

基于泊松过程的半导体激光器空间辐射效应研究

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, 甘肃 兰州 730000)

摘要 针对始终处于加电状态工作模式的半导体激光器,通过分析单个粒子对器件的辐射过程,将空间辐射效应离散的描述为所有单粒子造成辐射效应的累积。考虑到粒子到达服从泊松过程的特点,建立了半导体激光器空间辐射效应性能退化模型。推导了器件可靠度函数以及平均故障前时间的表达式。对 InGaAs 多量子阱激光二极管在高轨空间辐射环境中的性能退化过程进行了仿真,得到了器件的光功率退化曲线。结果表明光功率退化量与辐射时间近似成正比例关系。由此提出了同时考虑辐射与退火效应条件下,器件的光功率退化速率,通过拟合得出该速率与空间辐射平均剂量率成正比。获得了半导体激光器的可靠度曲线,进而计算了器件的平均故障前时间。

关键词 激光器;性能退化模型;泊松过程;空间辐射环境;位移损伤效应;退火效应

中图分类号 TN214 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1002002

Study on Space Radiation Effects of Laser Diodes Based on Poisson Process

Liu Yun¹ Zhao Shanghong¹ Yang Shengsheng² Li Yongjun¹ Qiang Ruoxin¹

(¹ Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)
(² Cryogenics Technology and Physics Laboratory Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract For lasers which are working in the changing state all the time, the process of single particle radiation on semiconductor laser is analysed, and space radiation effect is described as the cumulation of radiation effects caused by single particles. In consideration of the characteristic that the arrival of particles is a Poisson process, the performance degradation model of space irradiated semiconductor laser is established. Expressions of reliability and mean time to failure are deduced. The performance degradation process of multi-quantum well semiconductor laser in high-orbit space radiation environment is simulated using existing data, and curves of degraded optical power are obtained. Results show that degraded optical power is in direct proportion to radiating time. Therefore, taking into account of both radiation effects and annealing effect, the degenerate rate of optical power is put forward, which is in direct proportional to the average radiating dose of space radiation environment calculated by fitting. Reliability curves are achieved and the mean time to failure for device is calculated.

Key words lasers; performance degradation model; Poisson process; space radiation environment; displacement damage dose; annealing dose

OCIS codes 140.5960; 060.2605; 350.6090

1 引 言

半导体激光器具有效率高、体积小、寿命长、成本低和易调制等特点,是卫星光通信系统的首选光

源器件。欧空局 SILEX 系统、日本 ETS-VI 系统、美国 STVR-II 系统等典型卫星光通信系统均选择半导体激光器作为其通信光源。然而,卫星工作的

收稿日期: 2014-03-12; 收到修改稿日期: 2014-05-09

作者简介: 刘 韵(1990—),女,博士研究生,主要从事卫星光通信系统空间辐射适应性方面的研究。

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: zhaoshangh@aliyun.com

空间环境复杂,存在地球捕获带、银河宇宙射线以及太阳质子事件三种空间辐射源,包含大量的质子、电子、重离子等高能带电粒子,对半导体激光器等星载器件的工作性能造成严重影响,甚至导致器件失效。因此必须对半导体激光器在空间辐射环境中的性能退化规律进行研究,从而保证卫星光通信系统的稳定与可靠。

针对半导体激光器的辐射损伤效应,国内外都展开了不同辐照条件下实验研究与理论分析。Sporea 等^[1-3]使用电子和 Gamma 射线对半导体激光器进行辐照测试,得到了不同辐射剂量条件下的性能退化规律,同时指出器件具有较强的抗 Gamma 辐照能力;Evans 等^[4-8]以 5.5 MeV 和 200 MeV 的质子进行实验,并结合测试结果对器件的性能退化规律进行了分析;Johnston 等^[9-13]通过对辐射损伤机理的研究,得出了器件的空间辐射损伤原理及退化规律。上述文献旨在研究器件的辐射损伤规律,没有考虑其在辐射后的退火现象,然而对于长期在轨工作的星载器件,退火效应是空间辐射的重要组成部分,因此必须对其进行考虑。黄绍艳等^[13-16]针对半导体激光器的退火效应展开了实验研究,测试了不同注量辐照后器件的退火现象,并对实验结果进行分析,得到了指数形式的拟合退火规律。在实验条件下,辐射的注量率往往较高,辐照时间较短,对于退火效应的分析在辐照结束后进行。然而空间辐射环境中的粒子注量率低,器件在轨运行时间长,退火效应与辐射损伤效应同时进行,因此需要在辐射的过程中考虑退火问题。

