

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902809

基于图形法的超辐射发光二极管性能退化可靠性评估*

何怡刚^{1,2} 张学勤¹ 姚瑶¹ 高贺¹ 汪志宁¹

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009; 2. 武汉大学 电气与自动化学院 武汉 430072)

摘要:超辐射发光二极管(SLD)作为一个重要的特殊光源,针对SLD可靠度和寿命的预测精度要求高的问题,提出了基于图形法的SLD性能退化可靠性评估方法。首先采用加速应力的方式获得SLD的短时间内的无失效数据;其次根据退化轨迹采用最小二乘法进行拟合得到适合于退化轨迹的曲线方程,并根据失效阈值计算出超辐射发光二极管的伪失效寿命;最后采用Minitab对伪失效寿命进行个体分布标识,选用接受度高的对数正态分布,得出常温下失效前的平均工作时间。实验结果表明,该方法可以精准预测SLD的可靠度和寿命,相对于其他方法其精度提高了9.09%。

关键词:超辐射发光二极管;可靠性;个体分布标识;对数正态分布

中图分类号: TN365 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3030

Reliability evaluation of performance degradation of superluminescent diode based on graphic method

He Yigang^{1,2} Zhang Xueqin¹ Yao Yao¹ Gao He¹ Wang Zhining¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: As an important special light source, superluminescent diode (SLD) has been proposed to evaluate the reliability of SLD performance degradation based on graphic methods in view of the high requirement of the reliability and lifetime prediction accuracy of SLD. First, the accelerated stress method is used to obtain the short-term failure-free data of the SLD. Secondly, according to the degradation trajectory, a curve equation suitable for the degradation trajectory is fitted by using the least square method, and the pseudo failure life of the SLD is calculated according to the failure threshold. Finally, Minitab was used to identify the individual distribution of the pseudo failure life, and a log-normal distribution with high acceptance was used to obtain the average working time before failure at room temperature. Experimental results show that this method can accurately predict the reliability and life of SLD, and its accuracy is improved by 9.09% compared with other methods.

Keywords: superluminescent diode; reliability; individual distribution identification; lognormal distribution

0 引言

超辐射发光二极管(superluminescent diode, SLD)是一种自发辐射的单程光放大器件。被用于代替半导体激光器(LD)和发光二极管(LED),具有高功率、宽光谱、低偏振度和短相干光源。该二极管在军用、民用领域均起

到极为重要的作用,如在卫星定位系统中,航空和航天等方面^[1-3]。鉴于超辐射发光二极管的重要性。因此,研究其结构、缺陷、性能变化关系到整个设备的精度与寿命。

SLD的可靠性预测许多文献都进行过论述。文献[4]首先假设SLD的多性能退化过程是一个漂移布朗运动,服从逆高斯分布最后求得其可靠度函数,其次得到其工作10年后组件退化可靠性分量 $R_D(t)$,然后根据光

收稿日期:2019-12-05 Received Date: 2019-12-05

* 基金项目:国家自然科学基金(51977153,51577046)、国家自然科学基金重点项目(51637004)、国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”项目(2016YFF0102200)、装备预先研究重点项目(41402040301)资助

学组件的故障数据估算出 10 年后的突发故障分量 $R_c(t)$, 最后得到可靠度是其 2 个故障分量的乘积。这样是能够得出 SLD 的可靠度预测, 然而 $R_d(t)$ 和 $R_c(t)$ 的计算本身存在误差, 两者最后的乘积会在无形中将误差放大。文献[5]在基于 SLD 的失效机理的基础上, 假设了实验样品在环境应力加速中的性能退化是符合泊松和正态的分布, 进行建模, 依据实验数据求得模型参数数值。这样直接对退化的性能进行假设, 没有考虑到 SLD 性能退化的特性, 因此存在着一些偏差^[6]。

本文首先在合理的温度应力下进行实验, 并获取实际数据的基础上, 对退化轨迹进行拟合, 其次根据失效阈值以及拟合后的伪失效寿命, 最后在此基础上对伪失效寿命数据用 Minitab 对其进行个体分布识别, 采用接受度高的数学分布, 得出 SLD 常温下失效前的平均工作时间。

