

InGaAsP 多量子阱激光二极管及其组件的 γ 辐射效应

黄绍艳, 刘敏波, 王祖军, 唐本奇, 肖志刚, 张 勇

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:本工作进行多量子阱激光二极管及其组件的 γ 辐照实验研究, 总剂量(以 Si 计)达 5.5×10^4 Gy。结果表明:多量子阱激光二极管抗 γ 射线辐照能力很强, 在实验总剂量下, 裸管形式的多量子阱激光二极管的 $P-I$ 特性、 $I-V$ 特性及中心波长基本未变化。而多量子阱激光二极管组件因包含光学窗口、耦合透镜及光纤等附属光学元件, 这些附属元件受 γ 辐照后光学性能下降, 最终导致激光二极管组件输出光功率随总剂量增大而下降, 停止辐照后, 不需加偏置, 在室温下即能发生退火, 使得斜率效率逐渐回升。

关键词:多量子阱激光二极管; γ 射线; 辐射效应

中图分类号: TN248.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)11-1024-05

γ -ray Radiation Effect on InGaAsP Multi-quantum Well Laser Diodes and Its Component

HUANG Shao-yan, LIU Min-bo, WANG Zu-jun, TANG Ben-qi,
XIAO Zhi-gang, ZHANG Yong

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Multi-quantum well laser diodes and their components were irradiated by gamma-ray up to the total ionization dose of 5.5×10^4 Gy (Si). The investigated multi-quantum well laser diodes are quite resistive to gamma-ray irradiation because their $P-I$ characteristics, $I-V$ characteristics and central wavelength have little changes. For laser diode component in which optical window, coupled lens and optical fiber and so on are included, its optical performance is degraded by gamma-ray irradiation. The output optical power of laser diode component decreases with total ionization dose; however, the slope efficiency increases gradually with natural annealing at room temperature without biasing after ceasing irradiation.

Key words: multi-quantum well laser diodes; gamma-ray; radiation effect

InGaAsP/InP 多量子阱激光二极管具有
低阈值电流、高微分量子效率、高可靠性、与光

纤能够高效耦合、在高温及高频调制下能够稳定工作等特点, 适用于长距离、大容量光纤通信

及自由空间通信系统中。此外,激光二极管具有尺寸小、寿命长、种类多、易于应用和保养、价格相对低廉等特点,使它们在传感及自动控制等领域发挥着重要作用。无论是工作在空间辐射环境还是核辐射环境下的激光二极管,其电离总剂量效应均备受关注。本工作研究多量子阱激光二极管及其组件的稳态 γ 总剂量效应,并对效应机理进行分析。