本文实时考虑半导体激光器的空间辐射损伤效应及退火效应,针对始终处于加电状态工作模式的半导体激光器,利用辐射粒子流到达服从泊松过程的特点,从微观角度将辐射过程描述为单个粒子辐射效应的累积,由此得到基于泊松过程的性能退化模型,进而分析其可靠性。

2 半导体激光器空间辐射损伤机理

半导体激光器在空间辐射环境中主要存在位移损伤效应和电离效应两种损伤效应。其中电离效应为瞬态效应,而位移损伤效应为永久性损伤,因此仅考虑位移损伤效应对器件性能的影响。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,缺陷作为非辐射复合中心改变材料中的杂质浓度,从而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

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

式中 τ_0 、 τ 分别为辐照前、后的载流子寿命, K_r 为载流子寿命损伤系数, Φ 为辐照注量。则辐照前后阈值电流密度之比为

$$\frac{J_{th}}{J_{th0}} = K_J \Phi + 1, \quad (2)$$

式中 K_J 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

$$I_{th} = I_{th0} + sK_J \Phi = I_{th0} + K_I \Phi, \quad (3)$$

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_e 、工作电流 I_P 和阈值电流求得,其表达式为^[13]

$$P_0 = \eta_e \frac{h\nu}{q} (I_P - I_{th0}) = \eta_0 (I_P - I_{th0}), \quad (4)$$

式中 h 为普朗克常量, q 为电子电量, ν 为光波频率, $\eta_0 = \eta_e h\nu/q$ 为斜率效率。由此可得到位移损伤效应影响下半导体激光器输出光功率的变化规律:

$$P_D = P_0 - \eta_0 K_I \Phi = P_0 - K_P D, \quad (5)$$

$$K_P = \frac{\eta_0 K_I R \rho}{1.6 \times 10^{-8} \cdot E}, \quad (6)$$

式中 E 为粒子能量, R 为入射粒子射程, ρ 为材料密度, K_P 为光功率位移损伤系数, D 为辐射总剂量。

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,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、器件在轨工作时间的特点,需要结合退火效应对性能的影响来分析器件的空间辐射损伤。

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。三个阶段退火过程输出光功率的退火规律均可表示为^[13-14]

$$P(t) = P + A[1 - \exp(-t/\tau_a)], \quad (7)$$

式中 $P(t)$ 为退火 t 时刻后的光功率, P 为器件在辐照后未经历退火时的输出光功率, A 为常数, τ_a 为退火时间常数,其取值由退火时间所处阶段而定。由于退火效应的本质是材料中缺陷的湮没,由辐照所引入的缺陷情况决定,不同损伤条件下退火规律中的参数不同,若在辐射过程中考虑退火问题,则 A 与 τ_a 随器件损伤状态而变化。

3 性能退化模型

半导体激光器的空间辐射效应是由众多空间辐射粒子所导致,就某一空间辐射粒子而言,其辐射过程为粒子入射到器件材料内部,与材料中的原子核发生弹性碰撞并使之离开正常位置形成缺陷,从而造成位移损伤影响,由于器件始终处于加电状态,随着时间推移,在温度与偏置电压的作用下,部分先前形成的缺陷由于复合增强缺陷反应而相继湮没,最终达到稳定状态。因此,从微观的角度来看,器件的空间辐射损伤以及退火效应可以离散地描述为所有单一粒子造成的辐射效应累积。

空间辐射环境中,粒子到达被辐射器件的过程是强度为 λ 的泊松过程。当粒子 $k(k=1,2,3,\dots)$ 到达时,形成一个由位移损伤效应引起的性能退化冲激函数 $\delta(t-t_k)$;而后损伤影响不断弱化至稳态

