

# 850 nm 垂直腔面发射激光器的辐射效应和仿真

陈加伟<sup>1,2</sup> 李豫东<sup>1</sup> 玛丽娅·黑尼<sup>1</sup> 郭旗<sup>1</sup> 刘希言<sup>3</sup>

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 乌鲁木齐 830011)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

**摘要** 为了探究850 nm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理,开展了3 MeV和10 MeV质子辐照实验,获得了光输出功率和阈值电流等参数随质子注量的退化规律,同时发现光输出功率和阈值电流在相同位移损伤剂量(Displacement Damage Dose, DDD)下的退化程度基本一致。在实验的基础上使用Silvaco软件进行建模与仿真计算,结果与实验结果具有较高一致性,在仿真模型中提取了陷阱密度、施主与受主电离密度、镜面损失、辐射复合速率和光子数等微观参数,在实验规律基础上深入探究了参数退化规律与辐射损伤机制。仿真结果发现这些微观参数随质子注量增加均有不同程度的变化。该结果对于进一步深入理解VCSEL退化机制具有重要意义的参考价值。

**关键词** 垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL), 辐射效应, 位移损伤效应, Silvaco

中图分类号 TL11

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110202

## Radiation effect and simulation of 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser

CHEN Jiawei<sup>1,2</sup> LI Yudong<sup>1</sup> MALIYA·Heini<sup>1</sup> GUO Qi<sup>1</sup> LIU Xiyan<sup>3</sup>

1(Key Laboratory of Functional Materials and Device for Special Environments, Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemical, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** [Background] Vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) have very high application value in space radiation environment. [Purpose] This study aims to explore the degradation rule and mechanism of 850 nm VCSEL in harsh radiation environment. [Methods] First of all, the MULASSIS tool was employed to calculate displacement damage dose (DDD) and design experimental scheme for 850 nm multimode VCSEL samples. Then, 3 MeV and 10 MeV proton irradiation experiments were conducted to obtain the degradation rule of parameters such as light output power and threshold current with the proton fluence, and to find that the degradation degree of light output

国家自然科学基金(No.61534008)、新疆电子信息材料与器件重点实验室资助项目(No.2021D04012)资助

第一作者: 陈加伟, 男, 1996年出生, 2014年毕业于安徽工业大学, 现为博士研究生, 研究领域为VCSEL的辐射效应

通信作者: 李豫东, E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn; 玛丽娅·黑尼, E-mail: maliya@ms.xjb.ac.cn

收稿日期: 2022-07-06, 修回日期: 2022-08-17

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61534008), Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices (No.2021D04012)

First author: CHEN Jiawei, male, born in 1996, graduated from Anhui University of Technology in 2014, doctoral student, focusing on radiation effect of VCSEL

Corresponding author: LI Yudong, E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn; MALIYA·Heini, E-mail: maliya@ms.xjb.ac.cn

Received date: 2022-07-06, revised date: 2022-08-17

power and threshold current were equal under the same DDD. Finally, the Silvaco software was used for modeling and simulation on an experimental basis to extract microscopic parameters such as trap density, donor and acceptor ionization density, mirror loss, radiation recombination rate and photon number. **[Results]** The simulation results are in good agreement with the experimental results, these results show that each parameter changes to different degrees with the increase of proton fluence. **[Conclusions]** The parameter degradation law and radiation damage mechanism of VCSEL can be deeply explored by simulation on the basis of the experimental law, and simulation results are of great significance for understanding the degradation mechanism of VCSEL.

**Key words** Vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL), Radiation effect, Displacement damage effect, Silvaco

Melngailis 首次在 1965 年提出激光垂直腔面发射的思想<sup>[1]</sup>后,1977 年诞生了第一只垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)<sup>[2]</sup>。该结构的激光器使得注入电流在有源区产生的激光经过上下分布布拉格 (Distributed Bragg Reflection, DBR) 反射后可以垂直于正表面射出。此外,VCSEL 还兼备低阈值电流,高速高频调制,工艺成本低,远场图对称和容易二维集成等优点<sup>[3-5]</sup>。自 20 世纪 90 年代中期以来,基于 GaAs 材料和氧化工艺快速发展使得 850 nm VCSEL 一直是基于光纤的数据通信链路的标准光源。短程光纤通信传输速率快、体积功耗小和抗电磁干扰等优势,使其在航空航天、卫星通信和强核辐射环境领域具有巨大的应用潜力<sup>[6-7]</sup>。

