

光控双向静电防护器件的建模分析与验证

严峰, 汪洋, 钟泽宇, 金湘亮*

湖南师范大学物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410081

摘要 利用光生伏特效应设计一种新型的光控双向栅极可控硅晶闸管(LDGSCR)防护器件,研究光照对静电放电(ESD)维持窗口的调控作用。使用光生电流来模拟光照控制 ESD 设计窗口的物理效应,实现一种光控器件的可控硅晶闸管(SCR)宏观模型。在 1.5 V 的电压模拟光照下,该模型的维持电流相比无光条件增加 35 mA,表明使用光照来调整 ESD 的维持窗口可以降低被保护电路发生闩锁的风险。采用 0.18 μm BCD 工艺制造 LDGSCR 器件并进行测试,测试结果与模型仿真结果之间的最大误差仅为 0.09 V 和 0.004 A。验证表明,该宏观模型可以消除传统耦合晶体管电路模型中存在的收敛性问题,极大减少开发光控 SCR 器件新型结构所需的时间和精力。

关键词 光电子学; 光控器件; 静电放电防护器件; 光电流; 维持窗口; 紧凑宏观模型

中图分类号 O475

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1125001

Modeling Analysis and Verification of Light-Controlled Dual-Directional Electrostatic Protection Devices

Yan Feng, Wang Yang, Zhong Zeyu, Jin Xiangliang*

School of Physics and Electronics, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China

Abstract A new type of light-controlled dual-directional gate silicon controlled rectifier (LDGSCR) protection device is designed by using the photovoltaic effect, and the regulation and control effect of light on the maintenance window of electrostatic discharge (ESD) is studied. The photo-generated current is used to simulate the physical effects of the light control ESD design window, and a macroscopic model of the silicon controlled rectifier (SCR) of the light control device is realized. Under the simulated illumination of 1.5 V voltage, the holding current of this model is increased by 35 mA compared to the no-light condition, indicating that the use of light to adjust the ESD maintenance window can reduce the risk of latch-up of the protected circuit. The LDGSCR device is fabricated and tested using a 0.18 μm BCD process. The maximum error between the test result and the model simulation result is only 0.09 V and 0.004 A. The verification shows that the macro model can eliminate the convergence problems existing in the traditional coupled transistor circuit model, and greatly reduce the time and effort required to develop a new structure of light-controlled SCR devices.

Key words optoelectronics; light-controlled device; electrostatic discharge protection device; photocurrent; holding window; compact macro model

OCIS codes 250.1345; 040.5160; 040.6040

1 引言

针对具体场景设计的传统静电防护器件在电场

的单一控制条件下,其性能以及静电放电(ESD)的设计窗口均被固定,所以仅适用于特定的功能电路^[1-2]。静电防护器件在不同的控制条件下(光波和

收稿日期: 2020-11-19; 修回日期: 2020-12-12; 录用日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61827812)、湖湘高层次人才集聚项目(2019RS1037)、湖南省科技厅项目(2020GK2018, 2019GK4016, 2020RC1003)

* E-mail: jinxl@hunnu.edu.cn

磁场)可多场景使用^[3-4],这对提高电路的利用率和减少器件的开发时间具有重要意义。Temple^[5]利用半导体的光敏工作特性实现了一种可控硅晶闸管(SCR)结构,为光照调控 SCR 的设计窗口以应用不同场所提供了参考。在 ESD 的设计窗口中,窄的维持窗口会使 SCR 在触发后仍能保持导通状态,但会造成被保护电路一直处于闩锁(LU)的风险^[6-7]。因此,需要设计一种新型的光照调控器件对维持窗口进行灵活调控以消除这种风险。