的过程,可以等价于将冲激函数作为输入信号,经过退火系统 $h(t)$ 后输出。

半导体激光器空间辐射效应性能损伤过程如图1所示,具体步骤为

1) 空间辐射粒子以强度为 λ 泊松流入射到器件内部,对到达的粒子进行计数,得到表示不同时刻入射粒子数量的阶跃函数 $N_p(t)$;

2) 对 $N_p(t)$ 进行求导即得到一组冲激函数序列 $P_d(t)$,其物理意义是不同时刻的入射粒子造成的位移损伤效应影响;

3) 将冲激函数序列 $P_d(t)$ 输入系统 $h(t)$,即二者进行卷积,得到空间辐射环境中器件性能随时间的变化规律 $\Delta P(t)$,系统 $h(t)$ 为单一粒子引起的性能退化量以及退火过程。

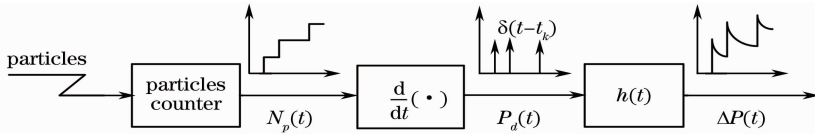


图1 空间辐射效应性能损伤过程示意图

Fig.1 Sketch map of space irradiated performance degradation process

上述性能损伤过程中包含的阶跃函数 $N_p(t)$ 、冲激函数序列 $P_d(t)$ 、退火系统函数 $h(t)$ 的表达式分别为

$$N_p(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t < t_1 \\ k, & t_k < t < t_{k+1} (k=2,3,\dots,N) \end{cases}, \quad (8)$$

$$P_d(t) = \frac{d}{dt}N_p(t) = \sum_{k=1}^N \delta(t-t_k), \quad (9)$$

$$h(t) = P_{d0} - A[1 - \exp(-t/\tau_a)], \quad (10)$$

$$P_{d0} = K_p \cdot D_p, \quad (11)$$

式中 t_k 为第 k 个粒子到达时间, N 为总入射粒子数, D_p 为入射粒子的平均辐射剂量,退火系统函数 $h(t)$ 针对的是器件受到剂量为 D_p 的辐射后的退火效应, P_{d0} 为 D_p 引起的性能退化量。结合(8)~(10)式得到最终的输出函数 $\Delta P(t)$ 的表达式为

$$\Delta P(t) = P_d(t) * h(t) =$$

$$N \cdot P_{d0} - A \cdot \sum_{k=1}^N \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_k}{\tau_a}\right) \right]. \quad (12)$$

于是,半导体激光器空间辐射效应影响下的性能退化模型,即输出光功率退化模型表达式为

$$P(t) = P_0 - \Delta P(t) =$$

$$P_0 - N \cdot P_{d0} + A \cdot \sum_{k=1}^N \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_k}{\tau_a}\right) \right], \quad (13)$$

式中 P_0 为辐射前半导体激光器的输出功率。

通常认为在工作电流恒定条件下,半导体激光器输出光功率的变化量达到20%则判定器件故障。结合(13)式得到半导体激光器的故障判决量为

$$C(t) = \frac{P(t) - P_0}{P_0}. \quad (14)$$

则 t 时刻器件的可靠度函数可表示为

$$R(t) = P[C(t) < 20\%] = P\left[\frac{-\Delta P(t)}{P_0} < 20\%\right]. \quad (15)$$

粒子的到达为一个泊松流,其到达时刻 t_k 随机产生,因此利用泊松过程的期望对到达时刻进行近似取值,即 $t_k = k/\lambda$,从而估算器件故障时到达的粒子总数 N 。估算过程如下,近似后(12)式转化为

$$\Delta P(t) \Big|_{t=N/\lambda} = N \cdot P_{d0} - A \cdot \sum_{k=1}^N \left[1 - \exp\left(-\frac{t-k/\lambda}{\tau_a}\right) \right] = N \cdot P_{d0} - A \cdot \left\{ N - \frac{\exp(1/\lambda\tau_a) \cdot \{1 - \exp[N/(\lambda\tau_a)]\}}{\exp(t/\tau_a) \cdot \{1 - \exp[1/(\lambda\tau_a)]\}} \right\}. \quad (16)$$