1 实验条件

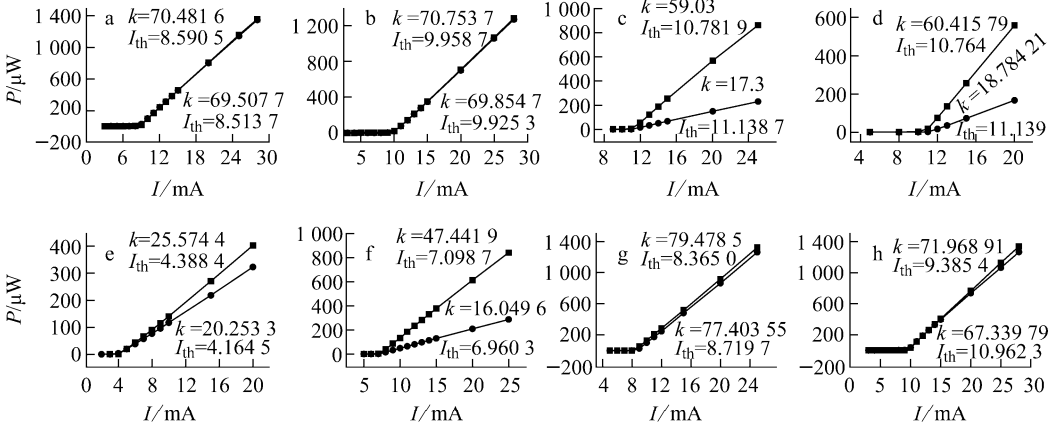
^{60}Co γ 辐照实验在西北核技术研究所的钴源辐照中心进行,剂量率(以 Si 计,下同) 0.5 Gy/s ,辐照总剂量达 $5.5 \times 10^4\text{ Gy}$ 。实验共用激光二极管 32 个,来自两个厂家,均为 InGaAsP 材料系的多量子阱结构,包括 F-P 腔激光二极管(FP-LD)和分布反馈式激光二极管(DFB-LD),并分别具有尾纤、光窗和裸管 3 种输出结构形式,光输出波长包括 1 310 和 1 550 nm 两种。辐照期间,器件处于加偏置电流、短路和开路 3 种状态。测试的主要参数包括 P - I 特性、 I - V 特性及中心波长,并通过对 P - I 曲线的线性部分进行直线拟合,获得激光二极管的两个重要参数:阈值电流和斜率效率。尾纤输出激光二极管在线测试参数变化,光窗输出和裸管结构的激光二极管离线测试。用于光电特性测试的电流源为 ILXLightwave 的 LDX3412 电流源,光功率波长计为该公司的 OMM6810B,其探头采用集成式积分球探头,使其不仅适用于光纤耦合输出结构,而且适用于输出光束具有一定发散角的光窗形式及裸管形式的激光二极管光功率和中心波长的测试。为了保证辐照前后测试过程中激光二极管与探头之间相对位置的一致性,将二极管插座固定在三维位移精密调节架上,并将调节架和探头固定在光学平台上。 I - V 特性测试利用 HP4156A 半导体参数分析仪。

2 光电特性退化的实验结果

图 1 示出不同结构、处于不同偏置状态的激光二极管在 γ 辐照前后 P - I 特性的典型实验结果。由图 1 可见,对于实验用激光二极管,辐照前后阈值电流基本未变化,而对应某一确定电流下的输出光功率及斜率效率均随总剂量的

增大而下降,具体的下降程度因器件输出结构形式、管芯结构及生产厂家的不同有较大差异。其中,对于两个厂家的裸管激光二极管,无论是 FP 腔还是 DFB 结构,斜率效率下降都很小,甚至基本无变化(图 1a、b);而尾纤输出结构和光窗输出结构的激光二极管斜率效率下降幅度要大些,原因在于,除了管芯外,尾纤输出激光二极管还包括耦合透镜及小段光纤;光窗输出结构中含有窗口;耦合透镜及光窗会因 γ 辐照使得透过率下降^[1-2],光纤会因 γ 辐照导致传输损耗增大^[3-5]。不同厂家封装的激光二极管组件,由于所用耦合透镜、光窗及光纤的材料和工艺不同,导致斜率效率下降程度有较大差别。例如,图 1f、h 所示的来源于两个厂家的光窗输出 FP-LD 管,辐照前斜率效率 k_0 与辐照后斜率效率 k 之间的变化率(即 $(k_0 - k)/k_0$) 分别为 66.17% 和 6.43%;图 1e、g 所示的尾纤输出 DFB-LD,辐照前、后斜率效率变化率分别为 20.81% 和 2.61%。

