

850 nm 垂直腔面发射激光器的辐射效应

陈加伟^{1,2}, 李豫东¹, 玛丽娅¹, 李 钰³, 郭 旗¹

(1. 中国科学院新疆理化技术研究所 特殊环境功能材料与器件重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要: 为了探究 850 nm 高速垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 在空间辐射环境中的退化规律与机制, 开展了 10 MeV 质子和 γ -射线辐照实验, 获得了光功率和阈值电流退化规律, 分析了辐射导致 VCSEL 参数退化的物理机理, 此外, 还开展了 236 h 的电注入退火研究。研究表明: VCSEL 对 γ 射线导致的总剂量效应不敏感, 且在一定剂量范围内光电特性由于沉积能量促进了量子阱界面附近的晶体有序而产生了一定程度的恢复; 但是在质子辐照下, VCSEL 的阈值电流和外量子效率发生了不同程度的退化, 计算获得阈值电流损伤因子为 $1.468 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{p}$ 。经过 20 mA 注入增强退火后, 阈值电流恢复了 20%, 25 mA 注入电流下, 光输出功率恢复了 10%。阈值电流和外量子效率的退化归因于质子辐照引入的非辐射复合中心。这些实验结果为 VCSEL 及包含 VCSEL 的数据通信与仪器的系统在恶劣空间辐射环境下的应用提供支持。

关键词: VCSEL; 辐射效应; 位移损伤; 退火

中图分类号: O59 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210326

Radiation effect of 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser

Chen Jiawei^{1,2}, Li Yudong¹, Ma Liya¹, Li Yu³, Guo Qi¹

(1. Key Laboratory of Functional Materials and Device for Special Environments, Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To explore the degradation and mechanism of 850 nm high-speed vertical-cavity surface-emitting laser in space radiation environment, the degradation of light output power and threshold current were obtained by Gamma ray and 10 MeV proton irradiation. The physical mechanism of VCSEL parameter degradation caused by radiation was analyzed. In addition, 236 h forward-bias annealing research was also carried out. The results show that VCSEL is not sensitive to the total dose effect caused by gamma rays, the photoelectric properties have a certain degree of recovery due to the deposition energy promoting the order of the crystals near the quantum well interface within a certain dose range. But threshold current and external quantum efficiency of VCSEL are degraded in varying degrees under proton irradiation, the threshold current damage factor is calculated to be $1.468 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{p}$. After 20 mA forward-bias annealing, the threshold current is restored by 20%, and the optical

收稿日期: 2021-12-25; 修订日期: 2022-02-20

基金项目: 国家自然科学基金 (61534008, 11275262); 中国科学院西部之光 (2017-XBQNXZ-B-004)

作者简介: 陈加伟, 男, 博士生, 主要从事垂直腔面发射激光器的辐射效应方面的研究。

导师简介: 李豫东, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电成像器件空间辐射效应方面的研究。

output power is restored by 10% at 25 mA injection current. The degradation of threshold current and external quantum efficiency is attributed to the non-radiative recombination center introduced by proton irradiation. These results provide support for the application of VCSEL and the data communication and instrument system containing VCSEL in harsh space radiation environment.

Key words: VCSEL; radiation effects; displacement damage; annealing

0 引言

垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 自量子阱有源区产生激光并在上下分布布拉格反射层 (distributed Bragg reflector, DBR) 中反射, 然后垂直于芯片表面出射激光, 这种特殊的结构使其相比于传统边缘发射激光器具有阈值电流低、远场图对称、调制速率快、成本低以及更容易二维集成等优势^[1-2]。自 20 世纪 90 年代中期以来, 基于 AlGaAs 材料系统的多模 850 nm 垂直腔面发射激光器一直是基于光纤的数据通信链路的标准光源。此外, 使用 VCSEL 作为核心器件的光互联模块在传输距离、传输速率、功耗上远远领先于传统铜线互联^[3]。这使得光互连模块对于空间任务中数据的通信具有巨大吸引力。

