

高频硅基光电晶体管 SPICE 模型的建立及 关键参数的提取

张子同, 姜岩峰

(江南大学物联网工程学院, 江苏无锡 214000)

摘要: 硅基光电晶体管在高频通信、自动控制、电力系统领域具有广泛的应用前景. 从系统验证和仿真的角度, 迫切需要建立光电晶体管的等效电路模型, 该模型需要包含电学特性和光学特性. 本文提出了一种高频(100MHz~1GHz)硅基光电晶体管的 SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)等效模型, 包含器件的主要光电特性, 通过 TCAD(Technology Computer Aided Design)仿真建立了模型中关键电学和光学参数的提取方法. 基于所建立的高频光电晶体管的 SPICE 模型等效电路进行仿真, 所得到的仿真结果能够完整描述光电晶体管的电学特性和光学特性, 并验证了模型在器件模拟与电路应用上的可行性, 表明本文所提出的 SPICE 模型和参数提取方法, 对于基于高频光电晶体管的系统仿真, 具有参考价值.

关键词: 光电晶体管; 参数提取; SPICE 模型; 高频; TCAD 模型

中图分类号: TN364

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2021)08-1645-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200657

The Establishment of High-Frequency Silicon-Based Phototransistor SPICE Model and the Extraction of Key Parameters

ZHANG Zi-tong, JIANG Yan-feng

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: Silicon-based phototransistors have broad application prospects in the fields of high-frequency communication, automatic control, and power systems. From the perspective of system verification and simulation, there is an urgent need to establish an equivalent circuit model of phototransistors, which needs to include electrical and optical characteristics. This paper proposes a SPICE equivalent model of high-frequency(100MHz~1GHz) silicon-based phototransistors, including the main photoelectric characteristics of the device, and the extraction method of key electrical and optical parameters in the model is established by TCAD simulation. Based on the established SPICE model equivalent circuit of the high-frequency phototransistor, the simulation results can fully describe the electrical and optical characteristics of the phototransistor, it shows that the SPICE model and parameter extraction method proposed in this paper have reference value for system simulation based on high-frequency phototransistor.

Key words: phototransistor; parameter extraction; SPICE model; high frequency; TCAD model

1 引言

近年来, 光电器件在高频通信、自动控制、电气隔离以及开关电源等领域中有着广泛的应用^[1-5]. 如文献[1]中介绍了光纤通信中光电器件作为信号收发器的应用; 文献[2~4]中介绍了光电耦合器因其优良的抗干扰能力在隔离以及自动控制方面的应用; 文献[5]中则介绍了一种用于驱动 MEMS 开关的光电耦合器输出电路, 可以有效地

消除电压升压转换时产生的纹波. 这些应用使光电器件越来越多地出现在集成电路设计与仿真之中. 由于光电器件在高频通信方面的应用, 其频率响应也成了研究中关注的要点^[6-8]. 文献[6,7]中报告的硅基光电器件, 频率分别可达 7.8MHz~229MHz、8.4GHz; 而相同工艺节点下, 异质结型光电器件的频率响应更为可观, 如文献[8]中所提到的 SiGe/Si 光电晶体管, 频率可达 4.1GHz~6GHz. 本文所探讨的硅基光电晶体管频率为 100MHz~1GHz.

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2021-03-12; 责任编辑: 王天慧

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61774078, No. 51802124); 江苏省自然科学基金(No. BK 20180626)

光电晶体管作为主要的光电耦合电路的接收器件,具有高耐压、高速响应的特性,同时具有电流放大的功能,在新一代光电系统中发挥着非常重要的作用.因此,从系统级设计需求出发,在进行系统级验证与仿真工作中,需要一种能够反映光电晶体管光学特性、电学特性及高频特性的 SPICE 等效模型.

近年来,关于光电器件的建模工作,主要集中在光电二极管方面^[9-11].如文献[9]探讨了一维模型中对于 I-V 特性与频率的响应;文献[10]探讨了二维雪崩二极管迭代模型;文献[11]探讨了三维模型中电流分布的状况.目前光电二极管的 SPICE 模型已经发展得比较成熟.然而,高频光电晶体管的 SPICE 模型仍处于探讨阶段^[12,13].如文献[12]中建立了一种描述光耦噪声特性的低频 SPICE 模型;而文献[13]中则提出了一种描述光耦电热特性的 SPICE 模型.已经发表的文献大部分都只关注于光电器件的电学特性,而忽略了对于光学特性的研究.在建立光电晶体管 SPICE 模型的工作中,如何完整地描述器件的光学响应特性和电学特性,成为模型建立工作的关键.