得出粒子总数 N 的通解为

$$N = \lambda \tau_a \lg \left\{ \frac{(P_{a0} - A) \cdot \{1 - \exp[1/(\lambda \tau_a)]\}}{A} \right\} + t\lambda - 1 + C_0, \quad (17)$$

式中 C_0 为常数项。此时器件的可靠度函数为

$$R(t) = P[N_p(t) < N] = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(\lambda t)^k \cdot \exp(-\lambda t)}{k!}. \quad (18)$$

平均故障前时间(MTTF)的表达式为

$$L_{\text{MTTF}} = \int_0^{+\infty} R(t) \cdot dt = \sum_{n=0}^{+\infty} R(n\delta) \cdot \delta. \quad (19)$$

4 仿真与分析

空间辐射环境由地球辐射带、银河宇宙射线和太阳质子事件三种天然辐射源构成,其中的粒子能量覆盖范围由 10^{-1} MeV 到 10^{13} MeV 量级^[16-18],由不同粒子所引发的空间辐射效应影响程度存在较大差异。同时,不同材料、结构以及体积的激光器,在相同的辐射环境中所受到的辐射损伤和退火效应不同,需要针对特定器件的辐射及退火特性,通过实验对器件的各个参数进行取值。此处结合已有文献中对 InGaAs 多量子阱激光二极管辐射效应以及退火效应测试的实验数据,以该器件为例利用提出的性能退化模型对其在空间辐射环境中的可靠性相关参数进行估计。

文献[12]对美国大气海洋局发布的高轨空间辐射粒子数据进行了统计分析,其以高轨空间辐射的平均剂量率 0.03 Gy/s 作为辐射粒子的平均能量。文献[13-14]分别对多量子阱激光二极管的辐射效应和退火效应进行了实验测试与分析,结合文献所得实验数据对辐射及退火所需参数进行取值(如表 1 所示)。文献中所使用激光器的中心波长为 1550 nm ,有源区厚度为 $0.15 \mu\text{m}$,宽度为 $1.5 \mu\text{m}$,上、下 InP 限制层厚度分别为 $1.75 \mu\text{m}$ 和 $2.6 \mu\text{m}$,InP 衬底厚度为 $5.5 \mu\text{m}$,腔长为 $400 \mu\text{m}$,腔损耗为 $2 \times 10^5 \text{ cm}$,有源区中光速为 $0.86 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。由此得到了针对高轨辐射环境的 InGaAs 多量子阱激光二极管空间辐射效应的仿真参数,在此基础上,根据之前建立的性能退化模型对该条件下的器件退化过程进行仿真分析。

表 1 所示为各参数取值,其中退火时间常数 τ_a 依据退火的三个阶段分别对应三个数值, I_{bias} 为偏置电流, \dot{D} 为空间辐射的平均剂量率, D_p 为以小时为单位时间的空间辐射平均剂量,即入射粒子的平

均辐射剂量。对半导体激光器空间辐射效应性能损伤过程进行仿真,当平均辐射剂量取 10^8 Gy 且最大入射粒子数设置为 50 时,以强度为 λ 的泊松过程入射到器件内部的粒子数量 $N_p(t)$ 如图 2 所示。根据 (11) 式计算得出平均性能退化量 P_{a0} 为 $4.5792 \times 10^{-4} \text{ mW}$,结合 (10) 式得到退火系统函数 $h(t)$,如图 3 所示。

表 1 空间辐射效应参数取值

Table 1 Values of parameters for space radiation dose

Parameter	Value	Parameter	Value
$K_p / (\text{mW} \cdot \text{Gy})$	4.24×10^{-6}	$\tau_{\text{all}} / (\text{s})$	2160
$A / (\text{mW})$	7×10^{-7}	$\tau_{\text{all}} / \text{s}$	84720
P_0 / mW	100	λ	1
$I_{\text{bias}} / \text{mA}$	25	$\dot{D} / (\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1})$	0.03
$\tau_{\text{al}} / \text{s}$	1080	D_p / Gy	108