VCSEL 在空间辐射环境中应用时长期承受各种粒子辐射影响,包括大量电子、质子和重离子。这些高能带电粒子与 VCSEL 相互作用产生位移损伤辐射效应,直接影响 VCSEL 光电参数,使得光纤通信系统性能下降甚至失效<sup>[8]</sup>,而地面模拟需要做大量实验以最大程度评估实际空间辐射环境下的可靠性<sup>[9]</sup>。因此,研究不同能量粒子的损伤等效以及了解 VCSEL 在辐射环境下的退化机理对于 VCSEL 在卫星中的应用具有非常重要的价值。

人们已经对 VCSEL 在辐射下的参数退化进行了许多研究。辐射源覆盖了大多数粒子,包括  $\gamma$  射线、中子、质子、电子和重离子<sup>[10-14]</sup>。从最早的实验规则定性探索开始,逐步深入研究 GaAs/AlGaAs 材料降解的物理机制<sup>[15]</sup>。然而,借助仿真软件深入分析参数退化机制鲜有报道。本文对 850 nm VCSEL 进行了 3 MeV 和 10 MeV 质子辐照及仿真研究,使用位移损伤剂量 (Displacement Damage Dose, DDD) 等效参数的退化并通过 Silvaco 仿真获得了和实验一致的结果。此外,进一步结合 Silvaco 仿真软件对 VCSEL 的参数进行提取并对参数的退化机制进行了理论分析。该实验及仿真结果对提高地面模拟实验的效率及进一步深入理解 VCSEL 的位移损伤效应机理具有重要意义。

## 1 实验方法

实验采用的样品为 850 nm 多模 VCSEL,根据实验样品的扫描透射电镜 (Scanning Transmission Electron Microscopy, STEM) 结果获得该款器件的结构参数如下:最底层为 n 型 GaAs 衬底,上下 DBR 对数分别为 20.5 和 38.5 对,有源区为 3 个量子阱结构。在此结构上我们使用 Silvaco 软件进行建模,其中上下 DBR 部分分别使用  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的 p 型和 n 型掺杂,相邻 DBR 高低折射率材料组分及厚度分别为  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/39 \text{ nm}$ 、 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/50 \text{ nm}$ ,在相邻折射率材料之间使用 20 nm 的组分渐变层过渡。有源区无掺杂,分别使用 GaAs/8 nm、 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/8 \text{ nm}$  作为发光层和包覆层。顶部设置 5 nm 重掺杂作欧姆接触。氧化限制层设置了 6  $\mu\text{m}$  的氧化孔径。模型结构如图 1(a) 所示,图 1(b) 为器件工作时量子阱区域部分放大图。

质子辐照实验在北京大学重离子物理研究所  $2 \times 6 \text{ MV EN}$  串列静电加速器上进行,选取质子能量分别为 3 MeV 和 10 MeV。通过 MULASSIS 工具进行计算 DDD 并设计实验方案,如表 1 所示<sup>[16]</sup>。设计实验使得两种能量的质子在不同注量下具有一致的 DDD。VCSEL 样品采用 TO-46 形式封装,封装盖在辐照前被去除避免对质子的阻挡从而导致注量测量不准确。辐照时 VCSEL 引脚开路并垂直于质子辐射源。辐照后,使用扫描狭缝光束轮廓仪及 4200A-SCS 半导体参数分析仪测试 VCSEL 的光-电流-电压 (L-I-V) 曲线。由于 VCSEL 的光学特性受温度影响,使用 ITC4002QCL 驱动器并严格控制测试温度为 30  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 质子辐照结果与仿真模型

