

空间辐射下卫星光通信系统半导体激光器的可靠性估计

刘 韵¹ 赵尚弘¹ 杨生胜² 李勇军¹ 强若馨¹

¹空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

²兰州空间技术物理研究所真空低温技术与物理实验室, 甘肃 兰州 730000

摘要 基于空间辐射和器件辐射效应的特点,选取正态分布对辐射的剂量率和单位辐射剂量造成的性能退化量进行描述,得到了卫星光通信系统中半导体激光器的可靠度函数。进而以高轨空间辐射条件为背景,对器件的性能退化量进行了模拟,在模拟数据的基础上利用最大似然估计法计算性能退化量的分布函数,得到了器件的可靠度曲线以及平均寿命。最后分析了减少测试时间,以较少的样本数量进行估计的可行性。

关键词 激光器; 半导体激光器; 空间辐射环境; 性能退化; 可靠性; 正态分布

中图分类号 TN214 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.051401

Reliability Evaluation of Space Irradiated Laser Diode in Laser Satellite Communication System

Liu Yun¹ Zhao Shanghong¹ Yang Shengsheng² Li Yongjun¹ Qiang ruoxin¹

¹Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

²Cryogenics Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000, China

Abstract Laser diode is the preferred laser source for satellite laser communication system, and it is significant to analyze its reliability in space radiation environment. According to the character of space radiation and devices' radiation dose, normal distribution is used to describe both space radiation dose rate and performance degradation per unit radiation dose, and the reliability function of laser diode is achieved. The performance degradation in high-orbit radiation environment is simulated. On the basis of the simulated data, devices' distribution function is evaluated by maximum likelihood estimate, and then the reliability curve and average life are obtained. The feasibility of using less experimental time and less sample number to evaluate distribution function is analyzed.

Key words lasers; laser diode; space radiation environment; performance degradation; reliability; normal distribution

OICS codes 140.5960; 060.2605; 350.6090

1 引言

半导体激光器由于具有效率高、寿命长、体积小、成本低和调制容易等特点,成为空间激光通信系统的首选光源器件^[1]。外太空是激光传输的理想通道,但是,其中存在着大量的质子、电子、重离子和高能带电粒子等空间辐射源,对半导体激光器的工作性能造成直接影响,甚至导致器件失效。

文献[2-6]对半导体激光器的空间辐射效应进行了理论以及实验研究,得到了在质子、电子、伽玛射线等辐照下器件的性能退化数据,并分析了退化机理,然而没有对器件在空间辐射环境中的寿命问题进行评估。文献[7-9]采用加速老化方法,在使用温度应力、电流应力的情况下对器件的加速寿命进行监测,进而分析和推导出正常条件下的器件寿命。文献[10-11]基于性能退化轨迹对器件的实际退化模型进行估计,利用

收稿日期: 2013-10-07; 收到修改稿日期: 2013-11-04; 网络出版日期: 2014-04-29

作者简介: 刘 韵(1990—),女,硕士研究生,主要从事卫星光通信方向研究。E-mail: ikmnji@126.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,主要从事光信息技术方向研究。E-mail: zhaoshangh@aliyun.com

失效阈值外推出器件寿命,但是上述文献均针对地面环境中器件的性能退化进行研究,考虑到空间环境的特殊性,不能用地面条件所得结果对星载器件进行有效评估。文献[12]利用正态-泊松复合随机过程对超辐射发光二极管的退化特性进行建模,得到了器件的可靠性指标,但是由于辐射粒子的多样性,正态-泊松过程在对器件性能损失的估计上与实际情况存在差异。因此,针对卫星光通信系统中半导体激光器所处空间辐射环境的特点以及器件的损伤机理,选取正态分布对辐射环境和器件的性能损伤进行描述,进而对空间辐射环境中半导体激光器的可靠性进行估计。

