

半导体激光器空间辐射应力加速寿命实验模型

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 兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000

摘要 通过对半导体激光器在空间环境中辐射损伤机理的分析,得到了器件在辐射条件下的性能退化规律以及辐射过程中的退火规律。在此基础上,建立了辐射应力加速寿命实验模型,获得了故障时间、加速因子、故障概率分布函数、概率密度函数和平均故障前时间的表达式。模拟了三组应力分别为 100、50 和 10 Gy/s 情况下器件的性能退化数据,进而对加速寿命实验模型的参数进行了估算,求得器件在 0.03 Gy/s 的正常应力条件下的故障时间为 43862 h。基于威布尔故障分布,利用应力为 50 Gy/s 的加速试验模拟数据,得到了器件的故障概率分布函数以及平均故障前时间,其平均故障前时间约为 39755.8 h。

关键词 激光器;辐射应力;加速寿命实验;空间辐射效应;退火效应

中图分类号 TN214 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0502001

Accelerated Life Testing Model of Laser Diodes under Space Radiation Stress

Liu Yun¹ Zhao Shanghong¹ Yang Shengsheng² Li Yongjun¹ Qiang Ruoxin¹

(¹ Information and Navigation Couege, Air Force Engineering University, Xian, Shaanxi, 710077)

² Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000

Abstract By analyzing the radiation impact mechanism in space environment, the irradiated performance degradation and the annealing effect during radiation are achieved. On the basis, accelerated life testing model under radiation stress is established, the expressions of failure time, accelerate factor, cumulative distribution function, probability density function and mean time to failure are obtained. Degradation datas under the stresses of 100, 50 and 10 Gy/s are simulated, and parameters in the accelerated life testing model are estimated. The failure time under normal radiation stress (0.03 Gy/s) is 43862 h. Basing on Weibull distribution and the simulated data under the stress of 50 Gy/s, both cumulative distribution function and mean time to failure of laser diodes are calculated, the mean time to failure is about 39755.8 h.

Key words lasers; radiation stress; accelerated life testing; space radiation effects; annealing effect

OCIS codes 060.2605; 140.5960; 350.6090

1 引 言

半导体激光器以其效率高、体积小、寿命长、成本低和易调制等特点,成为卫星光通信系统的首选光源器件。外太空中存在大量的质子、电子、重离子和高能带电粒子等空间辐射源,卫星光通信系统中的半导体激光器将受到空间辐射的影响,造成工作性能下降,甚至导致器件失效,所以需要通过地面实验的方

式检测器件的在轨寿命。由于空间环境中器件所受辐射剂量率较低,约为 0.03 Gy/s(高轨)^[1],以该剂量率进行地面试验时,器件性能退化速度缓慢,所需测试时间远大于实验总时间。因此,需要增大引起故障的应力,即在不改变故障机理和行为的前提下,通过加速应力试验来缩减器件寿命的测试时间。

对于半导体激光器,通常以温度或者电压、电

收稿日期: 2013-11-04; 收到修改稿日期: 2013-11-24

作者简介: 刘 韵(1990—),女,硕士研究生,主要从事卫星光通信可靠性方面的研究。E-mail: ikmnji@126.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光信息技术方面的研究。E-mail: zhaosh@aliyun.com

流、电功率等作为加速应力,使用 Arrhenius 模型和逆幂率模型对器件寿命进行计算。文献[2-5]对温度应力条件下器件的性能与寿命进行了分析测试,并利用加速模型得到了正常应力条件下的器件寿命;文献[4-6]使用电应力进行加速,通过增加工作电流的方式加快器件老化;文献[7-8]将多种应力结合,在多应力条件下得出结果。然而,这些加速寿命试验针对的是在地面环境中工作的器件,没有考虑空间辐射效应,而辐射是影响在轨器件工作性能的重要因素,在讨论器件使用寿命时必须对其进行分析。文献[9-20]对质子、电子、 γ 射线等辐照条件下半导体激光器的性能退化机理进行了研究,并得到了辐照条件下器件性能参数的退化数据,文献[20-23]分析了辐照后器件的退火规律,但是上述文献均针对性能参数的变化规律,没有对器件在空间辐射环境中的寿命进行评估。