针对以上问题,本文提出了一种硅基光电晶体管高频 SPICE 模型的建立及其关键参数提取的方法.首先,根据光电晶体管的光学响应特性和电学特性,确定了相应的等效 SPICE 模型;其次,利用 TCAD 软件建模并仿真光电特性,根据响应结果提取了模型中的关键参数;最后,将所提取的关键参数代入所建立的 SPICE 模型中,从而建立了完整的高频光电晶体管电路等效模型.依据以上方法建立的 SPICE 模型,同时包含光电晶体管的光学特性和电学特性.所建立的模型及参数能够比较准确地反映出器件的光电特性.在下文中,详细介绍了这一流程.

2 硅基光电晶体管模型的建立

硅基光电晶体管的基本结构如图 1 所示,其中 b-c 结为受光结,入射光照射到 b-c 结,由于基区面积较大,当光入射到基极表面,产生光生电子-空穴对,在 b-c 结电场作用下,电子向集电极漂移,而空穴移向基极,致使基极电位升高.在 c、e 间外加电压作用下(c 为+,e 为-)电子由发射极注入,除少数在基极与空穴复合外,大量通过极薄的基极被集电极收集,成为输出光电流.可以看出,硅基光电晶体管具有高的响应度(即输出电流与入射光功率比),并具有放大功能^[14].

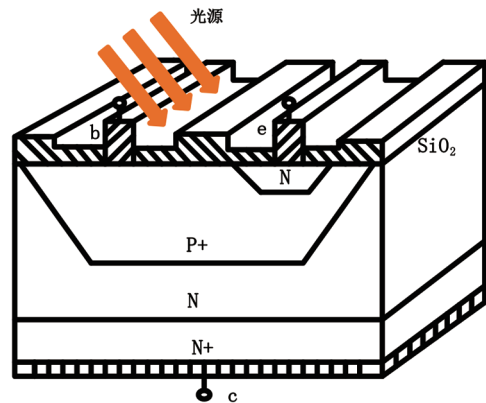
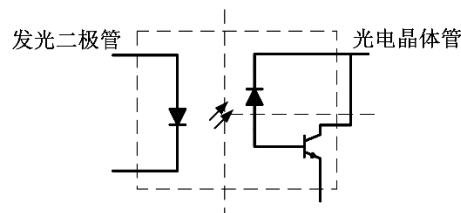
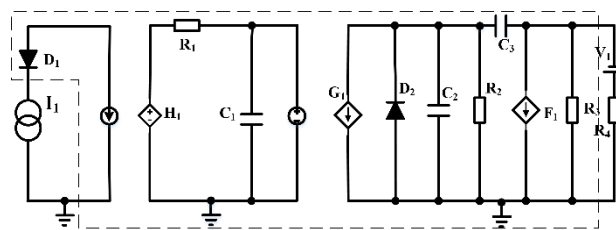


图1 硅基光电晶体管结构示意图

根据以上关于硅基光电晶体管工作原理的分析,本文提出了等效的 SPICE 模型.为了清楚表现光电晶体管的工作状态,图 2(a)为典型的光耦电路结构示意图.如图 2(a)所示,光耦电路由发光二极管和光电晶体管构成,当发光二极管通电工作时,所发出的光被光电晶体管吸收,进而转变为电学信号,并被放大输出.



(a) 光耦电路结构示意图



(b) 光耦电路等效电路模型,其中包含 LED 发光部分及光电晶体管等效部分

图2 光耦电路结构示意图及等效电路模型

根据光耦电路的工作原理,所建立的 SPICE 等效电路结构如图 2(b)所示. 等效电路分为三个部分:第一部分为 LED 发光管的等效电路^[12, 15],由二极管 D_1 和一个电流源构成;为模拟光电晶体管的光电响应特性,由 H_1 、 R_1 、 C_1 构成第二部分电路,主要模拟光电流转换响应时间^[16];第三部分为光电晶体管的主要等效电路,包括压控电流源 G_1 、二极管 D_2 、流控电流源 F_1 等,另外包括 C_2 、 R_2 、 C_3 、 R_3 等结电容和寄生电阻. 虚线框外为外电路.