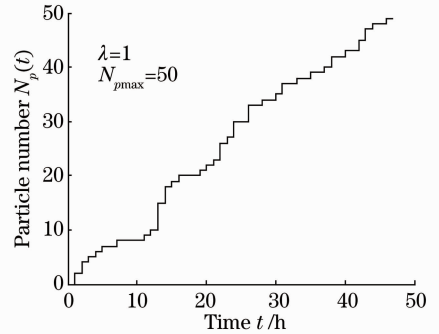


图 2 到达粒子数量函数

Fig. 2 Function of the number of reached particles

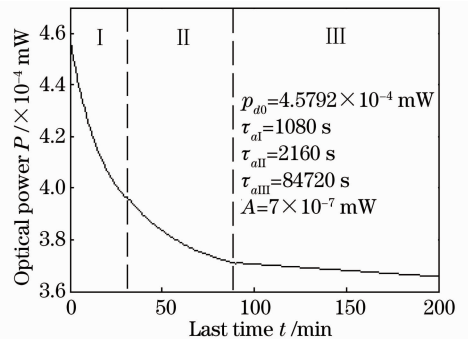


图 3 退火系统函数

Fig. 3 Function of the annealing system

将到达粒子数量函数求导并与退火系统函数进行卷积,得出入射粒子在 50 个以内这一时段中半导体激光器输出光功率退化量随时间变化的曲线,如图 4 所示。可见不同时刻入射的粒子所造成的损伤效应

相互叠加,光功率退化量随入射粒子的增多呈锯齿状增大。将最大入射粒子数设置为 70000,得到器件长期处于空间辐射环境中的光功率退化规律。图 5 中的曲线仍然呈锯齿状,但由于总仿真时间较长,锯齿分布密集,光功率退化曲线近似为一条平滑曲线,且与辐射时间呈正比例关系。

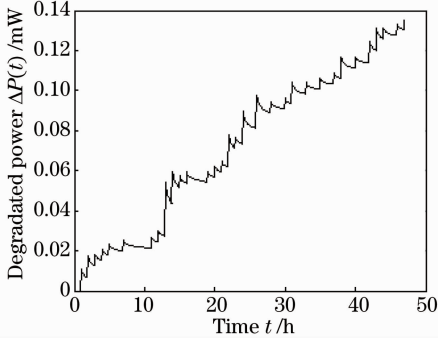


图 4 光功率退化量随时间变化曲线

Fig. 4 Degradated power versus time

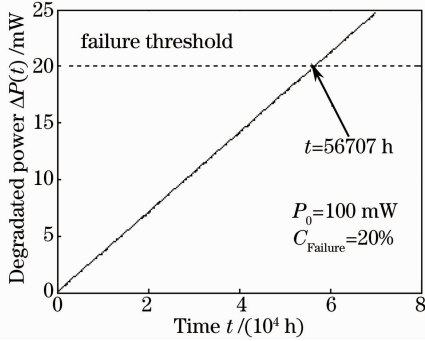


图 5 光功率退化量随时间变化曲线

Fig. 5 Degradated power versus time

故障判决阈值设定为 20%,由于辐射前半导体激光器的输出功率为 100 mW,当光功率退化量达到 20 mW 时即判定器件失效,此时半导体激光器的工作时间为 56707 h(约 6.47 年)。在工作时间较长的情况下可以忽略功率的波动,因此将光功率退化量表示为正比于时间的函数,提出同时考虑辐射与退火效应条件下,器件的光功率退化速率 K ,使得 $\Delta P(t) = K \cdot t$ 。图 6 所示为空间辐射平均剂量率分别为 0.01、0.02、0.03、0.04、0.1 Gy/s 条件下器件的光功率退化曲线,计算得出不同剂量率对应的光功率退化速率 K 依次为 1.1795×10^{-4} 、 2.3591×10^{-4} 、 3.5386×10^{-4} 、 4.7181×10^{-4} 、 1.2115×10^{-3} ,通过拟合得到光功率退化速率与空间辐射平均剂量率之间关系式为 $K \approx 0.01179 \times \dot{D}$ 。