ESD 防护器件通常是使用计算机辅助设计(TCAD)或者实验来模拟设计得到的,上述方法不仅需要耗费大量的时间,而且很难将 ESD 保护单元和受保护的核心电路都包含在 TCAD 仿真模拟中^[8]。与器件仿真和迭代实验相比,静电防护设计的工程师更喜欢在电路仿真器中采用紧凑模型,从而可以更快地预测整个芯片的 ESD 保护级别,并对 ESD 和功能电路进行融合设计^[9]。大多数的设计工具中不包含在高电压和大电流条件下工作的 SCR 器件标准模型,常规电路模型中也未涵盖静电失效机制。据报道,Azais 等^[10]使用基础器件开发了一个宏观模型,但是这一模型需要添加额外的辅助电流和电压源才能正确描述 SCR 中的击穿行为,这种方法在硬编码技术改变的情况下缺乏灵活性。Zhou 等^[11-12]提出将一个传统的 BJT (Bipolar

Junction Transistor)模型作为 SCR 紧凑模型的主干,但该模型存在传统晶体管仿真不收敛的问题,并且不适用于光控人体应力模式(HBM)下防护电路的模型仿真。鉴于不同使用场景下静电防护器件重要性的日益增加,因此在 HBM 下对光控静电防护器件正确构建 SCR 非常重要。

根据先前的解决方案和存在的问题,本文设计一种光照调控维持窗口的双向栅极可控硅晶闸管(LDGSCR),并基于 LDGSCR 建立新型光控器件的紧凑 SCR 模型。使用 Verilog 语句所构建的元件来模拟雪崩击穿出现的回滞现象。相比于文献[11-12]的传统晶体管模型,所建立的 LDGSCR 器件可以解决由双极性晶体管带来的收敛性问题。本文以 LDGSCR 器件来说明宏观模型的开发,其中的建模方法同样适用于其他光控 SCR 器件。

2 LDGSCR 器件的工作原理

光控双向栅极 SCR 器件的三维结构如图 1 所示。器件的阴极和阳极均由高掺杂的 P⁺ 注入区、N⁺ 注入区和多晶硅栅连接。浮动的高掺杂 P⁺ 注入区被浅槽隔离(STI)包围并与 P 型掺杂的阱(P-well)接触,中间未连接电位的 N⁺ 被 N 型掺杂的阱(N-well)围绕。建立在 P 型衬底(P-sub)上的深 N 型阱(DN-well)将 P-well 和 N-well 包裹在内。

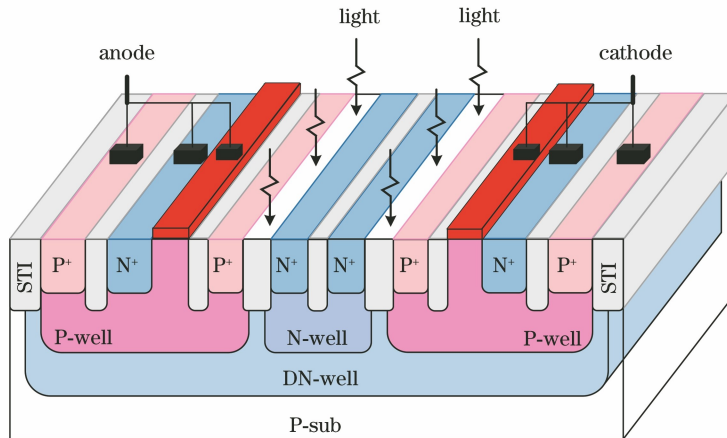


图 1 LDGSCR 器件的三维结构

Fig. 1 Three-dimensional structure of LDGSCR device

器件的光控功能通过在 P-well 和 DN-well 所形成的 PN 结上施加光照来实现。在正常工作的情况下,P-well 和 DN-well 结既可以作为 LDGSCR 器件的触发面,又可以作为光电二极管。光子透过 STI 后垂直入射在反偏状态下的 PN 结上,其工作状态类似于单光子雪崩光电二极管(SPAD)^[13]。在

光的照射下,LDGSCR 器件在 P-well 和 DN-well 结处的雪崩工作状态如图 2 所示。在光的照射下, DN-well 端产生少数空穴,P-well 端产生少数电子,在内建电场的作用下,被激发的空穴(空心圆)向 P-well 端运动,电子(实心圆)向 DN-well 端运动,从而使 P 端的电势升高,N 端的电势降低,并在 PN 结