1 超辐射发光二极管失效机理

超辐射发光二极管由管芯、热敏电阻、热沉、半导体制冷器(TEC)、尾纤和外部壳体组成^[7], 如图 1 所示。其中管芯是 SLD 的重要部分, 其寿命主要决定整个管子的寿命。热敏电阻主要用来时刻检测管芯的温度变化并反馈给半导体制冷器。半导体制冷器主要是使管芯的温度处于正常工作范围, 以延长其工作寿命。热沉具有比较大的热导率, 并且有良好的散热功能。尾纤用来输出光功率。

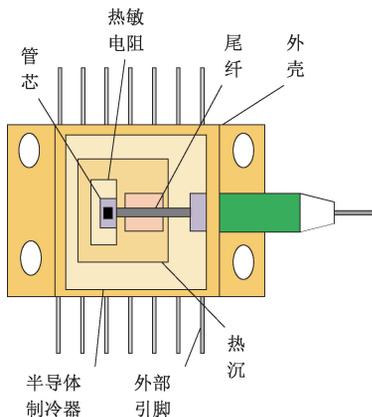


图 1 14 脚蝶形 SLD

Fig. 1 14-foot butterfly SLD

超辐射发光二极管性能退化失效主要是管芯与尾纤的耦合失效以及管芯退化失效造成的。超辐射发光二极管管芯与尾纤之间的耦合级别很高, 偏移过大将会使输出性能退化直至失效。外部应力是其偏移增大的主要原因。

管芯退化失效, 管芯退化主要是在 SLD 工艺的有源

区中存在晶格缺陷, 这些缺陷将在工作过程中逐渐扩大。实验已经证明了这一点。

耦合失效, 主要指管芯与尾纤耦合出偏移量过大, 导致光功率下降至失效阈值。超辐射发光二极管中管芯与尾纤之间的对准级别都是亚微米级别的, 所以对其耦合的要求是很严格的, 偏移量稍微过大就会导致其耦合失效。热敏电阻的失效也是失效的一种。热敏电阻的阻值会随着温度的升高而变化, 这样会导致其材料老化, 有效工作面积减少, 内部裂纹扩大等。

焊料退化失效, 由于超辐射发光二极管是由许多部分组成, 每个组成部分之间的连接需要进行焊接。在长期工作之后焊料会逐渐的老化变质, 形成一个退化源, 从而使整个管子的工作性能退化。

管芯的退化在 SLD 工作的早期就存在, 与 SLD 的制造工艺有很大的关系, 制造之初管芯有源区存在晶格缺陷; 耦合失效和焊料退化失效大多数出现在 SLD 工作的中后期, SLD 在中后期不断工作过程中偏移不断的增加和焊料逐渐的老化。其中管芯退化对 SLD 的整体的性能退化影响最大。

性能退化失效主要值指的是 SLD 的光功率输出在工作过程中下降, 当光功率输出不能满足工作要求时, 即可认为 SLD 失效。在我国一般认为超辐射二极管的光功率下降到其初始值的 70% 时即认为此电子器件失效了^[8]。

2 实验方法

本文选用改进的图形法来进行 SLD 的可靠性分析, 通常, 图形法分为基于性能退化轨迹可靠性评估方法和基于性能退化量分布的可靠性评估方法。退化轨迹法主要是指同一实验样品的性能变化数据可以用一种函数进行拟合, 这样能够反映出实验样品的整体特性。每个独立的实验样品拟合函数之间的参数是有差异的, 反映了实验样品的个体特征。退化量分布法大多数是在实验样品的性能的退化不太明显或个体退化差别较大的情形下^[9]。归因于实验选用的是同一批次的产品, 性能的退化趋势基本一致, 本文在图形法的基础上增加了个体分布识别, 选用退化轨迹法来拟合采集的数据^[10-11]。

2.1 实验数据采集

本文通过采集不同时刻的光功率退化数据, 提取特征, 并结合可靠性估计理论、方法来实现产品的可靠性预测^[12]。

实验是在以温度为加速应力的环境中进行, 每个实验样品之间有一定的距离以保证将样品之间的干扰降到最小。实验随时间增加导致的性能退化都是相互独立的, 性能的退化量会不断地累积, 引起的损失也是会