综上所述,考虑到空间辐射环境对卫星光通信系统中半导体激光器寿命的重要影响,提出以辐射剂量率为加速应力,结合器件的辐射损伤以及退火机理建立半导体激光器的辐射应力加速寿命实验模型对空间环境中半导体激光器的寿命进行分析。

2 半导体激光器的辐射损伤机理

半导体激光器在空间辐射环境中主要受到位移损伤效应以及电离效应两方面的影响。在位移损伤效应中,入射粒子与原子核发生弹性碰撞,使晶格原子离开正常位置形成缺陷,从而改变材料中的杂质浓度,影响器件性能。半导体激光器的电离效应可以分为总剂量效应和剂量率效应,其中总剂量效应为稳态效应,能够在器件中形成界面态,造成半永久性损伤;剂量率效应为瞬态效应,入射粒子的能量被材料吸收,电离出电子-空穴对,形成光电流。由于半导体激光器的界面态效应可以忽略,因此仅分析位移损伤效应、剂量率效应的影响,此外还应考虑器件的退火效应。

2.1 剂量率效应

材料中的电子吸收入射粒子的能量激发至导带,引入电子-空穴对,产生过剩载流子 n_e 。

$$\begin{cases} n_e = \tau_0 g \dot{D}, & n_e \ll N_d \\ n_e = (A_r \dot{D})^{1/2}, & n_e \gg N_d \end{cases}, \quad (1)$$

$$\dot{D} = 1.6 \times 10^{-8} \cdot \varphi E / (R\rho), \quad (2)$$

式中 A_r 为再结合系数; g 为载流子产生系数; \dot{D} 为辐射剂量率; E 为为粒子能量; R 为入射粒子射程; ρ 为材料密度; N_d 为掺杂浓度, φ 为辐照注量率, τ 为

辐照时间,辐照注量 $\Phi = \varphi \cdot t$ 。

位于结耗尽区域以及两侧一个扩散长度内的过剩载流子在电场的作用下移动,引起光电流流动,这种光电流定义为陡脉冲光电流。在结耗尽区以外超过一个扩散长度的载流子在到达前基本被复合,所以对于光电流没有贡献。由于辐射产生的载流子密度具有梯度,载流子向结扩散,离结较远的载流子可能向结扩散,形成光电流的延迟分量。上述陡脉冲光电流与延迟分量均为瞬态光电流。由剂量率效应引起的半导体激光器输出光功率损伤模型可以表示为^[1]

$$P_R = P_0 + B\dot{D}, \quad (3)$$

式中 P_R 为辐照后的输出光功率, P_0 为辐照前的输出光功率, B 为光功率剂量率损伤系数。

2.2 位移损伤效应

位移损伤效应形成的缺陷作为非辐射复合中心,引起材料中载流子的去除,导致载流子寿命减小。载流子寿命与辐射总注量之间的关系为^[16]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_r \Phi, \quad (4)$$

式中 τ 、 τ_0 为辐照前、后的载流子寿命; K_r 为载流子寿命损伤系数; $\Phi = \varphi t$, t 为辐照时间为辐照注量。辐照后的阈值电流密度 J_{th} 表示为

$$J_{th} = J_{th0} + eLK_r N_{th} \Phi, \quad (5)$$

式中 J_{th0} 为辐照前激光器阈值电流密度; e 为电子电荷; L 为有源层厚度; N_{th} 为阈值载流子浓度。辐照前后阈值电流密度之比为

$$\frac{J_{th}}{J_{th0}} = K_J \Phi + 1, \quad (6)$$

式中 $K_J = eLK_r N_{th}$ 为阈值电流密度损伤系数。阈值电流 I 可以表示为阈值电流密度 J 与有源区面积 s 之积,即 $I = J \cdot s$ 。辐照后器件阈值电流为

$$I_{th} = I_{th0} + sK_J \Phi = I_{th0} + K_I \Phi, \quad (7)$$

式中 $K_I = sK_J$ 为阈值电流损伤系数。激光器输出光功率可以由外量子效率 η_d 、工作电流 I_P 和阈值电流求得,其表达式如下:

$$P_0 = \eta_d (I_P - I_{th0}). \quad (8)$$

由此得到位移损伤效应影响下半导体激光器的输出光功率模型, K_P 为光功率位移损伤系数。

$$P_D = P_0 - \eta_d K_I \Phi = P_0 - K_P \dot{D} t, \quad (9)$$

$$K_P = \eta_d K_I R \rho / (1.6 \times 10^{-8} \cdot E). \quad (10)$$

2.3 退火效应

半导体器件性能的退化主要是由辐射在材料内部引入的缺陷导致,在正向偏置状态下,由于复合增强缺陷反应 (REDR),非辐射电子跃迁产生的能量

使得缺陷升温并最终湮没,从而实现器件的退火。考虑到空间辐射环境中辐射的剂量率低,器件在轨工作时间长的特点,需要结合退火效应对性能的影响来考虑器件的空间辐射损伤。

由于退火效应的本质是材料中缺陷的湮没,它所针对的是位移损伤效应导致的器件损伤,由辐照所引入的缺陷情况决定。退火的过程可以用指数衰减的形式进行描述,分为三个阶段,其中第一阶段的退火速率最快,主要表现为输出光功率的恢复。输出光功率的退火规律如下^[20-21]:

$$P(t) = P + A[1 - \exp(-t/\tau_a)], \quad (11)$$

$P(t)$ 为退火 t 时刻后的光功率; P 为退火前器件的输出光功率; A 为常数; τ_a 为退火时间常数。由于退火速率受到引入缺陷类型、数量等因素影响,不同损伤条件下退火规律中的参数随之不同,若在辐射过程中考虑退火问题, A 与 τ_a 随时间而变化,应表示为时间的函数 $A(t)$ 、 $\tau_a(t)$ 。则退火效应对输出光功率的恢复量 $P_A(t)$ 表示为

$$P_A(t) = \int_0^t A(t) \cdot \{1 - \exp[-t/\tau_a(t)]\} dt. \quad (12)$$

然而, A 、 τ_a 与辐射总剂量的关系尚不明确,一般通过辐射结束后器件的退火曲线拟合得到,难以得出不同剂量率条件下 $A(t)$ 、 $\tau_a(t)$ 随时间的变化规律,因此对辐射损伤进行离散化考虑。假设不同入射粒子所引发的辐射损伤及其退火效应相互独立,在此前提下,将实验过程中器件所受辐射的总剂量 D 划分为若干个单位辐射剂量 D_0 ,分别对每一个单位剂量率引起的辐射效应进行退火分析, $P_A(t)$ 即为各退火分量的叠加。

$$P_A(t) = \sum_{i=1}^N A \left[1 - \exp\left(\frac{i \cdot D_0 / \dot{D} - t}{\tau_a}\right) \right], \quad (13)$$

式中 $N = \dot{D}t / D_0$,表示总剂量划分成单位辐射剂量的个数; A 与单位辐射剂量的大小有关,不受辐射剂量率以及时间的影响; τ_a 为常量,仅与材料内部的缺陷状况有关,随退火时间的增长分为三个阶段。设三个阶段的退火时长分别为 $0 < t \leq t_1$ 、 $t_1 < t \leq t_2$ 、 $t > t_2$,退火时间常数分别为 τ_{a1} 、 τ_{a2} 、 τ_{a3} ,则各阶段 $P_A(t)$ 的表达式为

1) 第一阶段: $0 < t \leq t_1$,

$$P_A(t) = \sum_{i=1}^{\dot{D}t/D_0} A \left[1 - \exp\left(\frac{i \cdot D_0 / \dot{D} - t}{\tau_{a1}}\right) \right] = A \cdot \left\{ \frac{\dot{D}t}{D_0} + \frac{\alpha_1 [1 - \exp(-t/\tau_{a1})]}{1 - \alpha_1} \right\}, \quad (14)$$