使用 MULASSIS 工具计算位移损伤剂量公式如下:

$$D_{\text{DD}} = L_{\text{NIE}} \cdot \phi \quad (1)$$

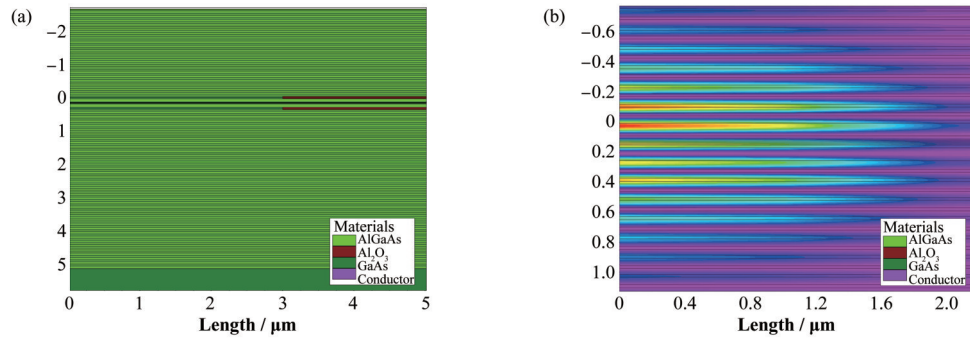


图1 850 nm VCSEL 的 Silvaco 模型结构图(a)和 VCSEL 工作时多量子阱区域的部分放大图(b)  
 Fig.1 Silvaco model structure diagram of 850 nm VCSEL (a) and partial enlarged view of the quantum well region when the VCSEL is operating (b)

表1 3 MeV 和 10 MeV 在不同质子注量下对应的 DDD  
 Table 1 Corresponding DDD of 3 MeV and 10 MeV at different proton fluences

质子能量 Proton energy / MeV	位移损伤剂量 DDD / MeV·g <sup>-1</sup>	注量 Fluence / cm <sup>-2</sup>
3	1.56×10 <sup>11</sup>	6.70×10 <sup>12</sup>
	3.12×10 <sup>11</sup>	1.34×10 <sup>13</sup>
	6.24×10 <sup>11</sup>	2.68×10 <sup>13</sup>
	1.24×10 <sup>12</sup>	5.36×10 <sup>13</sup>
10	1.58×10 <sup>11</sup>	2×10 <sup>13</sup>
	3.16×10 <sup>11</sup>	4×10 <sup>13</sup>
	6.33×10 <sup>11</sup>	8×10 <sup>13</sup>
	1.26×10 <sup>12</sup>	1.6×10 <sup>14</sup>

式中： $L_{NIE}$  为非电离能量损失 (Non-Ionizing Energy Loss)，该值与入射粒子能量、种类和靶材料有关； $\phi$  为质子注量； $D_{DD}$  指单位质量的靶材料在辐照中由于晶格原子位移造成结构损伤所吸收的能量。图2展示了3 MeV 质子辐照后的光输出功率-电流曲线 (L-I)，从图2可见，随着质子注量的增加，VCSEL 的阈值电流逐渐增加；相同注入电流下光输出功率降低。该结果主要考虑是由于质子辐照引入位移损伤引起的。

当高能粒子与半导体晶格碰撞时，原子可能会从其晶格位置脱离并被推入晶体内的间隙位置，这

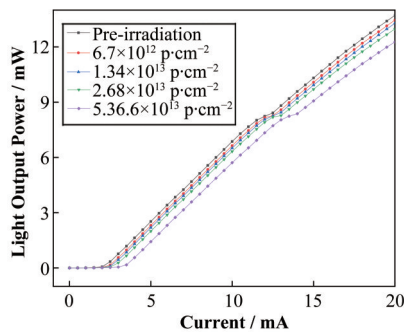


图2 3 MeV 质子辐照下 VCSEL 的 L-I 特性随质子注量变化  
 Fig.2 Relationship between L-I characteristics of VCSEL and proton fluence under 3 MeV proton irradiation