叠加。

若实验样品个数为 m 个,每间隔 Δt 时间进行一次测量,一共进行 n 次测量,则可时间 t_1, t_2, \dots, t_n 的光功率退化数据,即

$$t_j = x_j \Delta t, 0 < j < n \quad (1)$$

对于第 i 个实验样品 t_j 时刻其性能退化数据为 $(t_j, P_{ij}), i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

由此可以得到关于光功率退化的一个 $m \times n$ 的矩阵 P :

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 曲线拟合

基于已采集的数据,定义光功率退化增量为:

$$\Delta p_{ij} = P_{i0} - P_{ij} \quad (3)$$

式中: P_{i0} 为每个 SLD 实验样品光功率初值; P_{ij} 为第 i 个管子在第 j 次测量时的光功率参数。根据式(3),实验数据的光功率退化增量为:

$$\Delta p = \begin{bmatrix} \Delta p_{11} & \cdots & \Delta p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta p_{m1} & \cdots & \Delta p_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

基于退化增量的数据构建退化曲线,本文采用最小二乘法来构建适当的曲线模型对数据进行拟合,假设 SLD 的光功率退化轨迹的拟合函数。

二次多项式为:

$$\Delta p_{ij} = a_i t^2 + b_i t + c_i \quad (5)$$

每个退化轨迹的拟合参数 a_i, b_i, c_i , 可由最小二乘法求解公式,即:

$$\begin{bmatrix} n+1 & \sum_{j=1}^n t_j & \sum_{j=1}^n t_j^2 \\ \sum_{j=1}^n t_j & \sum_{j=1}^n t_j^2 & \sum_{j=1}^n t_j^3 \\ \sum_{j=1}^n t_j^2 & \sum_{j=1}^n t_j^3 & \sum_{j=1}^n t_j^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_i \\ b_i \\ a_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^n \Delta p_{ij} \\ \sum_{j=0}^n t_j \Delta p_{ij} \\ \sum_{j=0}^n t_j^2 \Delta p_{ij} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.3 失效阈值和伪失效寿命计算

各个实验样品的拟合退化轨迹被用于估计每个实验样品的伪失效寿命。通常,根据失效阈值可以用于来反推每个 SLD 在温度应力加速实验下的伪失效寿命。文献[5]选取了 SLD 的性能退化为 50% 时失效,文献[13]选取了 SLD 选取 70% 本文选择管芯输出的光功率下降到 70% 时认为其失效,即 SLD 光功率退化的累积量为其初始值的 30%, 因此阈值被定义为:

$$D_j = 0.3 \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{i0} \quad (7)$$

将 D 代入拟合得到的公式,即可得到每个实验样品

的伪失效寿命。

2.4 个体分布识别

根据对收集的数据进行处理,利用 Minitab 对伪失效寿命样本数据所服从分布的类型进行检验,从对各种分布检验所得 P 值(检验 P 值,统计量出现观察值的概率,如果很小就有理由怀疑原假设,并做出拒绝,一般来说要 >0.05) 和 AD 值(Anderson-Darling)(AD 值观测数据服从特定分布的程度,代表真实数的累积分布于理论的累积分布的面积差)。通过数据对比和分布函数特性选择最优分布。

3 实验评估模型

通过对 SLD 光功率退化数据的处理,结合伪寿命数据和个体分布的识别,结果表明在多数分布中对数正态分布的可靠性特性量的可行度和有效度更高。

对数正态分布关于时间 t 的概率密度函数 $f(t)$ 为:

$$f(t) = \frac{1}{t\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}[\log(t) - \mu]^2\right) \quad (8)$$

分布函数为:

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx = \Phi\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (9)$$

对数正态分布中的对数均差和对数标准差并没有专门的公式,在求解正态分布的均差和标准差的基础上,利用相同的方法求取 μ 和 σ 。

$$f_L(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x} f_N(\ln x; \mu, \sigma) \quad (10)$$

其中用 f_L 表示对数正态分布的概率密度函数,用 f_N 表示正态分布。因此可以得到对数最大似然函数:

$$l_L(\mu, \sigma | x_1, x_2, \dots, x_n) = -\sum_k \ln x_k + l_N(\mu, \sigma | \ln x_1, \ln x_2, \dots, \ln x_n) = constant + l_N(\mu, \sigma | \ln x_1, \ln x_2, \dots, \ln x_n) \quad (11)$$

