

文章编号: 0253-2239(2010)10-3044-05

基于性能退化数据的超辐射发光二极管可靠性 评估研究

晁代宏 马 静 张春熹

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要 作为光纤陀螺仪中的关键元件与薄弱环节,超辐射发光二极管(SLD)的可靠性在很大程度上决定了光纤陀螺仪的可靠性。针对其长寿命特点,研究了基于性能退化数据的可靠性评估方法。在对SLD失效机理分析的基础上,提出用正态-泊松复合随机过程模型对产品对环境应力作用下的退化特性进行建模,基于所得模型,由SLD的性能退化信息估计模型中的参数进而评估得到SLD可靠性指标。克服了传统可靠性分析方法依赖寿命数据的缺点,能够在没有寿命数据的情况下评估得到SLD的可靠性指标,从而节约大量的试验经费和时间。

关键词 光学器件;超辐射发光二极管;可靠性;性能退化数据;正态-泊松模型

中图分类号 TN365 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.3044

Reliability Assessment of Superluminescent Diodes from Performance Degradation Data

Chao Daihong Ma Jing Zhang Chunxi

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract As the most important and fragile part of fiber optic gyroscopes (FOG), the reliability of superluminescent diodes (SLD) determines the operational reliability and maintenance expenses of FOGs. Reliability of SLDs is studied based on degradation data for their long life characteristics. Based on analysis of degradation mechanisms of SLDs under environmental stress firstly, normal-poisson hybrid stochastic process model is presented as their life distribution model whose parameters can be estimated from the degradation measures of the SLDs. The proposed method can obtain SLDs' reliability without failure data, therefore overcomes the drawbacks of traditional time-to-failure analysis method which requires failure data. This estimation method shows its significance in test costs and time.

Key words optical devices; superluminescent diode (SLD); reliability; performance degradation data; normal-Poisson model

1 引 言

超辐射发光二极管(SLD)集半导体激光器(LD)大输出功率和发光二极管(light-emitting diode)宽光谱的优点于一体,被广泛应用于光纤陀螺仪(FOG)、光信息处理(OIP)、生物医学和光相干测试技术(OCT)等光传感和光通信领域^[1]。SLD在军事领域,尤其是在光纤陀螺仪上的应用^[2~5],要

求其具有高可靠性和长寿命的特点,因此必须对SLD开展可靠性研究工作。

近年来,国内外一些学者用不同方法研究了半导体激光器和SLD的可靠性^[6~9],但所采用方法都是基于产品寿命的传统可靠性试验及评估方法,即产品作为两态(正常状态1和失效状态0)型产品对待,要么正常工作,要么失效,因而试验过程中仅记

收稿日期: 2010-01-12; 收到修改稿日期: 2010-02-25

基金项目: 国防预研项目(513090601)资助课题。

作者简介: 晁代宏(1980—),男,博士,讲师,主要从事光纤陀螺及其器件可靠性等方面的研究。

E-mail: daihongchao@vip.sina.com

录失效和试验时间。对于 SLD 这类长寿命、难以失效的产品,上述方法的缺点是需要长试验时间来获取寿命数据。事实上,可以利用产品性能退化过程中所包含的信息对产品可靠性进行评估。SLD 在试验过程中其性能参数是逐渐退化的,性能退化到一定程度(阈值,即失效判据)即失效,此退化过程中包含着大量与产品寿命有关的有用信息,所以从产品性能参数的变化着手,通过对表征产品功能的某些量进行连续测量,取得退化数据,利用退化数据对产品功能的退化过程进行分析,就可以对产品可靠性做出评定^[10~12],本文即用此方法对 SLD 的退化

数据进行建模,进而得到其可靠性指标。

2 SLD 退化失效机理分析

SLD 是一种自发辐射的单程光放大器件,当管芯有正向电流注入时,有源层内反转分布的电子从导带跃迁到价带或杂质能级,与空穴复合而释放出光子,管芯发出的光通过与管芯耦合的尾纤输出。如图 1 所示,SLD 由管芯、热敏电阻、热沉、半导体制冷器、尾纤和外壳等部分组成,管芯和热敏电阻键合在热沉上,热沉固定在制冷器上,制冷器固定在底座上,尾纤与管芯的发光端面耦合。