个被取代的原子以前的晶格位置被称为空位。被置换的原子称为间隙原子 (不在正常晶格位置的原子)，间隙空位对称称为弗伦克尔对。如果高能粒子具有足够大的能量，这些被置换的原子会产生级联碰撞进一步碰撞其他晶格原子，这些级联碰撞会导致一个大的无序区域，称为缺陷簇<sup>[17]</sup>。这些缺陷作为非辐射复合中心俘获载流子，由于相同注入电流下部分载流子补偿缺陷，所以导致了阈值电流的增加<sup>[18]</sup>。同样，由于缺陷引入的缺陷能级降低了辐射复合速率，降低了少子寿命，从而导致了光输出功率的降低。使用阈值前后数据线性拟合的两条曲线交点确定阈值电流并作归一化处理如图3所示。从图3中可见，在相同 DDD 下，即使质子的注量不同，但是阈值电流的损伤在两种能量下基本一致。结果表明：DDD 可以作为评估 VCSEL 在不同能量质子辐照下位移损伤的有效手段。

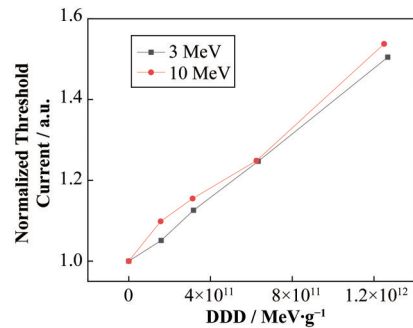


图3 3 MeV 和 10 MeV 辐照后 VCSEL 归一化阈值电流与 DDD 的关系

Fig.3 Relationship between normalized threshold current of VCSEL and DDD after 3 MeV and 10 MeV irradiation

Silvaco 作为半导体工艺和器件仿真软件 (Technology Computer Aided Design, TCAD)，会将仿真模型划分为区域网格，使用成熟的理论和模型作为基础，在格点处求解希望得到的特性，如：电学性质、光学性质等，可以作为工具从理论角度分析实际实验结果。本文结合 STEM 建立模型如图1所

示,随后引入辐射剂量模型,该模型可以模拟由于半导体中的高能粒子轰击引起的缺陷产生率,由具有特定辐照能量和种类的辐射剂量引起的总缺陷态密度( $N_T$ )由式(2)给出,通过计算引入缺陷的影响,并反应到器件特性上。

$$N_T = \alpha_D \cdot L_{NIE} \cdot \rho \cdot \phi \quad (2)$$

式中: $\alpha_D$ 为损伤因子; $\rho$ 为材料密度; $\phi$ 是总质子注量。调用该模型时使用 RADIATION 语句定义 FLUENCE、ENERGY、粒子种类和 NIEL 的大小。引入模型后获得的 3 MeV 质子辐照仿真结果与实验测试结果如图 4 所示。图 4 中器件的 L-I 曲线在 12 mA 处由于工作模式的切换导致曲线出现扭结,但是该仿真结果提取的阈值电流和斜率效率使用扭结前数据,且结果和测试结果对应得较为理想。从仿真结果与实际实验结果的 L-I 曲线提取的阈值电流随 DDD 变化如图 5 所示。此外,通过仿真可以获得等多的微观参数与质子辐射的关系,为进一步理解辐射损伤机理提供理论支持。

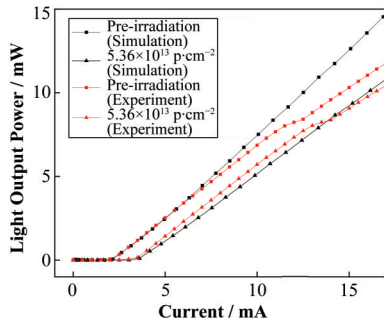


图 4 3 MeV 质子辐照后的 L-I 特性仿真结果与实验结果对比

Fig.4 Comparison between simulation and experimental results of L-I curve after 3 MeV proton irradiation

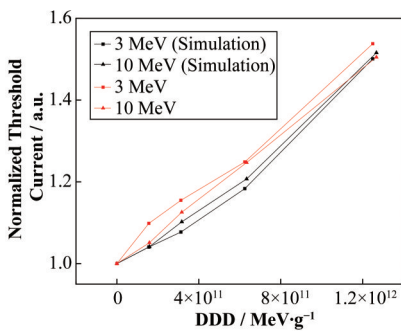


图 5 仿真与实验结果提取的归一化阈值电流对比

Fig.5 Comparison of normalized threshold current extracted from simulation and experimental results