令:

$$\frac{d l_L}{d \mu} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d l_L}{d \sigma} = 0 \quad (13)$$

最终可以推导出对数正态分布参数的最大似然估计为:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_k \ln x_k}{n} \quad (14)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_k (\ln x_k - \hat{\mu})^2}{n} \quad (15)$$

可靠度函数 $R(t)$ 为:

$$R(t) = P(t \leq D_j) = \int_0^{\infty} f(x) dx =$$

$$1 - \Phi\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (16)$$

式中: $f(x)$ 是对数正态概率密度函数; $\varphi(x)$ 是标准正态分布的累积分布函数; μ 是对数均值; σ 是对数标准差^[14-15]。

4 实验研究

4.1 SLD 性能退化数据采集

SLD 在常温下光功率的退化是比较缓慢的,如果在常温下进行实验时间会非常长,这样不仅难以得出实验结果,实验的成本也会很高。因此选取 8 个同一批次的 SLD 实验样品在高温度的环境应力下进行寿命加速退化实验。给每个管子通以相同的驱动电流(100 mA),热敏电阻正常工作,半导体制冷器不通电流,使其处于不工作的状态,计算机自动采集 SLD 输出的光功率数据,根据式(3)得到一个为 Δp 的性能退化增量矩阵。将性能退化增量连接成线,如图 2 所示。

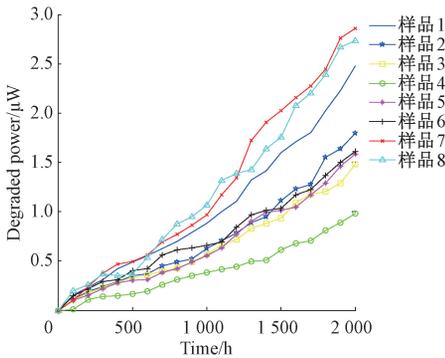


图 2 SLD 退化增量轨迹

Fig. 2 SLD degradation incremental trajectory

从图可以看出,每个 SLD 的光功率退化增量有着相同的增长趋势,每个独立的实验样品之间有着差异,可以用同一函数进行拟合,性能退化不断累积,符合图形法中退化轨迹法的要求。

4.2 SLD 性能退化轨迹拟合

根据式(6)得到各个 SLD 实验样本退化轨迹的参数估计值,结果如表 1 所示。

根据所得的参数绘制拟合后的超辐射发光二极管光功率退化轨迹拟合,如图 3 所示。

实验数据表明 SLD 光功率退化是不断增加的,且退化速率是不断加快的,并不是线性的。图 3 拟合后的 SLD 光功率退化增量是可以函数进行表示并且与原始退化量退化趋势一致,在进行 SLD 伪失效寿命预估的时候可以减少误差。

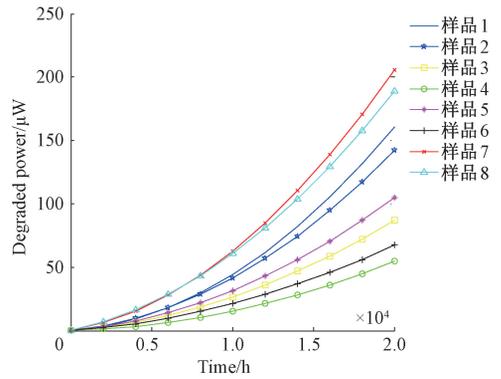


图 3 SLD 光功率退化增量拟合曲线

Fig. 3 SLD optical power degradation incremental fitting curve

表 1 SLD 光功率退化增量拟合轨迹参数

Table 1 SLD optical power degradation incremental fitting trajectory parameters

样品	a_i	b_i	c_i
1	3.615×10^{-7}	0.000 801 4	0.054 88
2	2.962×10^{-7}	0.001 168	0.165 70
3	1.688×10^{-7}	0.000 979	0.005 986
4	1.213×10^{-7}	0.000 309	0.044 01
5	2.099×10^{-7}	0.001 050	0.133 77
6	1.242×10^{-7}	0.000 883 5	0.039 76
7	4.011×10^{-7}	0.002 262	0.110 20
8	3.360×10^{-7}	0.002 724	0.038 60