2) 第二阶段: $t_1 < t \leq t_2$,

$$P_A(t) = \sum_{i=1}^{\dot{D}t_1/D_0} A \left[1 - \exp\left(\frac{i \cdot D_0 / \dot{D} - t_1}{\tau_{a1}}\right) \right] + \sum_{j=1}^{\dot{D}(t-t_1)/D_0} A \left[1 - \exp\left(\frac{j \cdot D_0 / \dot{D} - t}{\tau_{a2}}\right) \right] = A \cdot \left\{ \frac{\dot{D}t}{D_0} + \frac{\alpha_1 [1 - \exp(-t_1/\tau_{a1})]}{1 - \alpha_1} + \frac{\alpha_2 [\exp(-t_1/\tau_{a2}) - \exp(-t/\tau_{a2})]}{1 - \alpha_2} \right\}, \quad (15)$$

3) 第三阶段: $t > t_2$,

$$P_A(t) = \sum_{i=1}^{\dot{D}t_1/D_0} A \left[1 - \exp\left(\frac{i \cdot D_0 / \dot{D} - t_1}{\tau_{a1}}\right) \right] + \sum_{j=1}^{\dot{D}(t_2-t_1)/D_0} A \left[1 - \exp\left(\frac{j \cdot D_0 / \dot{D} - t_2}{\tau_{a2}}\right) \right] + \sum_{m=1}^{\dot{D}(t-t_2)/D_0} A \left[1 - \exp\left(\frac{m \cdot D_0 / \dot{D} - t}{\tau_{a3}}\right) \right] = A \cdot \frac{\dot{D}t}{D_0} + A \cdot \frac{\alpha_1 [1 - \exp(-t_1/\tau_{a1})]}{1 - \alpha_1} + A \cdot \frac{\alpha_2 [\exp(-t_1/\tau_{a2}) - \exp(-t_2/\tau_{a2})]}{1 - \alpha_2} + A \cdot \frac{\alpha_3 [\exp(-t_2/\tau_{a3}) - \exp(-t/\tau_{a3})]}{1 - \alpha_3}, \quad (16)$$

式中

$$\alpha_i = \exp\left(\frac{D_0}{\dot{D}\tau_{ai}}\right), i = 1, 2, 3. \quad (17)$$

3 辐射应力加速寿命试验模型

以辐射的剂量率为加速寿命实验的应力,结合半导体激光器的空间辐射损伤机理,对其辐射应力

加速模型进行分析与建立。定义器件的故障判变量 $C(t)$ 为工作电流恒定条件下,输出光功率的变化量,可以用下式表述:

$$C(t) = \frac{P(t) - P_0}{P_0}. \quad (18)$$

将位移损伤效应、剂量率效应以及退火效应三者相结合,根据(3)、(9)、(13)式得到 t 时刻半导体

激光器的输出光功率:

$$P(t) = P_0 - K_P \dot{D}t + B\dot{D} + P_A(t). \quad (19)$$

代入(15)式,故障判决量可进一步表示为

$$C(t) = \frac{-K_P \dot{D}t + B\dot{D} + P_A(t)}{P_0}. \quad (20)$$

当判决量 $C(t)$ 到达故障判决阈值 C 时,即判定器件失效,通常定义为光功率下降 20%,此时半导体激光器的工作时间即为其使用寿命。令 $C(t) = C$,对(20)式进行求解,即能得到器件的使用寿命。然而,由(14)~(17)式可知退火过程的计算较为复杂,不利于使用寿命的求解,需要对其进行简化。如图 1 所示,光功率的退火效应主要集中在前两个阶段,因此认为每单位辐射剂量引起光功率损伤的退火效应 P_{A0} 为前两个阶段退火量之和,即 $P_{A0} = A[1 - \exp(-t_2/\tau_{a2})]$ 。

