

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0005-04

空间辐射环境对半导体激光器的影响

常国龙 周彦平 周健强 马 晶 汪黎黎 都文和 李 密

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 电子辐射是空间辐射环境的重要组成部分,也是地面模拟空间辐射环境的重要手段。为了研究半导体激光器在空间辐射环境下应用的可行性,通过电子加速器的电子辐照模拟空间辐射环境,以研究半导体激光器总剂量效应。实验结果表明,半导体激光器的阈值电流随着辐照剂量的加大而增加,斜率效率在 10^6 rad 之前随着辐照剂量的加大而略有增大。退火观测期间,阈值电流在最初的两周内震荡变化,总体趋势为增加,直到两周后趋于稳定。对于接受辐射剂量较低的半导体激光器,在实际使用中可以采用电流补偿的方法来消除辐射对其阈值及斜率产生的影响。

关键词 激光器;总剂量效应;电子辐照;阈值电流;半导体激光器

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0005

Impact of Space Radiation to Semiconductor Laser

Chang Guolong Zhou Yanping Zhou Jianqiang Ma Jing Wang Lili Du Wenhe Li Mi

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The electron irradiation is the main part of space radiation and also the main means that we simulate space radiative environment. To study the feasibility of semiconductor lasers used in radiative environment of space, this paper studies the total dose effects through electron accelerator simulating the radiative environment of space. The result shows that as the radiation dose increases, the threshold current decreases as the dose increases and the slop efficiency increases gradually before 10^6 rad. During the annealing process, threshold current fluctuates in the first two weeks but the overall trend is increases and after that it tends to be stable. To the semiconductor lasers which are radiated in the relatively low dose, the radiative effects on the threshold current and slop efficiency can be eliminated through the method of current compensation.

Key words lasers; total dose effect; electron radiation; threshold current; semiconductor lasers

1 引 言

无论是在卫星探测器定标系统中使用的标准光源,还是卫星光通信系统中的光发射器,半导体激光器(LD)都是关键性器件。因此 LD 在空间拥有越来越广泛的应用前景和重要性。但宇宙空间存在各种射线和粒子,它们对光电器件都有不同程度的损伤,因此对于研究 LD 在空间辐射环境下的性能变化,也变得重要和迫切。

电子器件的辐射效应得到了国内外广泛的研究,但对光电器件的辐射性能研究较少,尤其对 LD 的辐射效应研究更少。国外一些相关文献讨论了质子和中子对 LD 的辐照所引起的位移效应^[1~5]。国

内杨生胜等^[6]用 γ 射线对 LD 的总剂量效应进行了研究,其最大辐射剂量为 10^6 rad(Si);林理彬等^[7]用 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP LD 研究了电子辐照效应对其输出光功率的影响;目前电子辐照对 LD 的阈值及斜率效率的影响讨论较少。电子辐射是空间辐射的重要组成部分,也是地面模拟空间辐射环境的重要手段,因此研究空间辐射效应对 LD 的辐射影响不能忽略电子辐照的影响。本文采用直线电子加速器产生 1.2 MeV 的电子对 LD 进行辐照,并对 LD 总剂量效应对阈值及斜率效率的影响进行了实验研究和分析。

作者简介: 常国龙(1973—),男,博士研究生,主要从事光电器件的辐射效应方面的研究。E-mail: cgly@tom.com

导师简介: 周彦平(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事空间光电探测方面的研究。E-mail: ypzhou@hit.edu.cn

2 LD 电子总剂量效应辐射实验与测试

2.1 器件及测试条件

在实验中使用的 LD 其输出中心波长为 650 nm, 最大工作光功率为 5 mW, 实验时环境温度为 20 °C。LD 实际是较为复杂的系统, 包括电源、驱动电路及激光器芯片。为了简化研究, 忽略激光器的驱动电路、电源的辐射影响因素, 只研究激光器的半导体激光芯片的辐射效应, 因此对半导体激光芯片和后面的驱动电路特别做了分离设计。驱动电路与激光芯片通过长导线连接, 这样在辐射激光芯片时对后面的驱动电路及电源做辐射屏蔽, 以避免辐射。因此所得结论为只是在半导体激光芯片被辐射时的性能变化。主要研究的是 LD 的阈值及斜率效率, 因此主要测量了 LD 的 $P-I$ 特性曲线, 测试电路方案如图 1 所示。