两侧积累正反电荷以形成光生电压。同时空穴向 P 端运动,光生电场由 P 端指向 N 端,在 P-well 和 DN-well 结的内部形成从左至右的光生电流 I_L 。

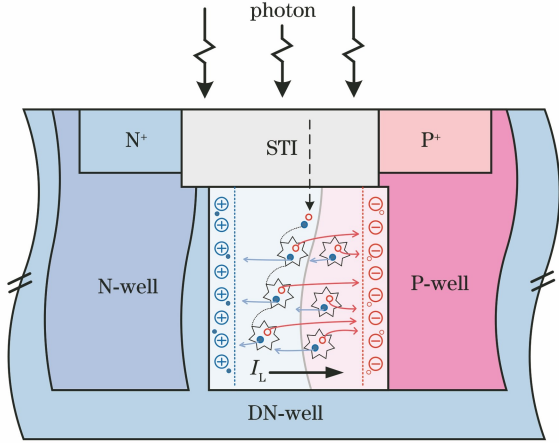


图 2 光照下器件的雪崩工作状态

Fig. 2 Avalanche operating condition of device under light

假设在耗尽区内 x 处,电子触发雪崩的概率为 $P_e(x)$,空穴触发雪崩的概率为 $P_h(x)$ 。通过分析可知, $P_e(x)$ 和 $P_h(x)$ 满足

$$\frac{\partial P_e(x)}{\partial x} = [1 - P_e(x)]\alpha_e(x) \times [P_e(x) + P_h(x) - P_e(x)P_h(x)], \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_h(x)}{\partial x} = -[1 - P_h(x)]\alpha_h(x) \times [P_e(x) + P_h(x) - P_e(x)P_h(x)], \quad (2)$$

式中: $\alpha_e(x)$ 和 $\alpha_h(x)$ 分别为由电子和空穴在单位距离内传播的平均电荷数,其仅取决于局部电场。因此, x 处产生的电子空穴对触发雪崩击穿的联合概率 $P_{ch}(x)$ 为

$$P_{ch}(x) = P_e(x) + P_h(x) - P_e(x)P_h(x). \quad (3)$$

雪崩击穿的概率是关于过偏置电压 $V_e(x)$ 的函数值,当 $V_e(x)$ 值增大时,耗尽层中的电场强度增大,任意位置 x 处的 $P_e(x)$ 、 $P_h(x)$ 和 $P_{ch}(x)$ 值也随之增大。当场强达到一定程度时,耗尽层中的光生电子-空穴对会被电场加速而获得巨大动能,并与晶格发生碰撞以产生新的二次电离光生电子-空穴对,这一过程反复进行会导致 LDGSCR 器件中产生光生雪崩倍增效应。

施加在阳极端口的电压不足以使器件开启的情况下,此时过偏置电压 $V_e(x)$ 处于一定量级,所以光子能量有效作用在阴极侧的反偏 P-well 和 DN-well 结处。由于光子的激发,反偏 PN 结势垒区中所产生的电子和空穴会被电场分开。在形成的光电流路

径中,空穴被拉向寄生 NPN(DN-well/P-well/阴极 N^+)晶体管的 P-well 基区,电子被拉向 PNP(阳极 P-well/DN-well/阴极 P-well)晶体管的 DN-well 基区,并分别成为两个晶体管的基区注入电流。

当 TLP 产生静电时,更大的电压施加在器件的阳极上,则光生电流 I_L 在 SCR 内部依靠晶体管效应而得到放大,导致 P-well 和 DN-well 结中的电流增加并产生雪崩击穿效应^[14]。LDGSCR 器件的等效电路如图 3 所示,其中光电二极管与 NPN(Q 1 和 Q 3)晶体管并联, R 为电阻。大量的雪崩载流子在阴极 P-well 的寄生电阻上产生电压降,导致寄生晶体管 NPN(Q 3)导通。同时,寄生 PNP(Q 2)被打开形成正反馈环路,使得 LDGSCR 器件从正向阻断状态转换到正向导通状态,从而释放 ESD 电流应力。器件正反馈的电流放电路径由阳极 P-well、DN-well、阴极 P-well 和阴极 N^+ 组成,即图 3 虚线所描述的 PNP 路径。