然而, 脱离了地球大气环境的保护, 空间辐射环境中存在大量的电子、质子和重离子等各种高能粒子。这些高能带电粒子与卫星上元器件及材料发生相互作用, 产生各种辐射效应^[4-5], 从而对元器件及卫星上各系统的可靠性提出巨大挑战。因此, 了解 VCSEL 在辐射环境下的退化对于评估光互连模块的可靠性及卫星设计中的应用起到至关重要的作用。

随着工艺及结构的更新, 近几年对激光器的研究主要集中在新型的器件, 尤其是量子阱激光器、量子点激光器和 VCSEL^[6-7]。E. W. Taylor 等人最早进行了 4.5 MeV VCSEL 的辐射效应研究, 在吸收剂量到达 1.19 MGy 时, 观察到了 VCSEL 的功率-电流-电压 (L-I-V) 曲线的退化^[8]。M. Boutillier 等人进行了电子辐照 852 nm 激光器, 在质子注量到 10^{16} e/cm² 时阈值电流增加 5%, 并认为这种退化是由非辐射复合中心引起的^[9]。黄绍艳对 2 MeV、5 MeV 质子对 FB 腔及分布反馈结构多量子阱激光二极管研究表明激光二极管阈值电流随注量的增大而增加, 且 2 MeV 质子要比 5 MeV 质子导致的阈值电流增大更多^[10]。文中对 850 nm VCSEL 进行了系统的辐照及退火实验, 结合

L-I-V 曲线对 VCSEL 参数的退化机制进行了分析研究。并详细分析了辐照对阈值电流、外量子效率 (External Quantum Efficiency, EQE) 和光功率等参数退化的物理机制。

1 实验方法

此次实验采用的样品为 Vixar 公司的 850 nm 多模 VCSEL, 实验样品的扫描透射电镜 (Scanning Transmission Electron Microscopy, STEM) 结构图如图 1 所示, 在 n 型 GaAs 衬底上分别生长 n 电极, n 型 DBR, 量子阱及包覆层, 限制电流注入的氧化层, p 型 DBR 和 p 电极。在室温下, 其最佳工作电流为 25 mA, 峰值光功率为 18 mW。VCSEL 使用三个量子阱 (Multiple Quantum Wells, MQWs) 的结构, 该有源区夹在两个 AlGaAs 包覆层之间。DBR 由 20.5 对 p 型掺杂顶部反射镜和 38.5 对 n 型掺杂底部反射镜在 n 掺杂的 GaAs 衬底上生长而成。试验样品采用 TO-46 形式封装, 其封装盖在辐照前被去除以避免对质子能量的影响。辐照时 VCSEL 处于开路状态并垂直于辐射源。

γ -射线辐照实验使用新疆理化技术研究所⁶⁰Co 辐射源, 选取剂量点分别为 5 Mrad (Si)、10 Mrad (Si)、100 Mrad (Si)。质子辐照实验在北京大学重离子物理研究所 2×6 MeV EN 串列静电加速器上进行, 质子能

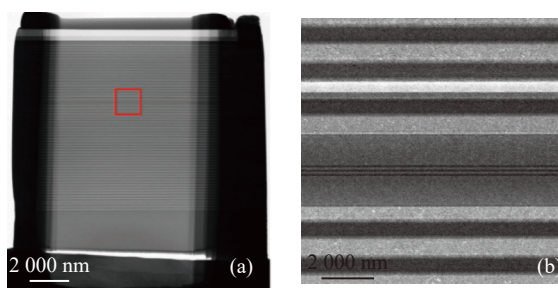


图 1 (a) 850 nm VCSEL 的 STEM 横截面图; (b) AlGaAs/GaAs 多量子阱部分结构放大图

Fig.1 STEM cross-sectional image of the 850 nm VCSEL; (b) Magnification of the partial structure of AlGaAs/GaAs MQWs

量为 10 MeV。通过 MULASSIS 工具进行的计算 10 MeV 质子能够完全穿透有源器件区域并到达衬底^[11]。质子注量点分别为 2×10^{13} 、 4×10^{13} 、 8×10^{13} 、 1.6×10^{14} 、 3.2×10^{14} p/cm²，注量意为单位面积上辐照引入的质子数量。退火实验选取注入电流为 20 mA，退火时间为 236 h，每个退火点的测试时间控制在 15 min 以内。