尾纤输出激光二极管在固定电流下的光输出功率均随总剂量的增大而下降,这里以图 1c 为例。图 2a、b、c 示出该激光二极管在 15 mA 下的输出光功率随总剂量下降的在线测试结果、相应的阈值电流和斜率效率随总剂量的变化情况。由图 2a、b、c 可见,激光二极管阈值电流随总剂量的变化在不到 0.5 mA 的小幅度范围内上下波动,这是由驱动电流和功率测试的不确定度造成的。从总的变化趋势看,阈值电流随总剂量的增加在缓慢增大,这是激光二极管因一直处于工作状态而导致有源区温度略有上升的结果,与 γ 辐照基本无关。而斜率效率随总剂量增加逐渐下降,与光功率随总剂量变化趋势是一致的。图 2d 示出激光二极管中心波长随总剂量变化的在线测试结果。由图 2d 可见,激光二极管中心波长随总剂量的变化也是上下波动的,波动范围小于 1 nm,这样的小幅度波动是随机的,与波长测试的不确定度及空气扰动等外界因素均有关。从总的趋势看,其中心波长随总剂量的增加在缓慢地向长波方向漂移,这同样是由于激光二极管因一直处于工作状态而导致有源区温度略有上升造成的,辐照期间处于短路状态的激光二极管的中心波长则未表现出上升的趋势。由此认为,实验用

图1 DFB-LD与FP-LD的*P-I*特性Fig. 1 *P-I* characteristics of DFB-LD and FP-LD

a, b——处于短路状态的裸管; c, e, g——加电 15 mA 的尾纤输出; d——处于短路状态的尾纤输出; f, h——处于短路状态的光窗输出

■——辐照前; ●——辐照后

a, c, d, f, h——FP腔结构; b, e, g——DFB结构

a, b, c, d, g, h—— 1×10^4 Gy; e, f——1 kGy

a~f为同一厂家产品, g, h为另一厂家产品;

k 的单位为 $\mu\text{W} \cdot \text{mA}^{-1}$, I_{th} 的单位为 mA

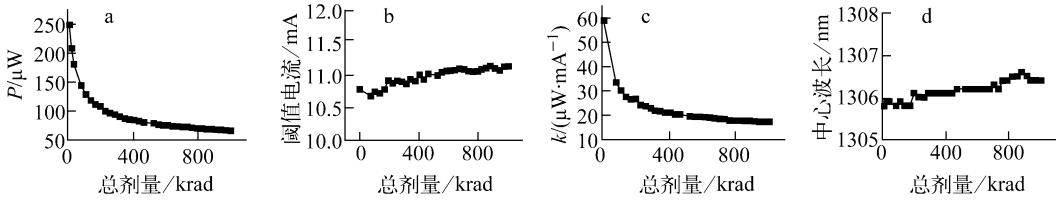


图2 加电 15 mA 的尾纤输出 FP-LD 的输出光功率(a)、阈值电流(b)、斜率效率(c)、中心波长(d)随总剂量的变化

Fig. 2 Output optical power (a), threshold current (b), slope efficiency (c), central wavelength (d) vs. total dose for FP-LD with fiber pigtail biased at 15 mA during irradiation

激光二极管的中心波长基本不受 γ 辐照所影响。由图 1c, d 的尾纤输出激光二极管斜率效率, 可得经 1×10^4 Gy 剂量辐照后, 加电与短路激光二极管的斜率效率变化率分别为 0.706 93 和 0.689 1, 相差 2.5%。实验所用的同类、同批器件在不同偏置条件下的斜率效率变化率差异均在 5% 以内, 因此, 偏置状态对 γ 辐射效应影响不大。

为了进一步验证多量子阱裸管激光二极管的抗 γ 总剂量能力以及偏置状态对辐射效应有无影响, 又对裸管激光二极管进行了高于 1×10^4 Gy 的总剂量辐照实验, 重点关注 2.0、3.5 和 5.5×10^4 Gy 3 个剂量点。图 3 分别示出辐照期间处于短路状态和加电 20 mA 的 FP 腔裸

管激光二极管的典型辐照结果。该结果与文献 [6] 一致, 表明多量子阱激光二极管抗 γ 辐照能力很强, 偏置状态对辐射效应无影响。

多量子阱激光二极管的有源区由多个量子阱组成, 与体有源区相比, 量子阱对载流子的限制效应大幅增加, 这也大幅提高了辐射复合率, 使得 γ 辐照导致的非辐射复合无法与辐射复合相竞争, 因此, 与体有源区激光二极管的 γ 辐射效应 [7] 相比, 多量子阱激光二极管具有很强的抗 γ 辐照能力。