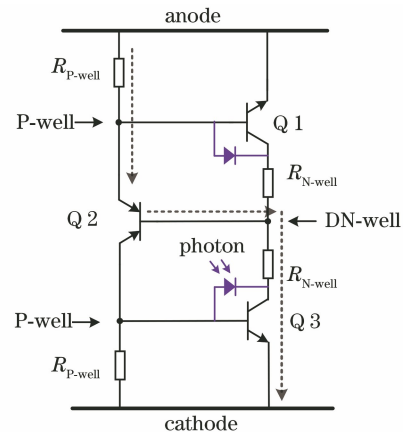


图 3 光控 SCR 器件的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of photocontrolled SCR device

器件中的浮动 N^+ 注入区使得 Q 2 基极浓度增加,这会引导正反馈电流放电路径的形成。栅极结构调节载流子的运动并促进 PNP 路径的电流放电。LDGSCR 器件的双向对称结构使得反向导通路径与正向导通路径相同。光照下器件导通后,光生电流 I_L 会聚到本征 PNP 路径中,从而组成 LDGSCR 器件的正反馈 ESD 泄放电流,起到调控设计窗口的作用。

3 LDGSCR 宏观模型

为了准确模拟光控 SCR 器件在 HBM 下的物理行为,首先需要建立无光双向栅极器件的紧凑模型,如图 4 所示,其中 R_1 和 R_2 分别为二极管 D 1 和 D 2 的串联电阻,BE 为基级-发射级结,BC 为基

级-集电级结, I_{BC} 为流过电路元件 R 的电流, V_{BC} 为流过电路元件 R 的电压, f 为流过元件 R 的电流与电压存在函数关系。ESD 的触发面(Q 2 和 Q 3 的共享基极-集电极结)被电路元件 R 代替, 通过 Verilog 语言进行设计并以电流作为自变量, 该电路元件实现了 SCR 的触发和保持行为。元件 R 的作用可以利用三个线性函数来解释, 具体情况在图 4 的虚线框内予以说明。采用直接的方式从被保护电路所使用的相同 SCR 结构中提取相关参数, 包括触发电压(V_{t1})、触发电流(I_{t1})、维持电压(V_h)、维持电流(I_h)和导通电阻(R_{on})。考虑到器件是一个完全对称的双向结构, 可以合理地认为电阻 $R_1 \approx R_2$, 并且正反向的电流泄放路径都与宏模型中从阳极到阴极的等效路径相同。

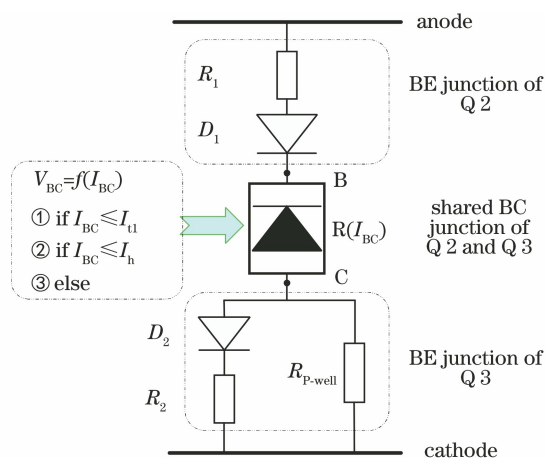


图 4 无光双向栅极器件的 SCR 宏观模型
Fig. 4 SCR macro model of aphrodite bidirectional gate device

在宏观模型中, 触发电压由 R 元件控制, 维持电压由 D 1 和 D 2 共同确定。通常, R_{p-well} 远大于 R_2 , 因此在器件导通的情况下, 电阻 $R_{on} \approx R_1 + R_2$ 。使用平滑函数可以确保模型元素的导数是连续的^[15], 参数 R_{th} 可以用于控制从 V_{t1} 到 V_h 过渡的斜率, 这有助于模型的收敛。在无光双向栅极 SCR 宏观模型的阳极上施加电流后, 通过直流扫描的方式来模拟 HBM 下的传输线脉冲(TLP)响应, 响应曲线如图 5 所示。从图 5 可以看到, 模型具有良好的回滞特性, 而且同时兼顾了导数的连续性。