在辐照及退火后，使用扫描狭缝光束轮廓仪及 4200 A-SCS 半导体参数分析仪测试了 VCSEL 的 L-I-V 曲线。由于 VCSEL 的光学特性受温度影响较大，测试时使用台式激光二极管/TEC 控制器驱动器件并严格控制测试温度为 30 ℃，光功率测试时使用标准 VCSEL 在最佳工作电流下校准光输出功率。

2 实验结果及分析

2.1 质子辐照实验

VCSEL 在空间辐射环境下产生光电参数退化主要是因为位移损伤的影响^[12]。位移损伤效应是当粒子入射到材料上时，一部分晶格原子因为碰撞而离开晶格位置，从而诱导了孤立空位和间隙缺陷、反位缺陷和更复杂的缺陷，由于周期性晶格结构的破坏，这些缺陷在量子阱带隙中引入了新的能级。这些新的能级起到复合载流子的非辐射复合中心作用。

10 MeV 质子辐照后 VCSEL 的 I-V 特性与注量的关系如图 2 所示，图中电压电流的比值即为 VCSEL 的串联电阻，随着驱动电流的增加，由于器件中的载流子浓度和注入电流同时提高，串联电阻会减小。辐照后，随着注量的增加，在给定电流下需要更高的电压来驱动 VCSEL，其本质是串联电阻的增加，这归因于辐照引入的非辐射复合中心，载流子的平均漂移速度由于非辐射复合中心的影响而降低，因此电阻率增大，在 I-V 曲线中表现为曲线向上漂移。

阈值电流定义为 VCSEL 从荧光模式切换到激光模式时对应的电流，在 L-I 曲线中，采用两段直线法获得阈值电流，对荧光模式和激光模式的数据进行线性拟合，两条拟合直线的交点对应的横坐标即为阈值电流。从图 3 可见阈值电流随着质子注量的增大而增大，辐照后阈值电流变为初值的 1.492 倍。对于 VCSEL，由于辐照引入的非辐射复合中心降低了少数载流子寿命，而少子寿命与控制荧光模式和激光模式

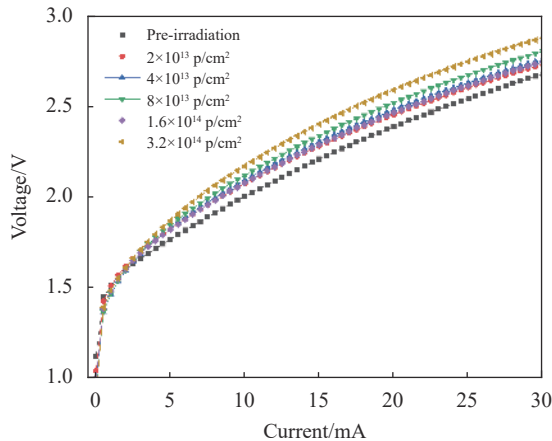


图 2 10 MeV 质子辐照后 I-V 特性随注量变化曲线

Fig.2 Curve of I-V characteristics with the amount of the injected after 10 MeV proton irradiation

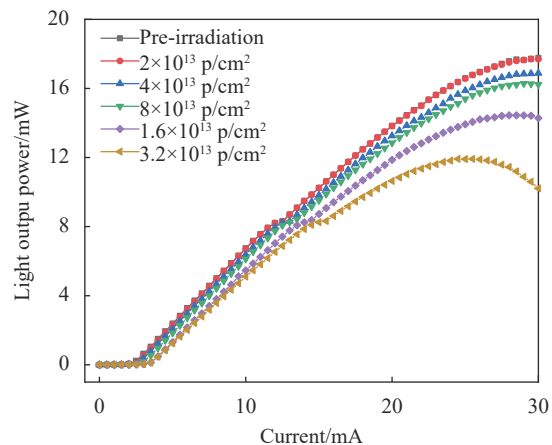


图 3 10 MeV 质子辐照后 L-I 特性随注量变化曲线

Fig.3 Variation curve of L-I characteristics with fluence after 10 MeV proton irradiation