尽管 *I-V* 特性并不是激光二极管的主要参数, 但正向 *I-V* 特性能够揭示出激光二极管退化的内部微观机制。图 4 示出处于短路和加电状态的 FP-LD 在不同总剂量辐照前、后 *I-V* 特

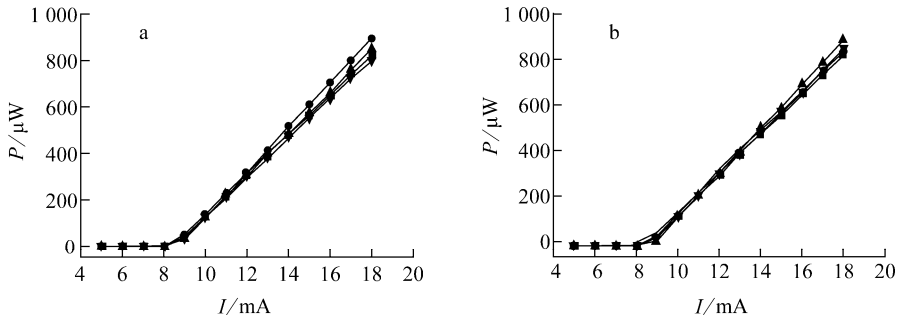


图 3 短路(a)和加电 20 mA(b)的 FP-LD 的 $P-I$ 特性

Fig. 3 $P-I$ characteristics of FP-LD shorted (a) and biased at 20 mA (b)

■——辐照前; ●—— 2.0×10^4 Gy; ▲—— 3.5×10^4 Gy; ▼—— 5.5×10^4 Gy

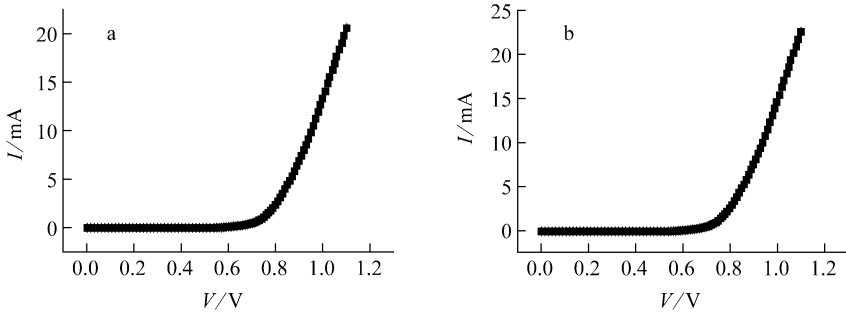


图 4 短路状态(a)和加电 20 mA(b)的 FP-LD 的 $I-V$ 特性

Fig. 4 $I-V$ characteristics of FP-LD shorted (a) and biased at 20 mA (b)

■——辐照前; ●—— 2.0×10^4 Gy; ▲—— 3.5×10^4 Gy; ▼—— 5.5×10^4 Gy

性的典型实验结果。可见,与中子和质子辐射效应不同^[8],这里未观察到低压区电流增加的现象, γ 辐照对激光二极管的 $I-V$ 特性无影响。

3 辐射效应的退火实验结果

受到 γ 射线辐照的激光二极管及其组件不

需加偏置,在室温下放置一段时间后,退火效应可使得其性能有所改善。图 5a 示出尾纤输出 FP-LD 放置不同时间后 $P-I$ 特性变化的典型实验结果。图 5b 是与图 5a 相对应的斜率效率随放置时间的增大情况。同时还可看出,退火速率在逐渐变慢。