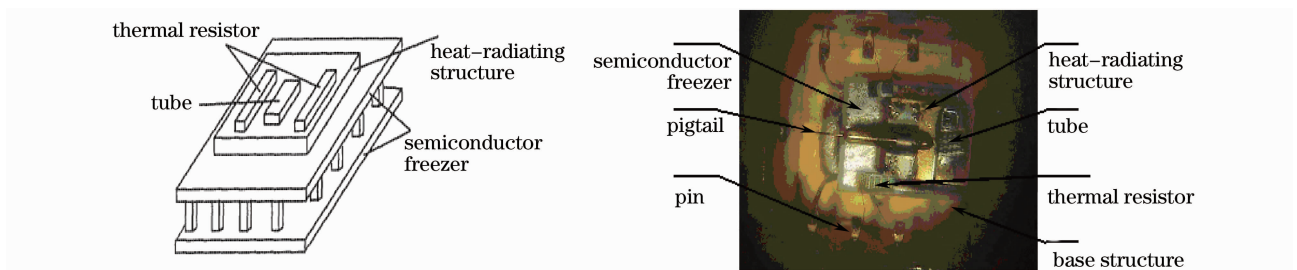


图 1 SLD 结构图

Fig. 1 Configuration sketch of SLD

SLD 退化失效主要是管芯与尾纤的耦合失效和管芯失效,SLD 模块中尾纤与管芯间的耦合为亚微米量级的对准,管芯与尾纤的耦合偏移将导致光源光功率逐渐减小直至失效。引起光纤与管芯耦合偏移的主要因素是外界应力。管芯退化的直接原因是有源区内存在晶格缺陷以及这些晶格缺陷在持续工作过程中的逐渐扩大,这一结论已由实验所证实。例如,使用透射式扫描电子显微镜对半导体激光器逐层精细观察,发现在其退化过程中,有源区内开始存在某些暗点(即不发光的非均匀小区),最后成为一片暗区^[7]。伴随着缺陷的形成、生长和迁移以及 p-n 结的退化,注入效率将会降低,同时光化学反应会引起表面腐蚀、表面漏电和接触层退化,进而导致接触处金属的内扩散、在结晶及接触处污染或生长出须状物构成漏电通道等,这些综合因素最终会引起 SLD 管芯的退化。由上述分析可知,管芯有源区内缺陷的生成速度和管芯与尾纤的耦合偏移速度是决定 SLD 寿命的重要因素。

对于 SLD 而言,输出光功率是其最重要的性能参数,因此,选择输出光功率作为 SLD 的性能退化参数,其失效判据为:在施加恒定电流(一般为 100 mA)下持续通电工作,测量输出光功率的变化,当输出光功率下降到初值的 50% 时即认为 SLD 失效^[8]。

3 SLD 可靠性评估模型

通过对 SLD 进行敏感应力分析^[12]可知,温度是对 SLD 性能影响最大的环境应力,其机理就是温度应力会加速 SLD 管芯有源区缺陷的生长和管芯与尾纤耦合的偏移,即 SLD 退化与温度应力冲击正相关。基于此机理,可以假设 SLD 在温度应力中造成损伤的冲击数量遵循参数为 $\lambda[S, t]$ 的泊松过程 $\{N_{\text{poisson}}(t); t \geq 0\}$,即 $N_{\text{poisson}}(t)$ 为在时间 $[0, t]$ 内系统承受冲击的次数,参数 S 为温度应力水平, t 为时间。SLD 每次承受冲击而造成损伤的程度是个随机变量,假设每次承受冲击引起的损伤程度是随机变量 $X_i (i=1, 2, \dots)$,且持续冲击引起 SLD 的损伤程度有某种累积效应,即冲击引起的损伤是可叠加的,因此,SLD 在时刻 t 的损伤应是 $N_{\text{poisson}}(t)$ 次冲击造成的损伤叠加的结果,即 SLD 在 t 时的损伤 $x(t)$ 是随机过程 $\{N_{\text{poisson}}(t); t \geq 0\}$ 和 $\{X_i, i=1, 2, \dots\}$ 的某种复合而成的结果,即 $x(t)$ 是复合随机过程。

下面研究 SLD 退化失效模型,结合上述分析结果,提出如下假设:

1) 产品的性能退化过程具有单调性,即性能发生的退化不可逆;

2) 冲击发生过程 $\{N(t); t \geq 0\}$ 为一泊松过程,其强度记为 $\lambda[S, t]$, $\lambda[S, t]$ 随温度应力水平变化而

变化,温度应力水平 S 确定后, $\lambda[S, t]$ 为常数 λ ;

3)第 $k(k=1, 2, \dots)$ 次冲击对产品造成的性能损失记为 Δp_k , 假设 $\Delta p_k(k=1, 2, \dots)$ 独立同分布于正态分布 $N_{\text{poisson}}(\mu_p, \sigma_p^2)$, 其均值和方差均为固定未知参数。