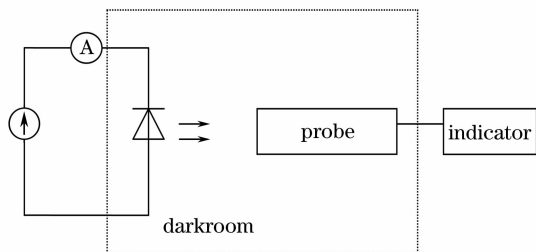


图 1 $P-I$ 特性测试框图

Fig. 1 Testing diagram of $P-I$ characteristics

2.2 辐射实验

电子辐照实验是在黑龙江科学院技术物理研究所加速器应用研究实验室进行的, 加速器型号为 DD1.2 高频高压电子加速器, 能量为 1.2 MeV, 束流为 0.02 mA, 被照物距扫描盒高度 20 cm。

半导体激光头置于电子加速器下, 发射窗对准电子辐照源方向; 后面的驱动电路用 5 mm 铝板屏蔽; LD 在非工作状态下接受辐照。采取异位测量法, 在每次达到辐照采样点时停止电子辐照, 并将 LD 取出进行参数测量。

由于低轨卫星运行的期限一般为 3~5 年, 总辐照剂量在 $10^3 \sim 10^4$ rad 量级, 而地球同步轨道卫星运行 8~15 年, 总辐照剂量在 $10^5 \sim 10^6$ rad^[8,9], 按最大剂量考虑, 将器件分作两组, 一组的最大辐射剂量为 5×10^5 rad, 另一组的最大辐射剂量为 10^6 rad, 这样的划分主要是为了研究退火情况。辐射电子能量为 1.2 MeV, 剂量率为 55 rad/s。其中 1 号器件观测辐照剂量点为 2×10^4 rad, 1×10^5 rad, 5×10^5 rad; 2 号器件的观测辐照剂量点为 1×10^4 rad,

2×10^4 rad, 3×10^4 rad, 5×10^4 rad, 2×10^5 rad, 4×10^5 rad, 6×10^5 rad, 8×10^5 rad, 1×10^6 rad。

2.3 退火测试

辐照对于器件的影响是一个长期过程, 因此在辐照结束后需要对其进行一段时间的观测。在最初的 1 周内, 其变化会比较剧烈, 因此最初 1 周内需要每天进行 1 次测量; 1 周以后改为 2 天进行 1 次测量; 在 1 个月以后其变化趋于稳定, 观测改为 1 周进行 1 次。

3 实验结果及讨论

3.1 阈值影响

基于在激光器阈值以上的 $I-P$ 曲线几乎是直线; 同时在 I_{th} 对应的输出功率 P_{th} 很小, 可忽略不计。因此用直线拟合法、两条直线拟合法、一次微分法和二次微分法来测定阈值电流 I_{th} 。其中最常用的为两端拟合法, 这里采用两端拟合法来测定阈值电流。图 2 分别给出了阈值电流在辐照时和退火期间的变化。

从图 2(a) 中可以看出 1 号器件阈值电流随着辐照剂量的增加而增加, 并且在 2×10^4 rad 之前增加较快, 之后增加较小且趋于平稳。1 号器件在辐照到 5×10^5 rad 之后, 阈值增加了 2.3%。在退火观测中, 由图 2(b) 可见, 在前 2 周内阈值变化出现震荡, 之后趋于平稳, 最大增加了 4.6%。图 2(c) 所示为 2 号器件辐照剂量与阈值的关系。与 1 号器件一样, 在最初阶段阈值相对来说增加很快, 之后趋于平缓, 最后阈值增加了 1%。图 2(d) 给出了退火观测变化, 在最初 1 周内变化不大, 在一周后阈值出现了较大增长, 最大增长了 28.5%, 可见 10^6 rad 对于 LD 来说有较大的影响。

3.2 斜率效率的影响

图 3 给出辐照对器件斜率效率的影响。

$$\eta_s = \frac{dP}{dI} = \eta_d \frac{h\nu}{q}, (I > I_{th})^{[10]}, \quad (1)$$