2 半导体激光器的空间辐射可靠性模型

已有文献对美国大气海洋局发布的高轨空间辐射粒子数据进行统计与分析,结果表明空间粒子的注量率概率分布近似符合正态分布^[13],注量率和剂量率的关系可表达为

$$\dot{D} = 1.6 \times 10^{-8} \varphi E / (L \rho), \quad (1)$$

式中 \dot{D} 为剂量率($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); φ 为辐射粒子注量率[particle/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)]; E 为粒子能量(MeV); L 为入射粒子射程(cm); ρ 为材料密度(g/cm^3)。可以看出,剂量率也近似服从正态分布。因此,假设激光器在空间环境中所受辐射的剂量率服从参数为 (μ, σ) 的正态分布,记为 $\dot{D} \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

半导体激光器受到空间辐射的影响,导致性能参数的退化,假设单位强度辐射 D_0 所引发的性能退化量 ΔC 为一个随机量,其大小服从正态分布,即 $\Delta C \sim N(\mu_c, \sigma_c^2)$ 。在不考虑退火的情况下,认为半导体激光器的性能退化为单调不可逆过程,是单位辐射所造成性能退化量的累加,且各退化量独立同分布于参数为 (μ_c, σ_c) 的正态分布。根据上述假设,对于空间辐射环境中半导体激光器的可靠性进行建模。

当器件在空间环境中运行 t 时刻时,空间辐射造成的性能退化量为 $\Delta C(t)$,令 C_0 为初始时刻的退化量,则此时激光器的总退化量 $C(t)$ 可表示为

$$C(t) = C_0 + \Delta C(t). \quad (2)$$

空间辐射的剂量率服从正态分布 $\dot{D} \sim N(\mu, \sigma^2)$,因此材料在 t 时刻吸收的辐射剂量的期望 ΔD 为 μt ,该时刻的性能退化量 $\Delta C(t)$ 即为 $\mu t / D_0$ 个单位辐射剂量导致的退化量的累积

$$\Delta C(t) = \sum_{i=1}^{\mu t / D_0} \Delta C_i, \quad (3)$$

式中 i 表示第 i 个单位辐射剂量; $\Delta C_i \sim N(\mu_c, \sigma_c^2)$,为第 i 个单位辐射剂量导致的性能退化量。由于 ΔC_i 独立同分布于正态分布, $\Delta C(t)$ 亦服从正态分布, $\Delta C(t) \sim N(\mu t \mu_c / D_0, \mu t \sigma_c^2 / D_0)$ 。定义 C 为器件失效的判决阈值,即退化量累积值达到该判决阈值时则认为器件失效,得到 t 时刻激光器失效的累积分布函数 $F(t)$ 为

$$F(t) = P\{C(t) \geq C\} = 1 - P\{C(t) \leq C\} = 1 - \Phi \left\{ \frac{C - \mu t \mu_c / D_0}{\sqrt{\mu t \sigma_c^2 / D_0}} \right\}, \quad (4)$$

其中 Φ 表示标准正态分布函数。

可靠度函数 $R(t)$ 为

$$R(t) = 1 - F(t) = \Phi \left\{ \frac{C - \mu t \mu_c / D_0}{\sqrt{\mu t \sigma_c^2 / D_0}} \right\}. \quad (5)$$

空间辐射效应可以分为总剂量效应(TID)以及位移损伤效应(DDD)。其中,总剂量效应主要由伽玛射线和电子产生,在材料中产生电子-空穴对,引起氧化层和界面态,对器件的表面性能造成影响,导致半导体激光器的输出光功率、斜率效率下降;位移损伤效应主要由质子、中子导致,入射粒子与材料原子核之间发生机械碰撞,使得原子核离开其正常的点阵位置,在材料中形成缺陷,导致少数载流子寿命减少、电导率下降以及载流子迁移率的降低,进而造成激光器的输出功率减小、阈值电流增加。

基于半导体激光器空间辐射的损伤机理,对器件的可靠度函数进行分析。对于分布反馈(DFB)激光器,在伽玛射线辐射条件下器件主要受到总剂量效应影响,其辐照前后输出功率变化较小且随辐射剂量变化不明显,具有较强的抗伽玛辐射能力;在质子辐照条件下,位移损伤效应造成的载流子寿命减小,使得激光器阈值电流增大,量子效率下降,进而导致输出功率减小,具有较强影响。因此,仅对激光器的位移损伤效应进行分析。