## 2.2 VCSEL 退化分析

由于辐射剂量模型是计算材料中的缺陷产生率,我们首先使用 Silvaco 自带的探测尺工具提取了 VCSEL 注入电流为 23 mA 时中间量子阱的陷阱密

度以及电离的施主和受主密度,结果如图 6 所示。由图 6 可见,3 MeV 和 10 MeV 质子在相同 DDD 下产生的缺陷密度基本一致。此外,只有部分缺陷电离且受主电离密度比施主高,陷阱浓度、施主和受主浓度与 DDD 呈现线性关系<sup>[13]</sup>。陷阱中心位于禁带中,通过电子的发射和俘获与导带和价带交换电荷。缺陷中心影响半导体中空间电荷的密度和复合统计。从而影响辐射复合模型和光子速率方程,导致 VCSEL 输出特性产生退化。

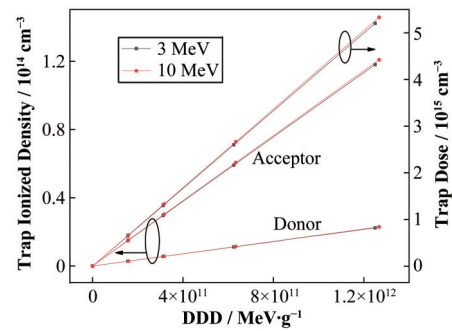


图 6 Silvaco 中提取的陷阱密度,施主和受主电离密度随 DDD 的变化

Fig.6 Variation of trap dose, donor and acceptor ionized density with DDD extracted from Silvaco

在 DBR 部分,图 7 为 VCSEL 镜面损失随质子注量变化图,而镜面损失的计算公式如下:

$$\alpha_{\text{mir}} = \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_f R_r} \right) \quad (3)$$

式中: $\alpha_{\text{mir}}$ 为镜面损失; $L$ 为谐振腔腔长; $R_f$ 和 $R_r$ 分别为前后镜面反射率。作为 $R_f$ 和 $R_r$ 的对数函数,质子辐射引起镜面反射率的退化就会导致 $\alpha_{\text{mir}}$ 的显著增大。而镜面损失增加会降低光子寿命,因此质子辐射对 DBR 部分反射率的影响成为降低 VCSEL 输出特性的部分原因。

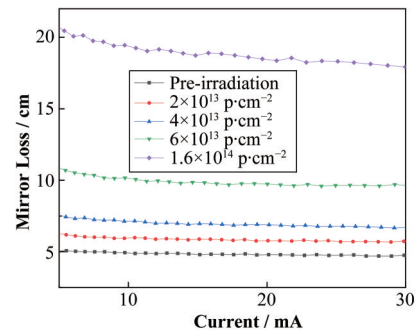


图 7 10 MeV 质子辐射后 VCSEL 镜面损失与质子注量关系

Fig.7 Relationship between VCSEL mirror loss and proton fluence after 10 MeV proton irradiation

在激光产生的必要条件中,除了 DBR 外,增益介质(有源区部分)同样会影响激光输出特性。VCSEL 中,电子数反转后辐射复合产生光子,而辐

射复合速率直接影响产生的光子数,图8为复合速率和辐射复合速率与DDD的关系。受激光辐射引起的载流子复合建模如下:

$$R_{st}(r,z) = \sum_m \frac{c}{N_{\text{eff}}} g_m(r,z) \cdot |E_m(r,z)|^2 \cdot S_m \quad (4)$$

式中: $R_{st}$ 为复合速率; $N_{\text{eff}}$ 为有效折射率; $g$ 为增益; $S_m$ 为光子数密度; $E$ 为光电场; $m$ 指模式量。从图8中可见,随着DDD的增大,复合速率和辐射复合速率均会降低,且辐射复合速率受质子辐射影响更为严重。辐射复合速率的降低一方面降低了产生的光子数,降低光输出功率,另一方面,辐射复合速率的降低意味着非辐射复合的增加,非辐射复合的能量会以热能释放到器件中,表现为器件结温的增加,而VCSEL作为对温度比较敏感的器件,过高的结温同样会降低光输出功率。