其中斜率效率包含了微分量子效率 η_d ; h, ν, q 均为常数, 因此 η_s 和 η_d 是等价的。一方面电离辐照增加了非辐射符合等因素, 使得斜率效率降低, 另一方面电离辐照增加了电导率, 从而使得斜率效率有增加的趋势。因此辐照对斜率效率的影响因素比较复杂。可以从图 3 中看出辐照对斜率效率的影响总体来说相对较小。1 号器件在之前略有增大, 2 号器件变化不大。

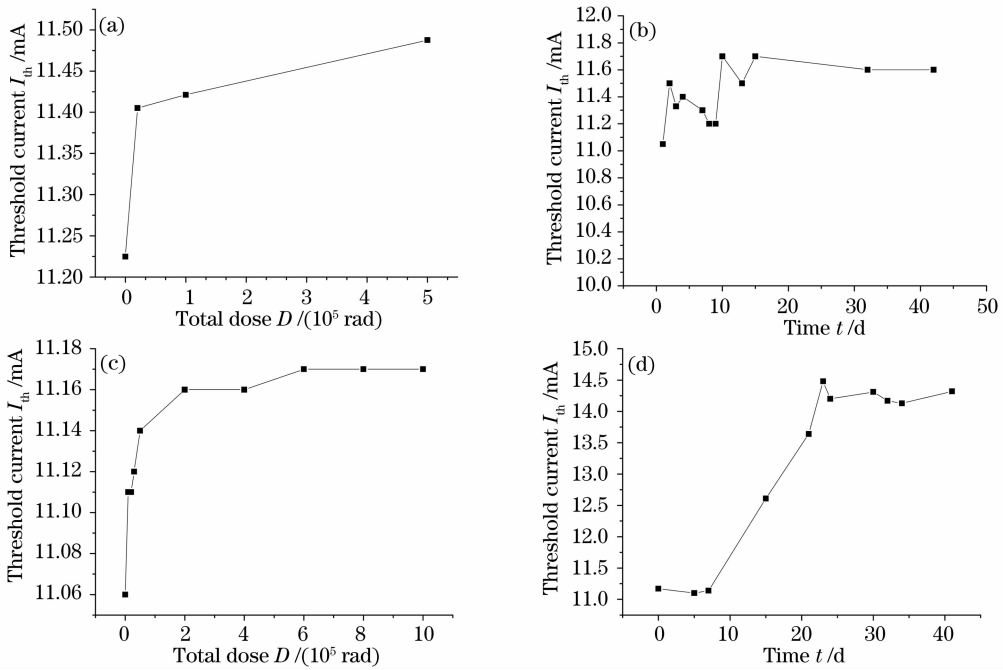


图2 器件的阈值变化曲线图。(a) 1号件的阈值电流与辐照剂量曲线；(b) 1号件退火观测阈值电流变化曲线；(c) 2号器件阈值电流与辐照剂量曲线；(d) 2号件退火观测阈值电流变化曲线

Fig. 2 Bar chart of the threshold changing. (a) LD 1's threshold current as total dose; (b) LD 1's annealing process; (c) LD 2's threshold current as total dose; (d) LD 2's annealing process

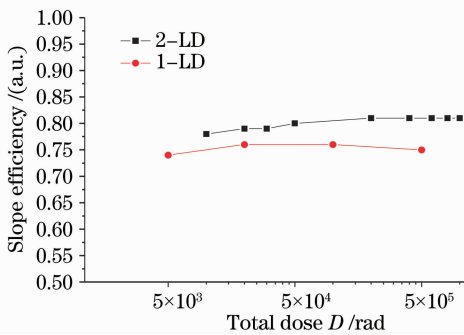


图3 斜率效率变化曲线图

Fig. 3 Line graph of slope efficiency

3.3 讨论

辐照对LD的影响主要有稳态和瞬态两种。瞬态表现为辐照结束,影响即消失;稳态影响持续时间要长得多,甚至不可恢复。稳态影响有两种机制,即电离效应和位移效应。电离效应的稳态影响主要产生于表面态,表面态一方面起到复合中心和俘获中心的作用,增加了LD的非辐射复合因素,使得阈值电流增加;另一方面起到散射中心的作用,对载流子形成无规则的漫反射,降低了内部量子效率,不仅使得阈值电流增加,还会在LD内形成孤立的点缺陷,产生位移损伤效应,导致载流子迁移率的降低,从而导致内效率的降低^[10,11]。可见这两种机制有效地减少了能在活性区产生复合载流子的比例,使LD