本文只研究 SLD 在定温(即温度应力水平恒定不变)条件下的退化试验以及基于退化数据的可靠性分析。基于上述假设,产品 t 时刻性能参数退化量 $P(t)$ 是退化量初值与 $[0, t]$ 时间段内性能参数退化量累积增量 $\Delta P(t)$ 之和,即

$$P(t) = P_0 + \Delta P(t). \quad (1)$$

又根据泊松过程的性质知 $[0, t]$ 时间段内冲击发生次数 $N(t)$ 的期望函数 $E[N(t)] = \lambda t$, 即该段时间内冲击发生次数的平均值为 λt , 则 t 时刻性能参数退化量增量 $\Delta P(t)$ 为

$$\Delta P(t) = \sum_{k=1}^{[N]} \Delta p_k. \quad (2)$$

由于 $\Delta p_k \sim N_{\text{Normal}}(\mu_p, \sigma_p^2)$, Δp_k 相互独立,由随机变量函数分布的计算公式可知 t 时刻性能参数退化量增量 $\Delta P(t)$ 的分布也为正态分布,且

$$\Delta P(t) \sim N_{\text{Normal}}(\mu_p \lambda t, \sigma_p^2 \lambda t). \quad (3)$$

当 SLD 的性能退化量增量 $\Delta P(t)$ 达到其失效阈值 c 时,则 SLD 失效,此时的时刻记为 T ,则任意 t 时刻 SLD 的失效概率为

$$\begin{aligned} F(t) &= P\{T \leq t\} = P\{\Delta P(t) \geq c\} = \\ &1 - P\{\Delta P(t) \leq c\} = \\ &1 - P\left\{\frac{\Delta P(t) - \mu_p \lambda t}{\sqrt{\sigma_p^2 \lambda t}} \leq \frac{c - \mu_p \lambda t}{\sqrt{\sigma_p^2 \lambda t}}\right\} = \\ &1 - \Phi\left\{\frac{c - \mu_p \lambda t}{\sqrt{\sigma_p^2 \lambda t}}\right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 Φ 表示标准正态分布函数。令 $a = \mu_p \lambda$, $b = \sqrt{\sigma_p^2 \lambda}$, 由此可得任意 t 时刻产品的可靠度函数 $R(t)$ 为

$$R(t) = 1 - F(t) = \Phi\left\{\frac{c - at}{b\sqrt{t}}\right\}. \quad (5)$$

评估出未知参数 a, b 和 c 后,即可基于可靠度函数 $R(t)$ 计算得到产品的寿命、可靠寿命等各种可靠性指标。

4 模型参数统计分析方法

为求 SLD 的寿命分布函数,需结合试验数据估计出(4)式中的未知参数。假设试验中的产品数量为 m 个,每间隔 Δt 时间对产品性能参数进行一次测试,共测试 n 次,具体的数据为一个 $m \times n$ 矩阵 \mathbf{P}

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

元素 $p_{ij}(i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个 SLD 的第 j 次测试所得到的性能退化参数的数据。假设 $p_{i0}(i=1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个 SLD 性能退化参数的初始值,则根据(1)式可得 SLD 性能退化参数退化量增量为

$$\Delta P = \begin{bmatrix} p_{11} - p_{10} & p_{12} - p_{10} & \cdots & p_{1n} - p_{10} \\ p_{21} - p_{20} & p_{22} - p_{20} & \cdots & p_{2n} - p_{20} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} - p_{m0} & p_{m2} - p_{m0} & \cdots & p_{mn} - p_{m0} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据退化失效判据可知,失效阈值 c 等于 SLD 输出光功率初始值的 50%, 由此得 c 的估计值为

$$\hat{c} = 50\% \times \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta P_{i0}. \quad (8)$$

利用矩阵 ΔP 中的元素 $\Delta P_{ij}(i=1, 2, \dots, m)$, 则可求得在每个测量时点 SLD 性能退化量增量均值和方差的估计值为

$$\hat{\mu}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta P_{ij}, \quad (9)$$

$$\hat{\sigma}_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\Delta P_{ij} - \hat{\mu}_j)^2. \quad (10)$$

根据关系式 $\mu_j = at$ 和 $\sigma_j^2 = b^2 t$, 利用数据 $\{(\hat{\mu}_j, \hat{\sigma}_j^2); j=1, 2, \dots, n\}$, 采用最小二乘法可以求解得到 a 和 b 的估计值为

$$\hat{a} = \frac{1}{mn(n+1)\Delta t/2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij}, \quad (11)$$

$$\hat{b} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{(m-1)n(n+1)\Delta t/2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\Delta P_{ij} - \hat{\mu}_j \lambda]^2}. \quad (12)$$