半导体激光器输出的光功率由器件的工作电流 I 、阈值电流 I_{th} 以及外微分子子效率 η_d 决定,若 λ 为输出激光波长,则光功率 P 为

$$P = \eta_d (I - I_{th}) \frac{1.24}{\lambda}. \quad (6)$$

位移损伤效应在半导体材料中形成的缺陷在禁带中引入附加能级,从而增加了载流子复合几率,减小了少数载流子寿命(简称少子寿命),少子寿命与辐照注量和辐射剂量之间的关系为

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K\varphi = \frac{1}{\tau} + K_d D, \quad (7)$$

式中 τ 为辐照后的少子寿命; τ_0 为辐照前的少子寿命; K 、 K_d 分别为辐照注量和辐射剂量条件下的寿命损伤常数。半导体激光器辐照后与辐照前阈值电流的比值可以近似为

$$\frac{I_{th(\varphi)}}{I_{th(0)}} = \frac{\tau_0}{\tau} = 1 + \tau_0 K_d D. \quad (8)$$

不考虑辐射对外微分子子效率以及中心波长的影响,半导体激光器的输出光功率仅取决于工作电流和阈值电流的大小。若维持输出功率不变,辐照后的激光器工作电流为

$$I_{p(\varphi)} = I_{p(0)} + \tau_0 K_d D I_{th(0)}. \quad (9)$$

定义输出光功率恒定条件下激光器工作电流的变化量为器件的性能退化量,失效的判决阈值为 20%,初始时刻的退化量为 0,则器件的退化由空间辐射造成的性能退化量决定

$$\Delta C = \frac{I_{p(\varphi)} - I_{p(0)}}{I_{p(0)}} = \frac{\tau_0 K_d D I_{th(0)}}{I_{p(0)}} = K_p D, \quad (10)$$

$$K_p = \frac{\tau_0 K_d I_{th(0)}}{I_{p(0)}}. \quad (11)$$

因此,认为半导体激光器受到单位剂量辐射时,性能退化量的数学期望等于 K_p ,即 $\Delta C \sim N(K_p, \sigma_c^2)$ 。此时,器件的可靠度函数可以由(5)式转化为

$$R(t) = \Phi \left\{ \frac{C - \mu t K_p / D_0}{\sqrt{\mu t \sigma_c^2 / D_0}} \right\}. \quad (12)$$

3 仿真与分析

在实际实验中,通过对维持输出光功率恒定的工作电流进行测试,能够获得出不同时刻被测试器件的性能退化量,进而计算出退化量所服从概率分布的参数,最终得到器件的可靠度函数。此处通过蒙特卡罗(Monte Carlo)法,对器件的性能退化量进行模拟,并在模拟数据的基础上,分析计算可靠度函数。

在轨卫星所受空间辐射主要来自范·艾伦带、太阳质子事件和银河宇宙射线,其中包含大量的质子、电子以及高能带电粒子,通过对美国大气海洋局发布的高轨空间辐射粒子数据的统计与分析能够得出,在不同能量范围内空间粒子的分布均呈正态分布,由(1)式对注量率进行转化,即得到在高轨运行卫星中半导体激光器所受到空间辐射剂量率的概率分布 $N(0.0005, 0.00002)$ 。以测量间隔 Δt 时长内器件所受到的辐射为单位辐射剂量,数据模拟所需参数的设定见表 1^[5,13]。

表 1 数据模拟参数设定

Table 1 Parameter setting for simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
Device quantity N	10	Expectation of dose rate μ	0.0005 Gy/s
Interval Δt	100 h	Expectation of degradation K_p	5×10^{-4}
Experimental time T	100000 h	Variance of degradation σ_c^2	2×10^{-5}