当光子入射到 LDGSCR 器件的反偏 P-well 和 DN-well 结时, 入射光的能量大于半导体材料的禁带宽度, 所以价带顶端的电子被入射光激发跃迁至导带底部, 从而留下价带中的空穴, 电子和空穴成对后便形成了光电流。LDGSCR 器件最终的宏观模型如图 6 所示, 使用被标记为 P 的元件来模拟光子

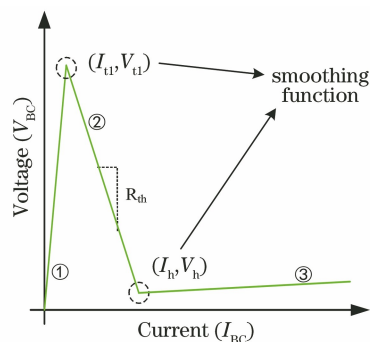


图 5 SCR 宏模型在 HBM 下的 TLP 响应曲线
Fig. 5 TLP response curve of SCR macro model under HBM

在器件内产生的光生电流 I_L , 并以电压和电流的关系来描述 LDGSCR 器件的光电特性^[16]。在元件 P 中, 使用 NMOS(N-Metal-Oxide-Semiconductor)来模拟器件的雪崩触发开关, photon 代表光子的入射端口, V_B 为器件的雪崩击穿电压, R_D 为内电阻。使光照所产生的光生电流叠加在 LDGSCR 器件的 PNP 电流路径上, 同时光生电流在 Q 2 和 Q 3 的共享基极-集电极结上产生, 因此将光电二极管模型并联在电路元件 R 两端是准确可行的。

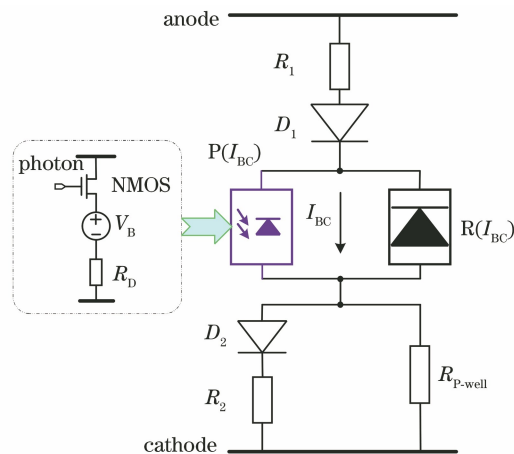


图 6 LDGSCR 器件的紧凑宏观模型
Fig. 6 Compact macroscopic model of LDGSCR device

SCR 模型的阳极电压在达到器件的击穿电压(BV)前, 施加的大部分电压会在触发电路的两端(即节点 B 和节点 C 之间)。一旦光子进入 PN 结中触发雪崩后, 则 SCR 泄放路径导通, 此时电压则主要在 D 1、D 2、R 1 和 R 2 的两端。在光电二极管模型中施加一个 1.5 V 的电压来模拟定量的光子入射, 其可以触发开关闭合, 从而形成通路。元件 P 的光生电流在几个皮秒时间内会迅速增长到一个电流峰值, 与触发元件 R 一起形成 LDGSCR 器件中的 ESD 泄放电流并流过节点 C, 这会导致 SCR 宏

观模型中维持电流的增加。LDGSCR 宏关模型模拟 TLP 响应在无光和有光下的对比曲线如图 7 所示。

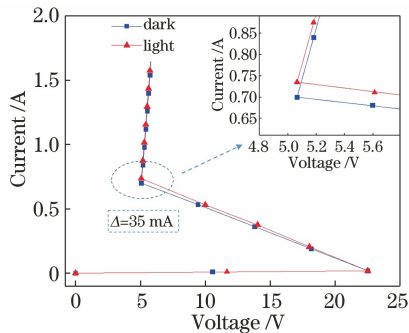


图 7 光控 SCR 模型在无光和有光条件下的 TLP 曲线
Fig. 7 TLP curves of photocontrolled SCR model with and without light