将求出的数值代入(4)式中即可得到 SLD 的寿命分布函数。

5 试验研究

5.1 SLD 性能退化试验

由于 SLD 在常温(25 °C)下退化缓慢^[6], 为了增加退化速率,选取 8 个 SLD 试验样品在 60 °C 下进行退化试验。SLD 性能退化试验如图 2 所示,多路光源驱动仪给试验样品提供驱动电流/温控电流,

由前面分析可知,温度应力与 SLD 管芯退化速度密切相关,因此,在试验过程中 SLD 样品只施加驱动电流,不加温控以达到对 SLD 管芯加速退化的目的。SLD 输出光功率由多通道光功率测试系统进行测量。此外,为后续研究做准备,试验中还采用多路静态温度测试仪测量 SLD 表壳温度,多通道光源驱动仪测量并输出驱动/温控电流值和 SLD 内部热敏电阻值。上述各个测试通道数据通过串行接口由计算机数据采集系统进行自动采集。退化试验共进行 2000 h,(6)式中产品性能退化参数退化率增量矩阵 ΔP 的元素数为 8×20 个,把采集的退化数据(每 100 h 记录一次数据)连接成退化曲线如图 3 所示。

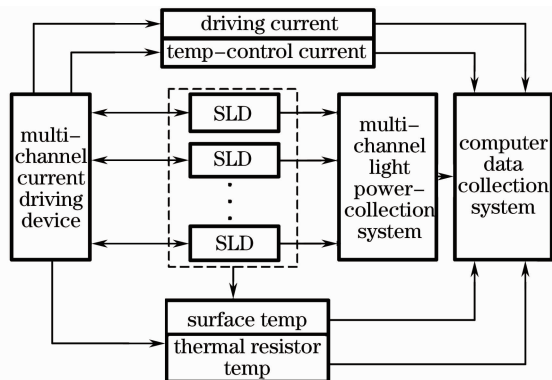


图 2 SLD 性能退化试验装置

Fig. 2 Configuration of SLD's performance degradation test

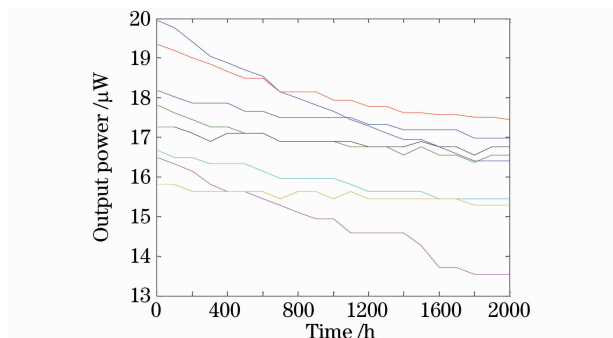


图 3 SLD 性能退化数据

Fig. 3 SLD's performance degradation data

5.2 模型参数评估及结果

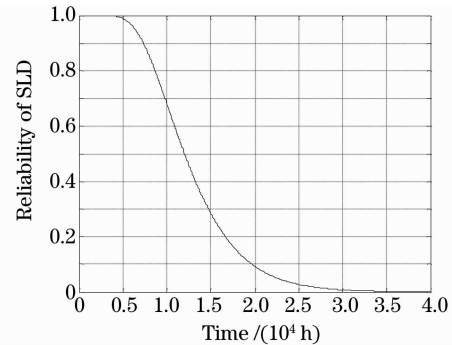
采用前述参数评估方法对试验数据进行处理,得到正态-泊松复合随机过程模型中各参数的评估结果如表 1 所示。

将参数 a, b 和 c 的估计结果代入基于正态-泊松复合随机过程模型的可靠性评估模型(5)式中,便可以获得 SLD 在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下工作时间 t 后的可靠度指标,即可得到产品的可靠度曲线如图 4 所示。

表 1 模型参数评估结果

Table 1 Evaluated results of model's parameters

Parameter	$a / (\mu\text{W}/\text{h})$	$c / \mu\text{W}$	$b / (\mu\text{W}/\text{h})$
Evaluation	0.0007	8.54	0.03

图 4 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 SLD 可靠度曲线Fig. 4 Reliability curve of SLD at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