4.3 SLD 伪失效寿命预估和个体分布识别

根据式(7)计算出超辐射发光二极管的性能退化阈值,带入拟合后所得的退化曲线,即可预估每个实验样品的伪失效寿命,如表 2 所示。

表 2 SLD 伪失效寿命

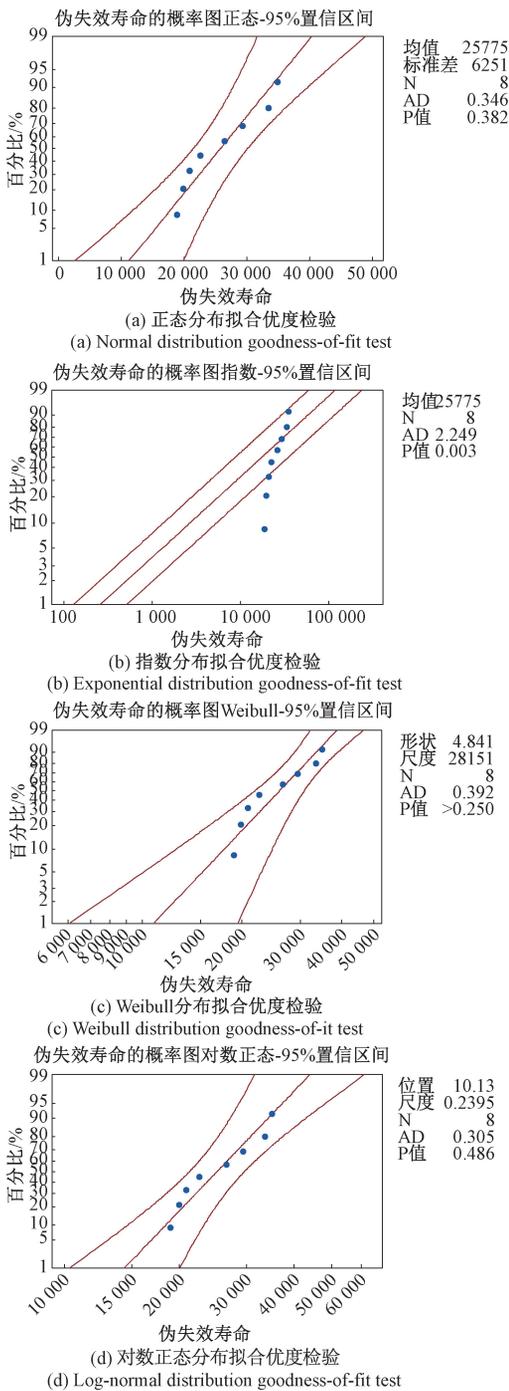
Table 2 SLD pseudo-lifetime

样品	伪失效寿命/h	样品	伪失效寿命/h
1	19 862.96	5	26 441.56
2	22 495.81	6	33 466.04
3	29 335.90	7	18 891.49
4	34 905.10	8	20 799.09

对 SLD 伪失效寿命进行拟合优度检验,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,其中图 4(a)是正态分布在置信区间在 95%情况下的拟合检验,SLD 的为失效寿命数据基本是在置信区间内;图 4(b)是指数分布的拟合检验,数据已经偏离了置信区间;图 4(c)是 Weibull 分布的拟合检验,数据也基本在置信区间范围内;图 4(d)是对数正态分布的拟合检验,数据在 4 个分布中离置信区间中心是最近的。基本可以判断对数正态分布的拟合效果比其他 3 个的效果要好,从后面的数据对比可以验证。

SLD 伪失效寿命拟合优度检验数值,如表 3 所示。



从图4和表3可以看出,SLD 伪失效寿命分别服从正态分布、Weibull 分布和对数正态分布,由于指数分布的 P 值 < 0.05 , 所以有理由怀疑该分布不适用于伪失效寿命数据的检验。其中对数正态分布的 AD 值最小,即真实数的累积分布于理论的累积分布的面积差最小,其 P 值最大,即接受程度也是最大的。故此对数正态分布比其他3种分布更加适合于超辐射发光二极管伪失效寿命和性能评估。