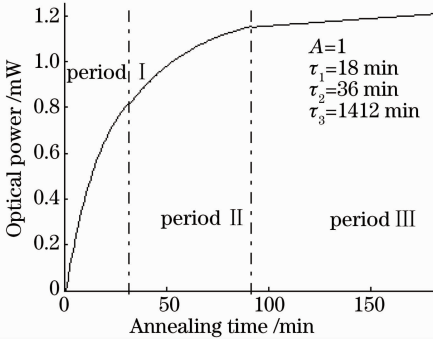


图 1 光功率随时间退化规律

Fig. 1 Optical power versus annealing time

此时,故障判决量与辐射时间呈线性关系,与辐射剂量率呈正比关系:

$$C(t) = \frac{-K_P \dot{D}t + B\dot{D} + \dot{D}t P_{A0}/D_0}{P_0} = \left(\frac{P_{A0}}{D_0 P_0} - \frac{K_P}{P_0}\right) \cdot \dot{D} \cdot t + \frac{B}{P_0} \cdot \dot{D} = \mu \dot{D}t + \nu \dot{D}, \quad (21)$$

式中 μ, ν 为待定系数,解得判决阈值为 C 时的使用寿命

$$t = \frac{P_0 C - B\dot{D}}{\dot{D} P_{A0}/D_0 - K_P \dot{D}} = \frac{C - \nu \dot{D}}{\mu \dot{D}}. \quad (22)$$

令 t_n 为正常应力条件下的故障时间, t_s 为较高应力下的故障时间,则有 $t_n = A_F \times t_s$,其中 A_F 为待定的加速因子:

$$A_F = \frac{t_n}{t_s} = \frac{(C - \nu \dot{D}_n) \cdot \dot{D}_s}{(C - \nu \dot{D}_s) \cdot \dot{D}_n}. \quad (23)$$

可以得出器件的故障概率分布函数 $F_n(t_n)$ 以及概率密度函数 $f_n(t)$:

$$F_n(t_n) = \Pr\{T_n < t_n\} = \Pr\{T_s < t_s\} = F_s(t_n/A_F), \quad (24)$$

$$f_n(t) = \frac{d}{dt} F_s\left(\frac{t}{A_F}\right) = \frac{1}{A_F} f_s\left(\frac{t}{A_F}\right). \quad (25)$$

平均故障前时间(MTTF, f_{MTTF})为:

$$f_{\text{MTTF}} = E(T) = \int_0^{\infty} t f_n(t) dt = \frac{1}{A_F^2} \int_0^{\infty} t f_s\left(\frac{t}{A_F}\right) dt. \quad (26)$$

4 模型参数估算

不同半导体激光器在辐射条件下的损伤情况不同,在利用辐射应力加速模型对半导体激光器进行加速寿命实验时,需要对器件辐照条件下的损伤以及退火参数进行估算,进而外推出器件的使用寿命。由(22)式能够看出,待定系数为 μ 和 ν ,二者所包含参数有:光功率位移损伤系数 K_P ,光功率剂量率损伤系数 B ,退火常数 A 和退火时间常数 τ_a 。

根据已有文献的数据信息,对半导体激光器辐照条件下损伤、退火等参数进行取值(如表 1 所示)^[1,10,20],在此基础上依据(20)式进行模拟分析,获得了三组不同辐照注量下器件故障判决量 $C(t)$ 随时间的变化数据,如图 2 所示。

表 1 辐照效应参数取值

Table 1 Values of parameters for radiation dose

Parameter	Value	Parameter	Value
$K_P / (\text{mW}/\text{Gy})$	4.24×10^{-6}	τ_{a3} / s	84720
$B / (\mu\text{W} \cdot \text{s}/\text{Gy})$	1.5×10^{-7}	$C / \%$	-20
D_0 / Gy	1	P_0 / mW	100
A / mW	7×10^{-7}	$\dot{D}_1 / (\text{Gy}/\text{s})$	10
τ_{a1} / s	1080	$\dot{D}_2 / (\text{Gy}/\text{s})$	50
τ_{a2} / s	2160	$\dot{D}_3 / (\text{Gy}/\text{s})$	100