的阈值电流增加,在图1和图2中可以得到证实。

由于位移效应产生的应力,使得LD在辐照后的相当长一段时间内持续释放,并且在此过程中有一部分恢复至初始位置,会使LD的性能变好,而有一部分则在应力的作用下,使得晶格进一步畸变,并永久性脱离原位,因此出现不可恢复性变化,使激光器性能进一步恶化,从实验结果来看在退火过程中后一种作用占了主导地位。

从图1中可以看出,在一定辐照剂量下,LD的阈值增加了4.3%,在光通信中用LD时,可通过增加注入电流的方式对阈值偏移加以补偿来抵消此影响;而从图2中可以看到,在此辐照剂量下阈值增长了28.5%,对于使用电流补偿的方法有较大困难,必须增加特殊的防护加固措施减小辐照程度。

4 结论

辐照对LD的阈值影响大于斜率效率的影响。随着辐照剂量的增加阈值电流增大,斜率效率变化不大。通过电流补偿的方法可以在现有基础上直接在同步轨道上使用,而在地球轨道上使用必须增加特殊的防护措施。

参考文献

1 H. Lischka, H. Henschel, W. Lennartz *et al.*. Radiation

- sensitivity of light emitting diodes (LED), laser diodes (LD) and photodiodes (PD) [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1992, **33**: 423~427
- 2 A. Jolly, J. Vicrey. Modelling threshold shift of power laser diodes under neutronic and photonic irradiation[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994, **41**(6): 503~509
 - 3 J. C. Camparo, S. B. Delcamp, R. P. Frueholz. AlGaAs diode laser blue shift resulting from fast neutron irradiation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**: 5323~5331
 - 4 H. Ohyama, E. Simoen, C. Claeys *et al.*. Impact of neutron irradiation on optical performance of InGaAsP laser diodes [J]. *Thin Solid Films*, 2000, **364**: 259~263
 - 5 J. Beringer, K. Borer, R. K. Monnsen *et al.*. Radiation harness and lifetime studies of LEDs and VCSELs for the optical readout of the ATLAS SCT [J]. *Nucl. Instr. and Methods in Physics Research*, 1999, **435**: 375~392
 - 6 Yang Shengsheng, Zhang Ying, Gu Kewei *et al.*. Development of investigations on the total dose effect of devices in fiber optical communications system [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2002, **8**(4): 197~200
杨生胜, 张英, 顾克伟等. 光纤通信系统中器件的总剂量效应研究进展 [J]. *真空与低温*, 2002, **8**(4): 197~200
 - 7 Lin Libin, Liao Zhijun, Zhu Xiaotia *et al.*. Effect of electron radiation in 1.3 μm InGaAsP semiconductor laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(6): 497~500
林理彬, 廖志君, 祖小涛等. 1.3 μm InGaAsP 半导体激光器的电子辐照效应 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6): 497~500
 - 8 Wang Guizhen, Jiang Jinghe, Zhang Zhengxuan *et al.*. Radiation sources and dosimetry in the test of total dose effect [J]. *Microelectronics*, 2001, **31**(3): 168~172
王桂珍, 姜景和, 张正选等. 总剂量辐射效应中的辐射源及剂量测量 [J]. *微电子学*, 2001, **31**(3): 168~172
 - 9 Wang Tongquan, Shen Yongping, Wang Shangwu *et al.*. Radiation effects in the space radiation environment [J]. *J. National University of Defense Technology*, 1999, **21**(4): 36~39
王同权, 沈永平, 王尚武等. 空间辐射环境中的辐射效应 [J]. *国防科技大学学报*, 1999, **21**(4): 36~39
 - 10 Chen Jianguo, Li Yan, Lu Yang *et al.*. Study of bistable characteristics of long external cavity semiconductor lasers using expression of threshold carrier density [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1015~1020
陈建国, 李焱, 陆洋等. 用阈值表达式研究长外腔半导体激光器的双稳特征 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(8): 1015~1020
 - 11 A. H. Johnston, T. F. Miyahira, B. G. Rax. Proton damage in advanced laser diodes [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2001, **148**(12): 1746~1772