由图可知在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,SLD 工作 8760 h 后其可靠度 $R(8760)$ 为 0.8081,工作 10000 h 产品的可靠度 $R(10000)$ 为 0.6859。由产品寿命计算公式可知, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,SLD 平均寿命为

$$T_{\text{MTBF}} = \int_0^{+\infty} R(t) dt = 13195 \text{ h}$$

利用前期相关研究结论^[8],应用 Arrhenius 模型作为 SLD 温度应力加速方程,SLD 激活能取文献[6]中值 0.82 eV,则可以计算出 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度应力相对于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度应力的加速系数^[11]为 28.58,由此得 SLD 在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的平均寿命约为 377113 h。

5.3 讨论

1) 利用离散模型建立了基于 SLD 性能退化数据的可靠性评估模型,利用 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 SLD 性能退化数据评估得到了 SLD 在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下工作时的可靠性指标,其它温度应力下的工作可靠性指标的获取方法本文未进行研究;

2) 由 SLD 退化机理分析可知,温度应力会加速 SLD 有源区缺陷的增长速度,即有源区缺陷增量与温度应力冲击正相关。通过研究提高 SLD 管芯的设计、生产工艺,减小有源区缺陷的初始数量和缺陷的生产速度,即减小模型中参数 λ 值,由于 $a = \mu_p \lambda$,因此参数 a 同样减小,由(5)式可知此举措能提高产品的可靠性;

3) 研究 SLD 组件的可靠性设计技术,改进组件的热学性能,热学性能的改善会使得每次温度冲击对管芯的破坏力以及管芯与尾纤的耦合偏移降低,即会减小模型中参数 μ_p 值,由于 $a = \mu_p \lambda$,因此参数 a 同样减小,由(5)式可知这同样会提高产品的可靠性。

6 结 论

基于 SLD 性能退化数据应用正态-泊松复合随机过程模型进行了建模,由理论推导得到了 SLD 可靠性评估模型及其参数估计方法,通过 SLD 性能退化试验运用上述方法评估得到了其可靠性指标,文中所用方法能够在产品试验无失效数据的情况下对产品进行可靠性评估,对类似长寿命产品的可靠性评估具有借鉴意义。本文重点研究了 60 °C 下 SLD 可靠性评估问题,并基于其他文献相关结论对 25 °C 下 SLD 的平均寿命进行了粗略估计。

参 考 文 献

- 1 Wei W. S., Zhang C. X., Ma J. *et al.*. Relationship between performance of a 1.3 μm double heterojunction super-luminescent diode and its operation current and temperature[J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(6): 409~411
韦文生,张春熹,马 静等.超辐射激光二极管的研究与应用[J].*激光与红外*,2003,**33**(6):409~411
- 2 H. C. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. Zhang Guicai, Wang Wei transl., Beijing: National Defence Industry Press, 2002, 30~33
H. C. Lefevre. 光纤陀螺仪[M].张桂才,王巍译,北京:国防工业出版社,2002,30~33
- 3 Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng *et al.*. Effect of polarization interference on fiber optic gyro performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1140~1144
米 剑,张春熹,李 铮等.偏光干涉对光纤陀螺性能的影响[J].*光学学报*,2006,**26**(8):1140~1144
- 4 William K. Burns, Chinlin Chen, R. P. Moeller. Fiber-optic gyroscopes with broad-band sources[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1983, **1**(1): 98~105
- 5 Liu Dewen, Xiao Wen, Wei Bo. Mechanism of radiation effects on fiber optic Gyros[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 419~422
刘德文,肖 文,魏 博.光纤陀螺受辐照影响机理分析[J].*光学学报*,2008,**28**(3):419~422
- 6 Sun Mengxiang, Tan Manqing, Wang Lufeng. Lifetime tests of 1300 nm superluminescent diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1994~1997
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*,2008,**28**(10):1994~1997
- 7 Cao Yulian. Research on the Reliability of High Power Semiconductor Quantum Well Lasers [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003, 42~51
曹玉莲.高功率半导体量子阱激光器的可靠性研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2003,42~51
- 8 Yasumasa Kashima, Akio Matoba, Hiroshi Takano. Performance and reliability of InGaAsP superluminescent diode [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11): 1644~1649
- 9 Chao Daihong, Ma Jing, Li Xiaoyang. Research on the reliability of SLD through accelerated life testing[C]. *Proc. ICRMS*, 2009, 1263~1267
- 10 Huang W., Reliability Analysis Considering Product Performance Degradation [D]. Tusson: The University of Arizona, 2002
- 11 Li Xiaoyang. Study on Accelerated Testing of Multi-state Degraded System[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 81~89
李晓阳.多态退化系统加速试验技术研究[D].北京:北京航空航天大学,2007,81~89
- 12 Jianyin Zhao, Fang Liu. Reliability assessment of the metallized film capacitors from degradation data [J]. *Microelectronics Reliability*, 2007, **47**: 434~436