通过仿真得到了 10 个激光器以 100 h 为测试间隔的性能退化模拟量,总的测试时间为 100000 h,图 1 为其中一个器件的性能退化模拟量。利用最大似然估计法,对器件性能退化量所服从正态分布的参数进行估计,即

$$\begin{cases} \hat{\mu} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i = \bar{X} \\ \hat{\sigma}^2 = (1/n) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2 \end{cases}, \quad (13)$$

式中总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, x_1, x_2, \dots, x_n 为 X 的一个样本值。可以得到 $K_p = 5.0001 \times 10^{-4}$, $\sigma_c^2 = 1.9774 \times 10^{-6}$, 二者与设定值之间的误差分别为 0.002% 和 1.13%, 能够较好地还原出原分布函数的参数情况。

将性能退化量分布的参数估计值代入(12)式, 即可获得器件的可靠度函数, 见图 2, 当时间为 40000 h 时, 可靠度为 0.5。则器件的平均寿命为

$$M_{\text{ur}} = \int_0^{+\infty} R(t) dt = 43678 \text{ h}. \quad (14)$$

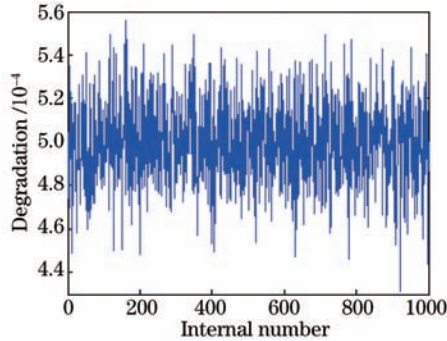


图 1 每测试间隔的性能退化

Fig.1 Simulated performance degradation for each internal

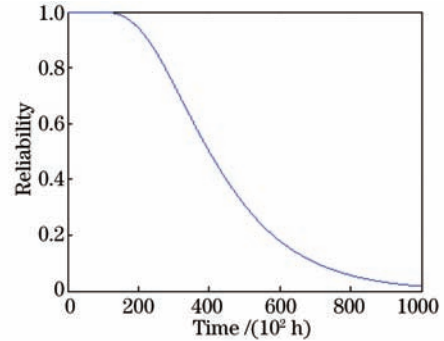


图 2 器件可靠度函数

Fig.2 Function of reliability

由于半导体激光器的寿命较长, 在实际的性能退化实验中实现相应时长的测试难度较大。考虑到对退化参数的确定是基于样本值的最大似然估计, 可以仅通过较短时间的测试结果, 对总体的参数进行估计, 在误差允许范围内降低对实验时间的需求。图 3 所示为不同样本数量时性能退化量期望、方差的误差, 可见误差随样本数量的增加逐渐减小并趋于稳定, 在样本数约为 300 时平均寿命估计值为 43637 h, 即能较为准确地对参数进行估计。在此基础上, 还可以通过适当减小测试间隔进一步降低测试的时间长度。

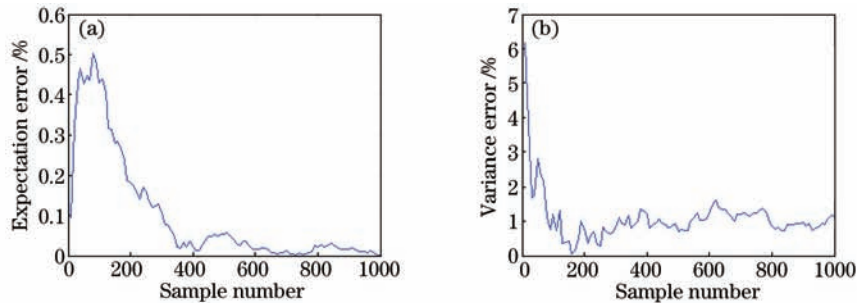


图 3 性能退化分布(a)期望和(b)方差估计值的误差随样本数量变化曲线

Fig.3 (a) Expectation error and (b) variance error versus sample number

由上述分析可以得出, 结合器件的辐射退化机理, 采用随机过程对卫星光通信系统中半导体激光器的退化规律进行描述, 能够实现对器件可靠性曲线以及平均寿命的估计, 同时还可以使用少量性能退化数据完成随机过程参数的估计, 进而获得可靠度函数。然而在对空间辐射下卫星光通信系统半导体激光器可靠性的估计中, 没有考虑器件的退火现象, 这将在预测结果中造成一定的误差, 同时, 总剂量效应导致的性能退化也影响着器件的可靠性和寿命, 这些都是研究半导体激光器可靠性需要进一步解决的问题。