4.4 对数正态分布下的 SLD 可靠度和失效前工作寿命等性能指标的计算

根据式(14)和(15)计算得出对数正态分布的极大似然参数。如表4所示。

表4 对数正态分布极大似然参数估计

Table 4 Estimation of the maximum likelihood parameter of lognormal distribution

参数	μ	σ
数值	10.131 85	0.239 45

根据式(16)得到超辐射发光二极管在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 温度应力下工作 t h 后的伪失效寿命可靠度指标,即可得到实验样本的可靠度函数为:

$$R(t) = \int_0^\infty f(x) dx = 1 - \Phi\left(\frac{\log(t) - 10.131 85}{0.239 45}\right) \quad (17)$$

其可靠度曲线如图5所示。

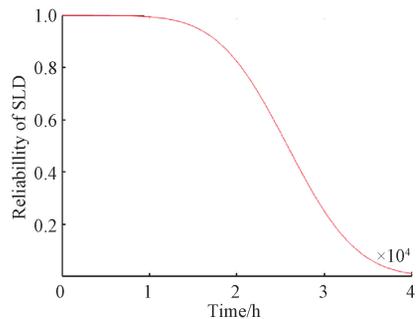


图5 SLD 伪失效寿命可靠度曲线
Fig. 5 SLD pseudo-lifetime reliability curve

从图5可以看出,在10 000 h以前 SLD 的可靠度基本没有什么下降,大约在12 000 h后 SLD 的可靠度是一个转折点。当可靠度为0.7时,这时候可以认为 SLD 已经处于失效的边缘,对应的工作时间可以称为平均失效前工作时间。

由此可靠度曲线可以得到在 Arrhenius 模型温度为 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 应力下超辐射发光二极管的平均失效前工作时间为20 000 h 以上^[16],超辐射发光二极管的活化能取文

献[17]的值约为 0.58 eV,由此可以得到常温 25 °C 时相对于加速温度应力 60 °C 的加速系数大约为 40 多。可以大致的计算出在常温下 SLD 的寿命为 8×10^5 h。由于本文将可靠度为 0.7 的情况视为失效,相对于可靠度为 0.5 时是可以达到 10^6 h。

4.5 实验对比

利用最大似然估计法对正态分布和 Weibull 分布的相关参数计算处理,将正态分布、Weibull 分布和对数正态分布的可靠度曲线放入同一图形中进行对比,如图 6 所示。

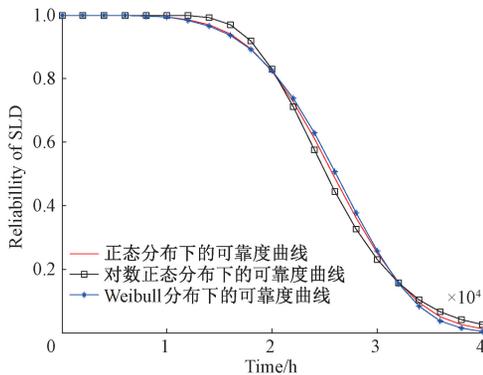


图 6 SLD 正态分布、Weibull 分布和对数正态分布可靠度对比

Fig. 6 Comparison of reliability of SLD normal distribution, Weibull distribution and lognormal distribution

从图 6 可以看到,正态分布和 Weibull 分布两个分布的可靠度曲线基本是重合的,对数正态分布的可靠度曲线与其他两个差别较大。大约在 20 000 和 32 000 h 是 2 个分水岭。在 20 000 h 之前正态分布和 Weibull 分布可靠度下降的比较快,而 20 000 h 之后对数正态分布下降比较快。由于早期的光功率退化主要是管芯有源区的晶格缺陷造成的,偏移失效和焊料老化失效影响较小,因此光功率的退化比较缓慢,到中后期失效的因素影响越来越大,性能退化更快。对比表明该方法下可以提高 SLD 的可靠度和寿命预测精度,相对于其他方法其精度提高了 9.09%。由此也说明对数正态分布所表示的曲线更加符合 SLD 的性能退化趋势^[18-21]。