的自发发射和受激发射直接相关，因此阈值电流增大。使用阈值电流损伤因子可以预测阈值电流的漂移，阈值电流损伤因子表达式如下^[13]：

$$I_{th}/I_{th(0)} = 1 + K_1 \Phi \quad (1)$$

式中： $I_{th(0)}$ 为初始阈值电流； I_{th} 为辐照后阈值电流； Φ 为质子注量，单位：p/cm²； K_1 为阈值电流损伤因子。经过拟合计算，10 MeV 质子辐照下 VCSEL 的阈值电流损伤因子为 1.468×10^{-15} cm²/p，如图 4 所示。阈值电流损伤因子对于预估 VCSEL 在高注量下的性能退化具有重要意义，该因子降低了地面评估实验的工作量。

在 L-I 曲线中，斜率效率定义为 VCSEL 进入激光

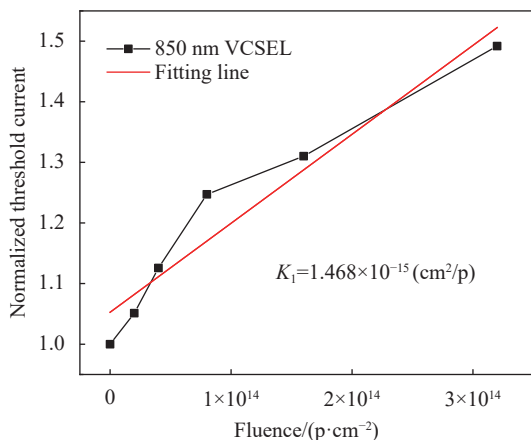


图 4 归一化阈值电流与质子注量关系图

Fig.4 Relationship between normalized threshold current and proton fluence

模式后线性部分的斜率,该参数表现了 VCSEL 将载流子转化为光子的能力,斜率效率越大则 VCSEL 的特性越好,通过斜率效率 η_d 可以计算 EQE,其公式如下^[14]:

$$\eta_{ex} = \eta_d \frac{q\lambda}{hc} \quad (2)$$

式中: η_{ex} 为 EQE; η_d 为斜率效率; λ 为工作波长; h 为普朗克常数; c 为光速。EQE 可以更加直观地反应辐照后量子阱部分的退化,EQE 随注量的变化计算结果如图 5 所示,随着质子注量的增加,EQE 逐渐降低且呈线性变化,辐照后 EQE 退化为初值的 87.5%。由于辐照引入的非辐射复合中心复合了部分载流子,使得在单位时间内注入有源区电子空穴对数不变的情况下每秒产生的光子数降低,因此,EQE 随质子注量的增

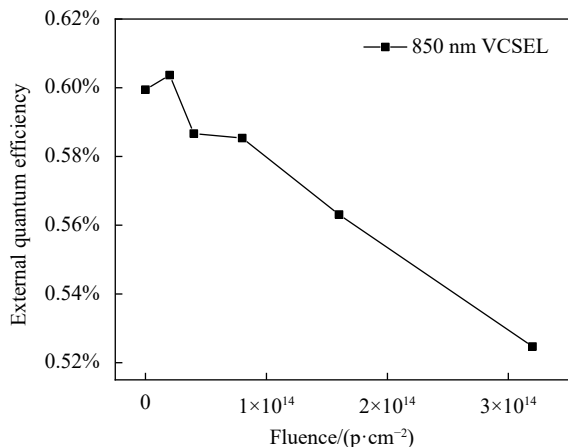


图 5 外量子效率与质子注量关系图

Fig.5 Relationship between external quantum efficiency and proton flux

大而降低。

2.2 γ 射线辐照实验

由于质子辐照时会引入电离总剂量效应,为了探究电离总剂量效应对 VCSEL 性能退化的影响,使用⁶⁰Co 辐射源开展 γ 射线辐照研究。 γ -射线辐照结果如图 6 所示,从图中可见, γ 辐照总剂量达到 100 Mrad(Si)后,VCSEL 的 L-I-V 特性曲线没有发生明显的漂移,即 VCSEL 对总剂量效应不敏感。然而,光输出功率的部分放大图表明,VCSEL 的光学特性有先恢复后退化的趋势,即 VCSEL 的输出特性在一定剂量下获得轻微的改善,如图 6 中部分放大图所示。这种现象可以解释为晶体中的辐射诱导有序效应,沉积能量能促进量子阱界面附近的晶体有序,从而补偿甚至克服位移损伤的影响,但是其贡献相对较小,所以在一定剂量后又呈现退化的趋势。