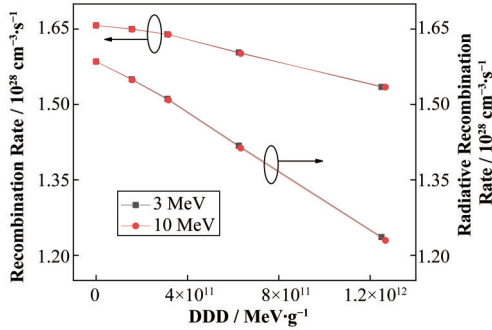


图8 量子阱处复合速率和辐射复合速率随DDD的变化

Fig.8 Variation of recombination rate and radiative recombination rate at quantum well with DDD

在有源区部分, Silvaco 求解的光子速率方程如下:

$$\frac{dS_m}{dt} = \left( \frac{c}{N_{\text{eff}}} G_m - \frac{1}{\tau_{\text{phm}}} - \frac{c \cdot \alpha_e}{N_{\text{eff}}} \right) S_m + R_{\text{spm}} \quad (5)$$

式中: $G_m$ 为模增益; $1/\tau_{\text{phm}}$ 为光子寿命; $\alpha_e$ 为任何额外的激光损耗(默认值为0); $R_{\text{spm}}$ 为自发发射速率。图9为两种能量质子的 $S_m$ 随位移损伤剂量变化图,从图9中可见,引入质子辐射后, $S_m$ 逐渐降低。因此,VCSEL输出特性的退化是辐射后由于位移损伤导致谐振腔反射率,有源区辐射复合速率等参数降低的综合结果。仿真结果在验证和分析实验结果的同时也可以从工艺角度对VCSEL的抗辐射加固提供设计思路。

### 3 结语

本文研究了相同DDD下3 MeV和10 MeV质子辐照引起VCSEL的性能退化。结果表明:在相同DDD下,两种能量质子辐射产生的退化基本一致。此外,还根据STEM结果在Silvaco中建立了对应的

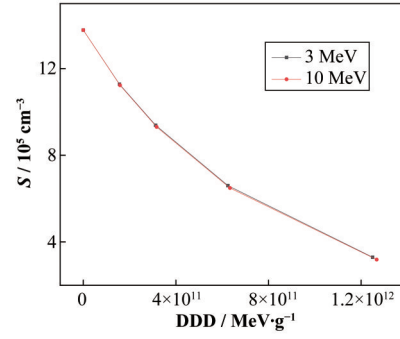


图9 光子速率方程中光子数与DDD的关系

Fig.9 Relationship between photon number in photon rate equation and DDD

模型,在引入辐射剂量模型后,从仿真中发现了辐射后陷阱浓度增加、DBR反射率下降、有源区辐射复合速率降低和光子数降低等结果。因此,质子辐射引入的位移损伤对DBR和有源区均有影响,反射率和光子数的降低最终导致了器件L-I特性的退化。该仿真与实验结果一致,模型具有较高的可信度。此外,通过仿真还深入分析了VCSEL质子辐射后退化的微观机理。以上实验及仿真结果对VCSEL的辐射效应评估实验和空间辐射环境下的实际应用具有重要意义。

**作者贡献声明** 陈加伟:论文初稿的写作与稿件的修改;李豫东:参与实验设计和试验结果分析;玛丽娅·黑尼:实验设计者和实验研究的执行人;郭旗:指导实验设计、数据分析、论文写作与修改;刘希言:提供理论支持和实验结果分析。

### 参考文献

- 1 Soda H, Iga K I, Kitahara C, *et al.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, **18**(12): 2329 - 2330. DOI: 10.1143/jjap.18.2329.
- 2 Larsson A. Advances in VCSELs for communication and sensing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, **17**(6): 1552 - 1567. DOI: 10.1109/JSTQE.2011.2119469.
- 3 Koyama F. Recent advances of VCSEL photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, **24**(12): 4502 - 4513. DOI: 10.1109/JLT.2006.886064.
- 4 Haghghi N, Moser P, Lott J A. Power, bandwidth, and efficiency of single VCSELs and small VCSEL arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, **25**(6): 1 - 15. DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2922843.
- 5 赵梓森. 光纤通信的过去、现在和未来[J]. 光学学报, 2011, **31**(9): 99 - 101.