其中,受控电流源 G_1 表示输入的光电流,可表达为

$$\begin{aligned} I_p &= A \times R_p \times \phi \rightarrow \frac{R_p}{E} = R \\ &= A \times E \times R \times \phi \rightarrow \eta = \frac{R}{\lambda} \times 1.24 \quad (1) \\ &= A \times E \times \lambda \times \eta \times \phi / 1.24 \rightarrow E = \frac{hc}{\lambda} \\ &= A \times hc \times \eta \times \phi / 1.24 \end{aligned}$$

式(1)中, A 为光照区面积; R_p 为漂移光谱灵敏度+扩散光谱灵敏度; E 为光子能量; R 为总光谱灵敏度; λ 为入射光波长; h 为普朗克常数; c 为真空光速; η 为量子效率; ϕ 为入射光通量. 其中,入射光通量为

$$\phi = \frac{B}{E} = \frac{P_{in}}{A \times E} \quad (2)$$

B 为入射光强,光在介质中的透射系数为 T ,入射光功率为 P_{in} ,则器件表面光通量为

$$\phi_0 = \frac{T \times P_{in} \times \lambda}{hc \times A} \quad (3)$$

透射系数 T 是波长 λ 的函数,在文献^[17]中有详细的计算公式.

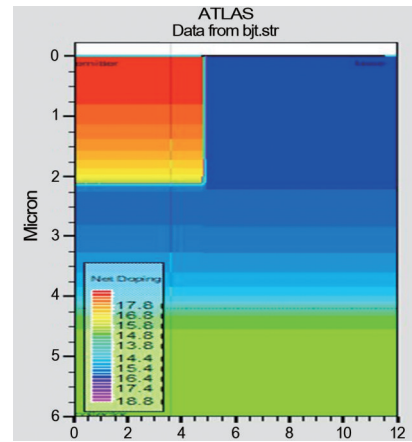
3 模型参数的提取

首先,使用 TCAD 软件对光电晶体管的器件结构进行仿真. 本文使用的软件为 Silvaco, Silvaco 可以对互连寄生参数进行精确描述并基于物理特性进行可靠性建模^[18].

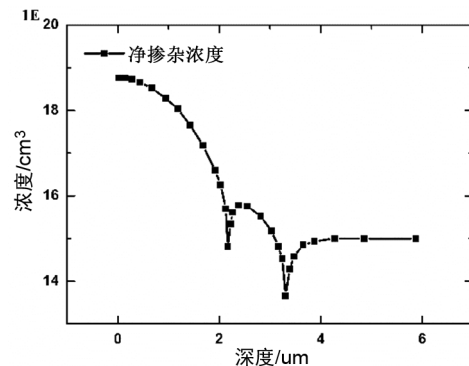
高频硅基光电晶体管的 TCAD 仿真结果如图 3 所示. 图 3(a)为本节 Silvaco 仿真所使用的器件结构示意图,图 3(b)为提取所得到的器件净掺杂分布图.

图 4 所示为仿真得到的光电晶体管的特性曲线,包括瞬态响应、击穿电压、电流增益以及光谱响应.

从图 4(a)中可以看出,随着入射光强的快速下降,光电流与其具有一致的下降趋势,可以清楚看到硅基光电晶体管的响应时间在纳秒级别,显示出良好的高频特性;图 4(b)表示所建立的光电晶体管模型击穿电压约为 50V,具有良好的耐高压能力;光电晶体管的增益 β_f 如图 4(c)所示,电流增益峰值约为 500,具有优秀的电流放大功能;如图 4(d)所示,在 0.4~1 μ m 波长范围



(a) Silvaco 中仿真的光电晶体管结构



(b) 仿真模型的净掺杂曲线

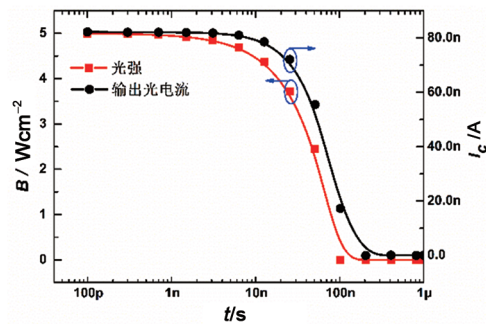
图 3 高频硅基光电晶体管 TCAD 仿真结果

内,光响应度峰值大于 0.5A/W. 可以认为所仿真的器件基本满足光电晶体管特性.