5 结论

在伪失效寿命为对数正态分布、分布参数估计方法为最大似然估计和失效物理模型为 Arrhenius 模型的情况下,求得 SLD 在温度应力为 60 °C 下的伪失效寿命实验的可靠性特征估计量。从文献[17]求得活化能和文献[22]可以外推出加速系数。在加速应力下 SLD 的寿命有 20 000 h,倒推出常温下超辐射发光二极管的寿命

超过了 8×10^5 h 以上。

表明 SLD 的长寿命和高可靠性能够很好的满足的军用和民用的需求,同时在高温下的实验给后续 SLD 的热应力失效机理分析做出了参考^[23]。

参考文献

- [1] 马静,苑丹丹,晁代宏,等. 基于漂移布朗运动的光纤陀螺加速贮存寿命评估[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(6): 756-760.
MA J, YUAN D D, CHAO D H, et al. Accelerated storage life evaluation of FOG based on drift Brownian movement[J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2010, 18(6): 756-760.
- [2] 段成丽,王振. 超辐射发光二极管的研究进展[J]. 半导体光电, 2013, 34(3): 361-365, 400.
DUAN CH L, WANG ZH. Recent progresses of superluminescent diodes [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(3): 361-365, 400.
- [3] 王佐才,吕雪芹,金鹏,等. 超辐射发光二极管的应用[J]. 红外技术, 2010, 32(5): 297-303.
WANG Z C, LV X Q, JIN P, et al. Applications of superluminescent diodes[J]. Infrared technology, 2010, 32(5): 297-303.
- [4] JING M, YUAN D, CHAO D, et al. Reliability analysis of super luminescent diode based on continuous-state fault tree[C]. International Conference on Reliability, 2011.
- [5] 晁代宏,马静,张春熹. 基于性能退化数据的超辐射发光二极管可靠性评估研究[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3044-3048.
CHAO D H, MA J, ZHANG CH X. Reliability assessment of superluminescent diodes from performance degradation data[J]. Journal of Optics, 2010, 30(10): 3044-3048.
- [6] 胡启国,高展. 多元参数退化的系统相关竞争失效可靠性评估方法[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(6): 1191-1199.
HU Q G, GAO ZH. Reliability evaluation method of system-related competitive failure based on multiple parameter degradation [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(6): 1191-1199.
- [7] 黄英俊,贺慧勇,李章承,等. 超辐射发光二极管光源组件内部电场耦合分析[J]. 半导体光电, 2019, 40(4): 484-488, 493.
HUANG Y J, HE H Y, LI ZH CH, et al. Analysis of electric field coupling in SLD light source module[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(4): 484-488, 493.
- [8] 王琳,史典阳,任艳,等. 超辐射发光二极管 SLD 可靠性浅谈[J]. 科技视界, 2015(20): 89, 153.
WANG L, SHI D Y, REN Y, et al. Discussion on the