对器件的可靠度进行求解时,根据已有参数设定,结合(16)、(17)式得到以泊松过程的期望对到达时刻进行近似取值时,器件故障时刻的粒子总数

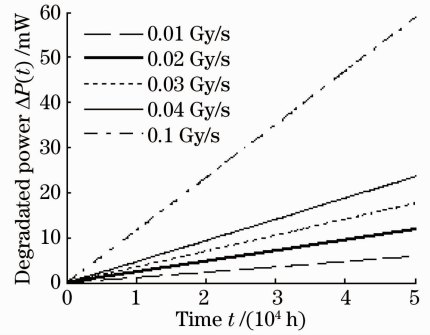


图 6 不同剂量率下光功率退化曲线

Fig. 6 Degradated power with different radiation doses

$N=56540$,工作时间为 56540 h,与上文通过泊松过程随机产生的样本序列仿真结果相差 0.294%,能够较准确的用于可靠度的估算。由(18)式得到器件的可靠度函数,如图 7 所示,可知器件在工作 47560 h 后的可靠度为 0.8,工作 56000 h 后可靠度为 0.4749。由(19)式计算出器件的平均故障前时间约为 6.41 年。

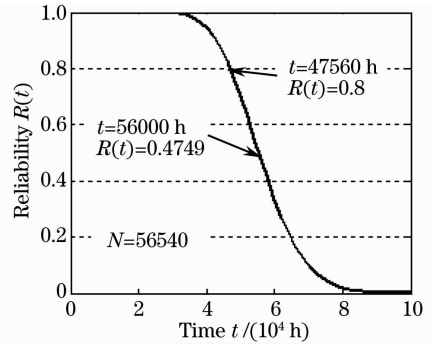


图 7 可靠度函数曲线

Fig. 7 Curve of reliability function

上述对可靠性相关参数的仿真与分析仅针对已有文献实验中所使用的 InGaAs 多量子阱激光二极管。对于其他不同材料、结构以及体积等的半导体激光器,通过测试并获取其辐射损伤参数以及退火参数,能够使用同样的仿真估计手段,以性能退化模型为基础,对其可靠性相关参数、特性进行估计,从而为器件在空间环境中的应用给予参考。

5 结 论

通过对单粒子引起的空间辐射损伤效应以及退火效应的分析,结合空间粒子到达时间服从泊松过程的特点,建立了半导体激光器空间辐射效应性能退化模型,得到了器件的可靠度函数和平均故障前时间表达式。并对半导体激光器在空间辐射环境中的性能退化过程进行了仿真,结果表明光功率退化

量与辐射时间近似成正比例关系,由此提出了同时考虑辐射与退火效应条件下,器件的光功率退化速率。基于泊松过程的性能退化模型,为半导体激光器等卫星光通信器件的空间辐射效应研究提供了一种新方法,对于评估器件的在轨运行性能具有一定参考价值。

参 考 文 献

- 1 D Sporea. Effects of gamma-ray irradiation on quantum-well semiconductor lasers [C]. Radiation Effects Data Workshop IEEE, 2004. 137-144.
- 2 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.
- 3 Huang Shaoyan, Liu Minbo, Wang Zujun, *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, 王祖军, 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.
- 4 B D Evans, H E Hager, B W Hughlock. 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.
- 5 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.
- 6 A H Johnston. Proton damage in advanced laser diodes [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6): 1764-1772.
- 7 A H Johnston. Proton displacement damage in light-emitting and laser diodes [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(5): 1713-1720.
- 8 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.
- 9 A H Johnston. Radiation degradation mechanisms in laser diodes

- [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(6): 3564-3571.
- 10 O Gilard. Theoretical study of radiation effects on GaAs/AlGaAs and InGaAsP/InP quantum well lasers [J]. J Appl Phys, 2003, 93(4): 1884-1888.
- 11 R Schrimpf. Radiation Effects on Emerging Electronic Materials and Devices [R]. Nashville: Vanderbilt University MURI Program Electrical Engineering and Computer Science Department, 2012.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 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.
- 16 A H Johnston. Characterization of proton damage in light-emitting diodes [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 47(6): 2500-2507.
- 17 A C Tribble. The Space Environment-Implications for Spacecraft Design [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1995. 157-162.
- 18 Zhou Jiantao, Cai Wei, Wu Yanpeng, *et al.*. Research on radiation effects of star sensors [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 24-30.
周建涛, 蔡伟, 武延鹏, 等. 星敏感器空间辐射效应研究 [J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 24-30.

栏目编辑:张浩佳