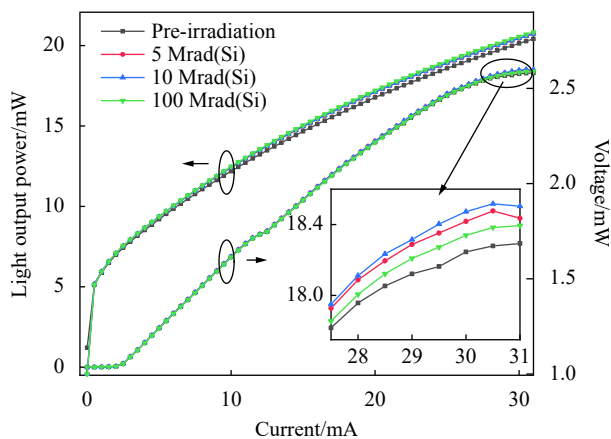


图 6 γ 射线辐照后的 L-I-V 特性曲线

Fig.6 L-I-V characteristic curve after γ -ray irradiation

2.3 退火实验

许多光电器件在施加正向偏压时会出现注入退火现象,即在偏压下器件的光电性能会有所恢复。这种现象用复合增强缺陷反应来解释^[15],即缺陷复合速率与注入的电荷密度线性相关,随着注入电流的注入,单位时间内复合的缺陷数量增多,即缺陷复合速率增大。由于缺陷的数量的降低,则阈值电流逐渐恢复。为了探究电注入退火对工作条件下 VCSEL 的性能影响。图 7 展示了 20 mA 注入电流下 VCSLE 的阈值电流变化,经过 236 小时退火后,阈值电流恢复了 20.1% 并趋于稳定。

此外,VCSEL 在 25 mA 最佳工作电流驱动下,在

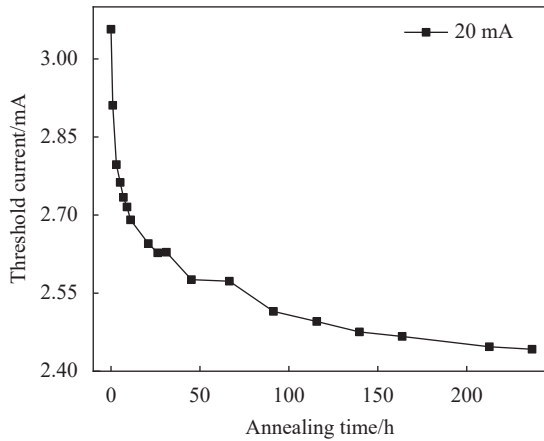


图 7 20 mA 电流注入下 VCSEL 的阈值电流与退火时间的关系

Fig.7 Relationship between threshold current and annealing time of VCSEL under 20 mA current injection

236 h 退火后其光输出功率恢复了 10.0%，如图 8 所示。光输出功率的恢复主要受两方面的影响：一是由于非辐射复合概率降低，载流子复合产生光子数增多；二是非辐射复合会产生热量使结温升高，当非辐射复合概率降低，则器件结温降低，因此输出光功率增加。VCSEL 加电后阈值电流和光输出功率恢复的这一特性对于器件的实际应用具有重要价值，器件在正常加电使用时，注入的电流会使其部分缺陷恢复，所以，其抗辐射性能会比实验评估的结果更加优异。