从图 7 可以看到,相较于无光条件,光照下维持电流有明显的提高并具有 35 mA 的增量。仿真结果表明,建立的 SCR 宏观模型能够模拟光照产生电流,并有效调整 ESD 的设计窗口。光子所激发的电流会导致器件导通后的维持电流增加,显著降低电路正常工作期间发生闩锁的危险。

4 实验验证

采用 $0.18 \mu\text{m}$ BCD(Bipolar, CMOS and DMOS) 工艺制造光控双向栅极 SCR 器件,用来验证光照下对 ESD 设计窗口的调整和建立 SCR 宏观模型的准确性。制作过程中无需特殊掩模或任何工艺参数的修改,因此提出的 LDGSCR 器件与标准 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor) 工艺兼容,该器件具有 $80 \mu\text{m}$ 的单指宽度和 8 叉指布局,版图结构如图 8 所示。

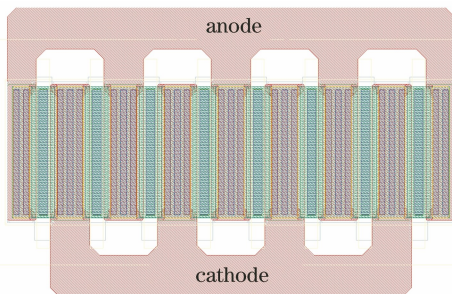


图 8 LDGSCR 器件的版图结构

Fig. 8 Layout structure of LDGSCR device

对 LDGSCR 器件进行封装后,使用 Thermo Scientific Celestron-I 传输线脉冲系统对其进行 ESD 特性测量,在 HBM 下测试待测器件(DUT)的触发电压、触发电流、维持电压和维持电流。TLP

测试系统向器件提供一个上升时间为 10 ns 和宽度为 100 ns 的电流脉冲,用来模拟 HBM 下波形相近的能量。施加的电流应力水平持续增加,直到测试器件发生失效。LDGSCR 器件在 $2 \times 10^4 \text{ lx}$ 的光照强度下,实测的 TLP 结果如图 9 所示。

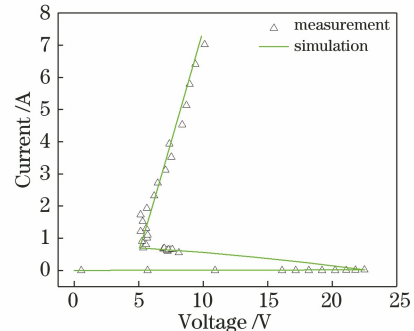


图 9 LDGSCR 器件的实测 TLP 曲线与模型仿真曲线
Fig. 9 Measured TLP curve and model simulation curve of LDGSCR device

从图 9 可以看到,测量结果(三角形)与模拟结果(实线)具有良好的吻合度;对于由 P-well 和 DN-well 触发形成的 V_{th} ,其仿真结果(22.51 V)与实测结果(22.48 V)的误差仅为 0.03 V; I_{th} 的仿真结果(0.0180 A)与实测结果(0.0179 A)的误差仅为 0.0001 A;对于 PNP 路径形成的 V_{h} ,其仿真结果(5.06 V)与实测结果(5.15 V)的误差仅为 0.09 V;对于光照下器件的 I_{h} ,其仿真结果(0.735 A)与实测结果(0.731 A)的误差仅为 0.004 A。结果表明,光控双向栅极器件的紧凑 SCR 模型能够有效模拟 HBM 下的行为,进一步验证光控调整双向静电防护器件设计窗口的可行性,特别是维持电流的提高。