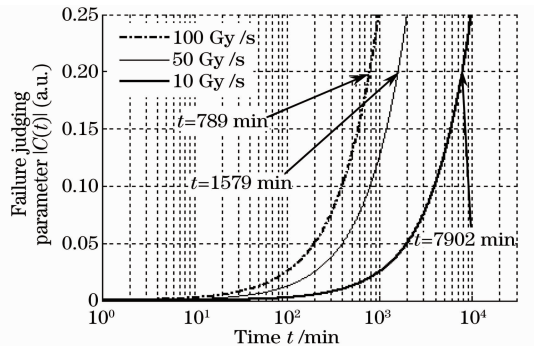


图 2 不同剂量率条件下故障判决量随时间变化曲线

Fig. 2 Failure judging parameter versus time under different radiation rates

通过模拟结果可以看出,当辐射剂量率为 10、50、100 Gy/s 时,器件在 7902、1579、789 min 时故障判决量分别达到 20% 的判决阈值。通过上述模拟所得数据,对器件性能退化的待定系数进行求解。

在仅知道辐照前激光器光功率、辐射剂量率以及器件在加速条件下的使用寿命的条件下,由于存在两个未知量,需要对两组实验数据进行联立方程组才能求解待定系数,方程组表示为

$$\mu \cdot \dot{D} \cdot t + \nu \cdot \dot{D} = C, \quad (27)$$

式中 $t = [t_1, t_2]^T$ 、 $\dot{D} = [\dot{D}_1, \dot{D}_2]^T$ 为两组实验测得的器件寿命与辐照注量。考虑到在一般辐照条件下,剂量率效应对器件的影响较小,所引起的光功率变化量较总功率低数个量级,因此在计算时可以将该项忽略,仅通过一组实验数据完成参数的计算。选取第二组数据进行求解,得到 $\mu = 4.222 \times 10^{-6}$, 将系数代入 3 种辐射剂量情况进行验证得到,器件在 7902、1579 以及 789 min 时的故障判决量分别为 20.02%、20%、19.99%,与实际值相差 0.02%、0% 和 0.01%,能够较为准确地反映出器件辐照条件下的损伤情况。空间环境中辐射剂量率为 0.03 Gy/s,由(23)式可以得出器件正常应力条件下的故障时间约为 2631717.5 min,即 43862 h。

考虑半导体激光器空间辐射下的故障分布服从参数为 β 及 θ 的威布尔分布,根据辐射剂量率为 50 Gy/s 条件下的模拟数据,对器件的故障概率分布函数及平均故障前时间进行计算。当剂量率为 50 Gy/s 时,其威布尔分布的参数为 $\beta_s = \beta = 4$, $\theta_s = A_F \cdot \theta = 1579$ min,由(23)式得到 $A_F = 1.6667 \times 10^3$,则器件的故障概率分布函数如图 3 所示。结合(26)式得出器件的平均故障前时间 $f_{MTTF} \approx 39755.8$ h。

$$F_n(t_n) = F_s(t_n/A_F) = 1 - \exp\left(\frac{-t_n}{A_F \cdot \theta_s}\right)^{\beta_s} = 1 - \exp\left(\frac{-t_n}{2.63 \times 10^6}\right)^4. \quad (28)$$

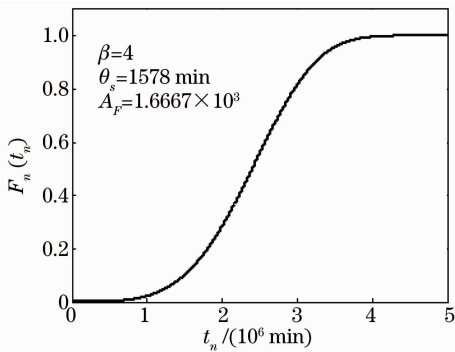


图 3 器件故障累积分布函数

Fig. 3 Cumulative distribution function of device failure

5 结 论

通过对半导体激光器空间辐射效应以及辐射后

器件退火机理的分析,获得了剂量率效应和位移损伤效应影响下器件的性能退化规律,将辐射总剂量表示为单位辐射剂量的累积,得到了半导体激光器在辐射过程中的退火规律。由此建立了辐射应力加速寿命实验模型,得到了故障时间、概率分布函数等的表达式。模拟了不同应力条件下器件的退化数据,估算了待定参数,验证表明利用估算参数求得的 3 种应力下的故障判决量分别与实际值相差 0.02%、0% 和 0.01%。由此可见,辐射应力加速寿命实验模型可有效估算半导体激光器等在轨运行器件寿命,对提高地面抗辐射实验的效果有一定参考价值。