- ZHAO Zisen. Past, present and future of optical fiber communications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 99 - 101.
- 6 何舟, 梅君瑶, 王传彪, 等. 一种基于时间透镜的 10 Gb/s 无色散补偿高速光纤通信系统[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 144 - 149.
- HE Zhou, MEI Junyao, WANG Chuanbiao, *et al.* A 10 Gb/s high-speed optical communication system without dispersion compensation based on time lens[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(1): 144 - 149.
- 7 侯睿, 赵尚弘, 么周石, 等. 空间辐射环境对卫星光通信系统误码率的影响[J]. *激光与红外*, 2012, **42**(9): 1021 - 1025.
- HOU Rui, ZHAO Shanghong, YAO Zhoushi, *et al.* Research on the influence of space radiation environment on the BER of optical satellite communication system[J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(9): 1021 - 1025.
- 8 刘韵, 赵尚弘, 杨生胜, 等. 半导体激光器空间辐射应力加速寿命实验模型[J]. *中国激光*, 2014, **41**(5): 7 - 12.
- LIU Yun, ZHAO Shanghong, YANG Shengsheng, *et al.* Accelerated life testing model of laser diodes under space radiation stress[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(5): 7 - 12.
- 9 Lei F, Truscott R R, Dyer C S, *et al.* MULASSIS: a Geant4-based multilayered shielding simulation tool[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, **49**(6): 2788 - 2793. DOI: 10.1109/TNS.2002.805351.
- 10 Jabbour J, Zazoui M, Sun G C, *et al.* Radiation resistance of GaAs-GaAlAs vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **97**(4): 043517. DOI: 10.1063/1.1850619.
- 11 Paxton A H, Carson R F, Schone H, *et al.* Damage from proton irradiation of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, **44**(6): 1893 - 1897. DOI: 10.1109/23.658958.
- 12 Troska J, Detraz S, El Nasr-Storey S S, *et al.* Radiation damage studies of lasers and photodiodes for use in multi-Gb/s optical data links[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, **58**(6): 3103 - 3110. DOI: 10.1109/TNS.2011.2172633.
- 13 Aierken A, Guo Q, Huhtio T, *et al.* Optical properties of electron beam and  $\Gamma$ [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2013, **83**: 42 - 47. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2012.09.022.
- 14 Shan X T, Li B, Zhao F Z, *et al.* Radiation effects of heavy ions on the static and dynamic characteristics of 850 nm high-speed vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Journal of Luminescence*, 2021, **237**: 118136. DOI: 10.1016/j.jlumin.2021.118136.
- 15 Jiang M, Gong H F, Xiao H Y, *et al.* Effects of temperature and energy on the radiation response of GaAs/AlAs and GaAs/AlGaAs superlattices[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, **174**: 108983. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2020.108983.
- 16 路伟, 王同权, 王兴功, 等. 基于 Geant4 模拟质子在半导体 Si 材料中的 NIEL 值 [J]. *核技术*, 2011, **34**(7): 529 - 531.
- LU Wei, WANG Tongquan, WANG Xinggong, *et al.* Simulation of proton NIEL in silicon by using Geant4[J]. *Nuclear Techniques*, 2011, **34**(7): 529 - 531.
- 17 Beringer J, Borer K, Mommsen R K, *et al.* Radiation hardness and lifetime studies of LEDs and VCSELs for the optical readout of the ATLAS SCT[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1999, **435**(3): 375 - 392. DOI: 10.1016/S0168-9002(99)00570-7.
- 18 Kalavagunta A, Choi B, Neifeld M A, *et al.* Effects of 2 MeV proton irradiation on operating wavelength and leakage current of vertical cavity surface emitting lasers [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, **50**(6): 1982 - 1990. DOI: 10.1109/TNS.2003.821819.