5 结 论

研究一种新型的光控双向栅极 SCR 防护器件,在 P-well 和 DN-well 结处施加光照后产生光生电流,可以实现对器件维持窗口的调控。根据 LDGSCR 器件的基本原理,使用 Verilog 语句来构建元件以模拟雪崩击穿所出现的回滞现象,在无光宏观模型中加入元件来模拟光照产生光生电流的过程,从而建立模拟 HBM 下的新型光控 SCR 器件宏观模型。加入平滑函数和 R_{th} 参数的 LDGSCR 紧凑宏观模型,可以解决由双极性晶体管带来的收敛性问题。基于 DBH $0.18 \mu\text{m}$ BCD 工艺制造的 8 叉指 LDGSCR 器件,在 TLP 模型仿真和实际测量之间可以取得良好的一致性,表明 SCR 宏观模型的正确性和光控调整 ESD 窗口的可行性。光照提高

了维持电流,减少了静电防护器件的LU危险。这些光控ESD器件的电路分析和建模,为新型光控器件结构的开发和调整ESD设计窗口提供了研究方向。

参 考 文 献

- [1] Voldman S. ESD: circuits and devices [M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2006: 15-56.
- [2] Chen X J, Wang Y, Jin X L, et al. An ESD robust high holding voltage dual-direction SCR with symmetrical I-V curve by inserting a floating P⁺ in PWell [J]. Solid-State Electronics, 2019, 160: 107627.
- [3] Liu X F, Peng L P, Zhao Y A, et al. Research progress on near-infrared high-power laser damage of liquid crystal optical devices [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0100002.
刘晓凤, 彭丽萍, 赵元安, 等. 液晶光学器件的近红外激光损伤研究进展 [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0100002.
- [4] Han X Y, Pang F F, Cai H W, et al. An integrated optical device-waveguide ring resonator [J]. Laser & Optronics Progress, 2004, 41(8): 26-31.
韩秀友, 庞拂飞, 蔡海文, 等. 环形波导谐振腔集成光学器件 [J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(8): 26-31.
- [5] Temple V A K. Comparison of light triggered and electrically triggered thyristor turn-on [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1981, 28(7): 860-865.
- [6] Hsu S, Ker M. Dependence of device structures on latchup immunity in a high-voltage 40-V CMOS process with drain-extended MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2007, 54(4): 840-851.
- [7] Mergens M P J, Russ C C, Verhaege K G, et al. High holding current SCRs (HHI-SCR) for ESD protection and latch-up immune IC operation [J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(7): 993-1000.
- [8] Liu Y, Gao Y J. Physical-level modeling and simulation of second breakdown in deep submicron GGNMOS under ESD conditions [J]. Microelectronics, 2015, 45(6): 804-808.
- [9] Wang H, Yuan Z B, Tan M, et al. Effect of multiplication layer thickness on device properties of In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP avalanche photodiode [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1804001.
王航, 袁正兵, 谭明, 等. 倍增层厚度对 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 雪崩二极管器件特性的影响 [J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1804001.
- [10] Azais F, Caillard B, Dournelle S, et al. A new multi-finger SCR-based structure for efficient on-chip ESD protection [J]. Microelectronics Reliability, 2005, 45(2): 233-243.
- [11] Zhou Y Z, Hajjar J J, Lisiak K. Compact modeling of on-chip ESD protection using standard MOS and BJT models [C] // 2006 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings, October 23-26, 2006, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2006: 1202-1205.
- [12] Zhou Y Z, Hajjar J J, Richter A W, et al. Modeling snapback of LVTSCR devices for ESD circuit simulation using advanced BJT and MOS models [C] // 2007 29th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium (EOS/ESD), September 16-21, 2007, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2007: 9793801.
- [13] Wang Y, Jin X L, Cao S G, et al. Design and measurement of ring-gate single photon avalanche diode with low dark count rate [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 6801711.
- [14] Shashkina A S, Hanin S D. Simulation approach to modeling of the avalanche breakdown of a P-N junction [J]. Semiconductors, 2019, 53(6): 838-843.
- [15] Juliano A. Measurement, modeling, and simulation of fast transients in ESD devices [D]. Illinois: University of Illinois Urbana-Champaign, 2001: 53-80.
- [16] Dalla Mora A, Tosi A, Tisa S, et al. Single-photon avalanche diode model for circuit simulations [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(23): 1922-1924.