- reliability of super luminescent diode SLD [J].
Technological Horizon, 2015(20):89,153.
- [9] 张恒. 基于性能退化数据的可靠性建模与评估理论研究[D]. 南京:东南大学, 2010.
ZHANG H. Research on reliability modeling and evaluation theory based on performance degradation data[D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [10] 李睿智. 基于多性能退化的数控装备可靠性建模与评估[D]. 成都:电子科技大学, 2017.
LI R ZH. Reliability modeling and assessment for numerical control equipment with multi-degradation [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2007.
- [11] 尹继东. 基于性能退化数据的产品竞争失效可靠性评估方法及理论研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
YI J D. Study on reliability evaluation method and theory of product competitive failure based on performance degradation data[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [12] 佐磊, 孙洪凯, 何怡刚, 等. 无失效数据的 MEMS 传感器可靠性分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6):69-75.
ZUO L, SUN H K, HE Y G, et al. Reliability analysis of MEMS sensors with zero-failure data [J]. Journal of Electronic measurement and instrument, 2019, 33(6):69-75.
- [13] 孙孟相, 谭满清, 王鲁峰. 1300 nm 超辐射发光二极管寿命测试[J]. 光学学报, 2010(10):1994-1997.
SUN M X, TAN M Q, WANG L F. Lifetime tests of 1300 nm superluminescent diodes [J]. Journal of Optics, 2010(10):1994-1997.
- [14] 陶鹤, 刘伟, 付晶园. 对数正态分布可靠性模型及应用[J]. 统计与决策, 2019, 35(3):91-94.
TAO H, LIU W, FU J Y. Lognormal distribution reliability model and its application [J]. Statistics and Decision, 2019, 35(3):91-94.
- [15] 顾蓓青, 徐晓岭, 王蓉华. 两参数对数正态分布与威布尔分布的近似极大似然估计 [J]. 统计与决策, 2019, 35(3):36-41.
GU P Q, XU X L, WANG R H. Approximate maximum likelihood estimation of two-parameter lognormal distribution and Weibull distribution [J]. Statistics and Decision, 2019, 35(3):36-41.
- [16] ANDREEVA E V, IL'CHENKO S N, KOSTIN Y O, et al. Broadband superluminescent diodes of NIR range with quasi-Gaussian spectra [C]. International Conference on Advanced Optoelectronics & Lasers, IEEE, 2013.
- [17] HAMAMOTO K, OHGOH T, ASANO H. Reliability improvement of superluminescent diodes emitting at 1.0 μm band using InGaAsP barrier structure [J].
Electronics Letters, 2013, 49(6):409-410.
- [18] 董力, 陆中, 周伽. 基于遗传算法的混合威布尔分布参数最小二乘估计 [J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(5):711-718.
DONG L, LU ZH, ZHOU J. Least square estimation for mixed Weibull distribution based on genetic algorithm [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(5):711-718.
- [19] 穆艳, 王永兴, 邹积岩, 等. 基于威布尔分布的真空断路器可靠性分析 [J]. 高压电器, 2020, 56(1):30-35.
MU Y, WANG Y X, ZOU J Y, et al. Reliability analysis of vacuum circuit breaker based on Weibull distribution [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):30-35.
- [20] 徐天群, 陈跃鹏, 刘焕彬. 正态分布场合下无失效数据的可靠性参数估计 [J]. 统计与决策, 2012(16):8-11.
XU T Q, CHEN Y P, LIU H B. Reliability parameter estimation of zero-no-failure data under normal distribution [J]. Statistics and Decision, 2012(16):8-11.
- [21] 聂志强, 王明培, 孙玉博, 等. 基于韦布尔分布和对数正态分布的高功率半导体激光器寿命估计和失效分析研究 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(S1):70-77.
NIE ZH Q, WANG M P, SUN Y B, et al. High power semiconductor laser lifetime prediction and failure analysis based on Weibull and log-normal distribution [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(S1):70-77.
- [22] 刘晓娟, 王华伟, 徐璇. 考虑多退化失效和突发失效之间竞争失效的可靠性评估方法 [J]. 中国机械工程, 2017, 28(1):7-12.
LIU X J, WANG H W, XU X. Reliability assessment based on competition failure considering multi-degradation and catastrophic failure [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(1):7-12.
- [23] 何怡刚, 周健波, 刘嘉诚, 等. 改进 IGBT 动态模型与电-热-力多物理场耦合失效分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8):46-54.
HE Y G, ZHOU J B, LIU J CH, et al. Measurement resolution enhancement by improved Dither method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(8):46-54.

作者简介



何怡刚, 1992 年于湖南大学获得硕士学位, 1996 年于西安交通大学获得博士学位, 现为合肥工业大学博士生导师, 主要研究方向为电路理论及其应用, 模拟与混合信号电路测试与故障诊断、电信号检测、智能电网、卫星通信监测和智能信号处理。

E-mail:18655136887@163.com

He Yigang received M. Sc. from Hunan University in 1992 and Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 1996. He is currently a Ph. D. supervisor at Hefei University of Technology. His main research interests include power electronic circuit theory and its applications, testing and fault diagnosis of analog and mixed-signal circuits, electrical signal detection, smart grid, satellite communication monitoring, and intelligent signal processing.



张学勤 (通信作者), 2018 年于皖西学院获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为新型电子元器件的可靠性。

E-mail: 3075178300@qq.com

Zhang Xueqin (Corresponding author) received B. Sc. from West Anhui University in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest includes reliability of new electronic components.