参 考 文 献

- 1 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: 哈尔滨工业大学航天学院, 2010. 65-72.
- 2 Lu Guoguang, Huang Yun, En Yunfei. Lifetime estimation of high power lasers[C]. SPIE, 2010, 7844: 784413.
- 3 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.
- 4 Lorenzo Trevisanello, Matteo Meneghini, Maura Pavesi, et al.. Accelerated life test of high brightness light emitting diodes[J]. IEEE Transaction on Device and Materials Reliability, 2008, 8(2): 304-311.
- 5 Nicola Trivellin, Matteo Meneghini, Enrico Zanoni, et al.. IEEE International Reliability Physics Symposium, Proceedings, A review on the reliability of GaN-based laser diodes[C]. 2010. IRPS10.
- 6 Yu Fei, Jin Lei. Mathematical model of aging and the life test method for GaN LED[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0806001.
余 菲, 金 雷. GaN 发光二极管的老化数学模型及寿命测试方法[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0806001.
- 7 Ding Ying, Wang Lufeng, Zhao Lingjuan, et al.. Reliability analysis of 1.55 μm DFB laser diodes for optical fiber communication[J]. Journal of 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 μm DFB 激光器的可靠性分析[J]. 光电子·激光, 2004, 15(4): 393-396.
- 8 Qian Minhua, Lin Yandan, Sun Yaojie. Life prediction model for LEDs based on the photo-electro-thermal-life theory[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0823001.
钱敏华, 林燕丹, 孙耀杰. 基于光电热寿命理论的 LED 寿命预测模型[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0823001.
- 9 Dan Sporea. Effects of Gamma-ray irradiation on quantum-well semiconductor lasers [C]. Radiation Effects Data Workshop IEEE, 2004. 137-144.
- 10 J Baggio, C Brisset, J L Sommer, et al.. Electrical and optical response of a laser diode to transient ionizing radiation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(3): 1038-1043.
- 11 B D Evans, H E Hager, B W Hughlock. 5.5 MeV proton irradiation of a strained quantum-well laser diode and a multiple quantum-well broad-band LED [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1993, 40(6): 1645-1654.

- 12 Y F Zhao, A R Patwary, R D Schrimpf, *et al.*. 200 MeV proton damage effects on multi-quantum well laser diodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1997, 44(6): 1898–1905.
- 13 A H Johnston, T F Miyahira, B G Rax. Proton damage in advanced laser diodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6): 1764–1772.
- 14 A H Johnston. Proton displacement damage in light-emitting and laser diodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(5): 1713–1720.
- 15 A H Johnston, T F Miyahira. Radiation degradation mechanisms in laser diodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(6): 3564–3571.
- 16 O Gilard. Theoretical study of radiation effects on GaAs/AlGaAs and InGaAsP/InP quantum well lasers[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(4): 1884–1888.
- 17 E C Auden, R A Weller, M H Mendenhall, *et al.*. Single particle displacement damage in silicon[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(6): 3054–3061.
- 18 Kitt Reinhardt. Radiation Effects on Emerging Electronic Materials and Devices[R]. Nashville: Vanderbilt University MURI Program Electrical Engineering and Computer Science Department, 2012.
- 19 Huang Shaoyan, Liu Minbo, Tang Benqi, *et al.*. γ ray radiation effect on InGaAsP multi-quantum laser diodes and its component [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(11): 1024–1028.
- 黄绍艳, 刘敏波, 唐本奇, 等. InGaAsP 多量子阱激光二极管及其组件的 γ 辐射效应[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(11): 1024–1028.
- 20 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 Particle 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.
- 21 Y F Zhao, R D Schrimpf, A R Patwary. Annealing effects on multi-quantum well laser diodes after proton irradiation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(6): 2826–2832.
- 22 D R Hughart, R D Schrimpf, D M Flerwood, *et al.*. The effects of proton-defect interactions on radiation-induced interface-trap formation and annealing [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(6): 3087–3092.
- 23 A H Johnston. Characterization of proton damage in light-emitting diodes [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 47(6): 2500–2507.

栏目编辑:宋梅梅