4 结 论

通过对空间辐射剂量率以及器件辐照损伤特点的分析, 利用正态分布对空间辐射条件下半导体激光器的可靠性进行了建模, 得到了器件的可靠度函数。基于性能退化的模拟量, 对器件性能退化量所服从正态

分布的参数进行了最大似然估计,进而计算得到模拟条件下半导体激光器的平均寿命为43678 h。同时分析了以较少的样品数量对参数进行估计的可行性,降低了对实验时间的要求,有利于对寿命较长器件可靠性的估计。

参考文献

- 1 Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The Technologies and Systems of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010. 211-214.
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 211-214.
- 2 A H Johnston, T F Miyahira, B G Rax. Proton damage in advanced laser diodes[J]. IEEE Trans on Nuclear Science, 2001, 48(6): 1764-1772.
- 3 J Baggio, C Brisset, J L Sommer, *et al.*. Electrical and optical response of a laser diode to transient ionizing radiation [J]. IEEE Trans on Nuclear Science, 1996, 43(3): 1038-1043.
- 4 D Sporea. Effects of gamma-ray irradiation on quantum-well semiconductor lasers[C]. Atlanta: IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2004. 137-144.
- 5 O Gilard. Theoretical study of radiation effects on GaAs/AlGaAs and InGaAsP/InP quantum-well lasers[J]. Appl Phys, 2003, 93(4): 1884-1888.
- 6 Huang Shaoyan, Liu Minbo, Tang Benqi, *et al.*. Proton irradiation effects on multi-quantum-well laser diodes and their annealing characteristics[J]. High Power Laser and Partical Beams, 2009, 21(9): 1405-1410.
黄绍艳, 刘敏波, 唐本奇, 等. 多量子阱激光二极管质子辐射效应及其退火特性[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(9): 1405-1410.
- 7 H S Joo, S C Jeon, B Lee, *et al.*. Reliability of InGaAs waveguide photodiodes for 40-Gb/s optical receivers[J]. IEEE Trans on Device and Materials Reliability, 2005, 5(2): 262-267.
- 8 Ding Ying, Wang Lufeng, Zhao Lingjuan, *et al.*. Reliability analysis of 1.55 nm DFB laser diodes for optical fiber communication[J]. J Optoelectronics·Laser, 2004, 15(4): 393-396.
丁颖, 王鲁峰, 赵玲娟, 等. 用于光纤通信的1.55 nm DFB激光器的可靠性分析[J]. 光电子·激光, 2004, 15(4): 393-396.
- 9 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.
- 10 Li Lingling, Gu Xunhua, Li Fengqiang, *et al.*. Reliability assessment method based on GaAs laser performance degradation[J]. J Engineering Design, 2012, 19(3): 166-181.
李玲玲, 顾训华, 李凤强, 等. 基于GaAs激光器性能退化的可靠性度量方法[J]. 工程设计学报, 2012, 19(3): 166-181.
- 11 Deng Aimin, Chen Xun, Zhang Chunhua, *et al.*. Reliability assessment based on performance degradation data[J]. J Astronautics, 2006, 27(3): 546-552.
邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 546-552.
- 12 Chao Daihong, Ma Jing, Zhang Chunxi. Reliability assessment of superluminescent diodes from performance degradation data[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3044-3048.
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.
- 13 Chang Guolong. The Study of the Influence of Radiation Effect on Laser Diodes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. 65-72.
常国龙. 半导体激光器辐射效应及影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 65-72.