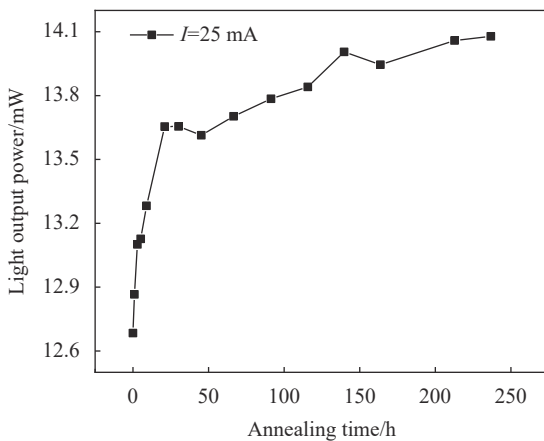


图 8 25 mA 电流注入下 VCSEL 的光功率与退火时间的关系

Fig.8 Relationship between light output power and annealing time of VCSEL under 25 mA current injection

3 结论

文中研究了 γ -射线与 10 MeV 质子辐照对 VCSEL

性能退化的影响，研究表明，VCSEL 对 γ -射线引入的总剂量效应不敏感，且在一定范围内辐照会引起 VCSEL 性能的微小恢复，在质子辐照下，随着质子注量的增加，VCSEL 的光输出功率下降，串联电阻增大，阈值电流增大，EQE 降低，经过计算，阈值电流损伤因子为 $1.468 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{p}$ ，VCSEL 光电参数的退化归因于辐照引入的非辐射复合中心，非辐射复合中心不仅复合载流子，还会产生更多热量。此外，20 mA 加电增强退火实验表明，经过退火后，阈值电流与光输出功率均有所恢复，阈值电流与光输出功率在 236 h 退火后分别恢复了 20.1% 和 10.0% 并趋于稳定。文中系统的进行了质子与 γ -射线辐射对 VCSEL 的影响，辐照对 VCSEL 参数退化的结果对 VCSEL 及包含 VCSEL 的光通信系统及光互连模块在恶劣空间辐射环境下的应用具有非常重要的参考价值。

参考文献：

- [1] Tong H X, Tong C Z, Wang Z Y, et al. Advances in the technology of 850 nm high-speed vertical cavity surface emitting lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201077. (in Chinese)
- [2] Shi J J, Qin L, Ning Y Q, et al. 850 nm vertical cavity surface-emitting laser arrays [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 17-23. (in Chinese)
- [3] Liu X, Xue Y, Xu H C. Design and test of 4.25 Gbps optical transceiver [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 77-82. (in Chinese)
- [4] Srour R J, Palko J W. Displacement damage effects in irradiated semiconductor devices [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2013, 60(3): 1740-1766.
- [5] Feng J, Li Y D, Wen L, et al. Degradation mechanism of star sensor performance caused by radiation damage of CMOS image sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190555. (in Chinese)
- [6] Xu H W, Ning Y Q, Zeng Y G, et al. Design and epitaxial growth of quantum-well for 852 nm laser diode [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 590-597. (in Chinese)
- [7] Wang Q, Liu Yun, Wang L J. Design of In P-based quantum cascade laser with high power and short wavelength [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 83-91. (in Chinese)
- [8] Taylor E W, Paxton A H, Schone H, et al. In vacuo responses of an AlGaAs vertical cavity surface emitting laser irradiated by 4.5 MeV protons [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1998, 45(3): 1514-1517.

- [9] Boutillier M, Gauthier-Lafaye, Bonnefont O S, et al. Electron irradiation effects on Al-free laser diodes emitting at 852 nm [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2007, 54(4): 1110-1114.
- [10] Huang S Y, Liu M B, Xiao Z G, et al. Study on displacement damage effects of laser diode [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(2): 195-199. (in Chinese)
- [11] Lei F, Truscott P, RDyer C S, et al. Mulassis: A Geant4-based multilayered shielding simulation tool [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2002, 49(6): 2788-2793.
- [12] Johnston A H. Radiation effects in optoelectronic devices [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2013, 60(3): 2054-2073.
- [13] Evans B D, Hager H E, Hughlock B W. 5.5-MeV proton irradiation of a strained-quantum-well laser-diode and a multiple-quantum-well broad-band LED [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1993, 40(6): 1645-1654.
- [14] Xu Z W, Qu Y, Wang Y Z, et al. Simulation analysis of high power asymmetric 980 nm broad-waveguide diode lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1094-1098.
- [15] Kimerling L C. Recombination enhanced defect reactions [J]. *Solid-state Electron*, 1978, 21(11-12): 1391-1401.