 - 178.
- [12] Häusler K, Sumpf B, Erbet G, et al. Degradation analysis of 808 nm GaAsP laser diodes [C]// *Proceedings of the Conference on Laser & Electro-Optics-Pacific Rin*, 2007: 1 - 2.
- [13] Deshayes Y, Bechou L. Estimation of lifetime distributions on 1550 nm DFB laser diodes using Monte-Carlo statistic computations [C]// *Proceedings of the SPIE*, 2004: 1 - 8.
- [14] Meneghini M, Trivellini N, Orita K, et al. Analysis of the role of current, temperature, and optical power in the degradation of InGaN-based laser diodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(2): 222 - 228.
- [15] Li Y. Lifetime extrapolation of 650 nm InGaAlP laser diodes with or without adequate burn-in time [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(1): 92 - 98.
- [16] 齐兰. LC25W - A 半导体激光器调制电路研究和实现 [D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 45 - 49.  
QI Lan. LC25W - A semiconductor research and implementation of laser modulation circuit [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 45 - 49. (in Chinese)
- [17] Madhan M G, Vaya P R, Gunasekaran N. Circuit modeling of multimode bistable laser diodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(1): 27 - 29.
- [18] 杨鹏, 胡业荣. 半导体激光器退化表征与嵌入式测试 [J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(3): 97 - 102.  
YANG Peng, HU Yerong. Degradation characterization and embedded test of laser diode [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, 38(3): 97 - 102. (in Chinese)
- [19] 王贵山. 半导体激光器退化机理与嵌入式测试技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2016.  
WANG Guishan. Research on the degradation mechanism and build-in test of laser diodes [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
- [20] Strauss U, Lermer T, Hager T, et al. Study of defects and lifetime of green InGaN laser diodes [J]. *Physica Status Solidi*, 2012, 209(3): 481 - 486.
- [21] 杨明伟. 半导体激光器组件的传热特性与热电控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 35 - 44.  
YANG Mingwei. Research of heat transfer and thermoelectric control technique of laser diode module [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 35 - 44. (in Chinese)
- [22] 卢其庆, 张安康. 半导体器件可靠性与失效分析 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1981: 59 - 61.  
LU Qiqing, ZHANG Ankang. Reliability and failure analysis of semiconductor devices [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1981: 59 - 61. (in Chinese)