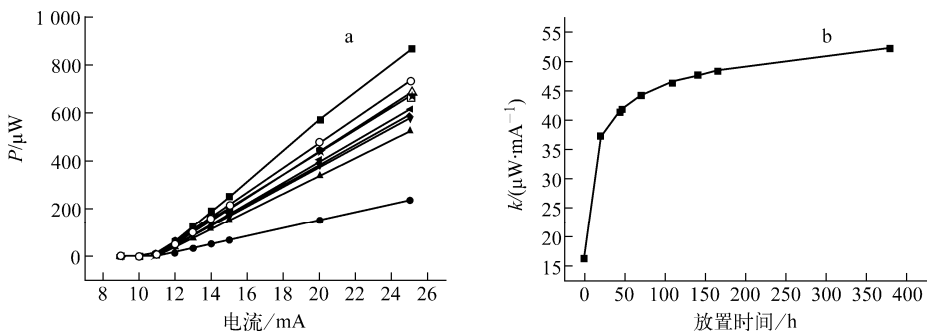


图 5 尾纤输出 FP-LD 在 1×10^4 Gy 辐照后 $P-I$ 特性的退火效应(a)和斜率效率的退火效应(b)

Fig. 5 Annealing effect of $P-I$ characteristics (a) and annealing effect of slope efficiency (b)

for FP-LD with fiber pigtail after 1×10^4 Gy irradiation

■——辐照前; ●—— 1×10^4 Gy 辐照后; ▲——辐照后 1 223 min; ▼——辐照后 2 615 min; ◆——加电流 75 min; ◀——辐照后 4 155 min; ▶——辐照后 6 585 min; □——辐照后 6 685 min; ★——辐照后 8 375 min; △——辐照后 9 855 min; ○——辐照后 22 800 min

4 结论

多量子阱裸管激光二极管抗 γ 辐照能力很强,这主要是由它的量子阱有源区结构决定的,与腔反馈形式无关。光窗输出和尾纤输出的多量子阱激光二极管组件包含光窗、耦合透镜及小段光纤,这些附属光学元件会因 γ 辐照而导致光透过率下降以及传输损耗增大,从而进一步造成激光二极管组件的输出光功率随总剂量增大而下降。下降幅度与附属光学元件的材料及工艺有关,不同厂家的产品,辐射效应差别较大。受过辐照的激光二极管组件不需加偏置,在室温下即能发生退火而使得其性能逐渐恢复。

参考文献:

- [1] dan SPOREA G, FLOREAN A. Evaluation of visible and near-IR laser diodes subjected to electron and gamma-ray irradiation[C]// Semiconductor Conference. [S. l.]: [s. n.], 2002: 359-362.
- [2] HASTINGS M C, CHIU B, HOLCOMB D E. Effects of gamma radiation on high-power infrared and visible laser diodes[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, 43(3): 2 141-2 149.
- [3] LESKOVAR B. Radiation effects on optical data transmission systems[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1999, 36(1): 543-551.
- [4] FRIEBELE E J, GINGERICH M E, SIGEL G H. Radiation response of fiber optic waveguides in the 0.4 to 1.7 μm region[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1978, 25(6): 1 261-1 266.
- [5] GREENWELL R A, SCOTT D M, CHAPMAN J E, et al. Radiation testing of optical fibers for the space station[C]// First European Conference. [S. l.]: [s. n.], 1991: 383-386.
- [6] SPOREA D. Effects of gamma-ray irradiation on quantum-well semiconductor lasers[C]// Radiation Effects Data Workshop. [S. l.]: [s. n.], 2004: 137-144.
- [7] LISCHKA H, HENSCHER H, KOHN O, et al. Gamma and neutron irradiation of optoelectronic devices[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, 43(3): 560-563.
- [8] ZHAO Y F, PATWARY A R, SCHRIMPF R D, et al. 200 MeV proton damage effects on multi-quantum well laser diodes[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, 44(6): 1 898-1 905.