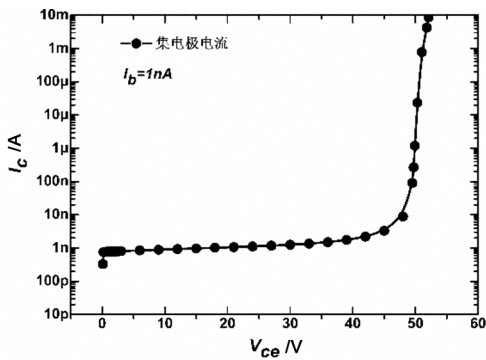
因此,通过对器件进行参数提取,得到了如表 1 所示的器件参数. 其中 R_1 、 C_1 参考自文献^[19].

二极管 D_1 的模型为: MODEL LED D (N=2.50, RS=0.0001, CJO=40PF, IS=306E-12)^[12]. 二极管 D_2 可视为一个光电二极管. 对于光电二极管,有如下电流分析公式^[20]:

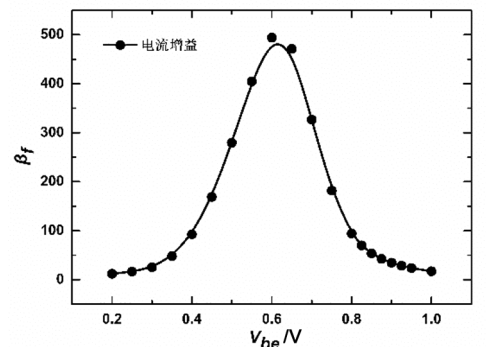
$$\begin{aligned} J_{diff} &= qD_n \left(\frac{\partial N_p}{\partial x} \right)_{x=x_j+W} \\ &= qL_{i_0} (1+R) \frac{\alpha L_n}{1+\alpha L_n} e^{-\alpha(x_j+W)} + qN_{p_0} \frac{D_n}{L_n} \\ J_{diff} &= -q \int_{x_j}^{x_j+W} G(x) dx = qL_{i_0} (1-R) e^{-\alpha x_j} (1 - e^{\alpha W}) \quad (4) \\ J_{tot} &= J_{diff} + J_{drift} \\ &= qL_{i_0} (1-R) e^{-\alpha x_j} \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1+\alpha L_n} \right) + qN_{p_0} \frac{D_n}{L_n} \\ \eta &= J_{tot} / qL_{i_0} = (1-R) e^{-\alpha x_j} \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1+\alpha L_n} \right) \end{aligned}$$



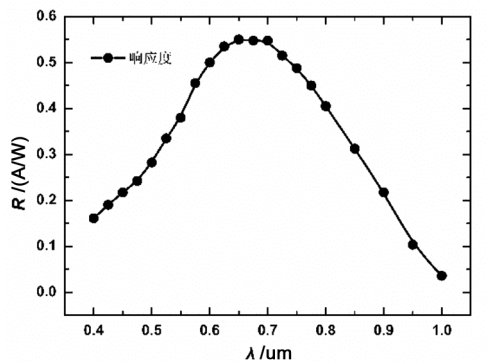
(a) 瞬态响应



(b) 击穿电压



(c) 电流增益



(d) 光谱响应

图4 高频硅基光电晶体管的仿真特性曲线

表1 高频硅基光电晶体管模型参数

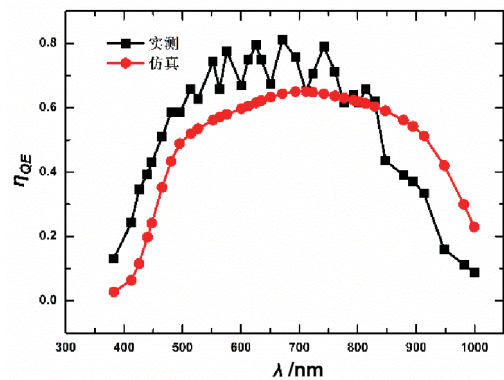
参数	物理值
RC时间响应(R_1, C_1)	$R_1 = 1 \text{ K}\Omega, C_1 = 100 \text{ PF}$
基极发射极电容 C_{BE} (C_2)	20 PF
基极发射极电阻 R_{BE} (R_2)	200 Ω
基极集电极电容 C_{CE} (C_3)	10 PF
集电极发射极电阻 R_{CE} (R_3)	50 K Ω

以及考虑N+区电流后修正的公式:

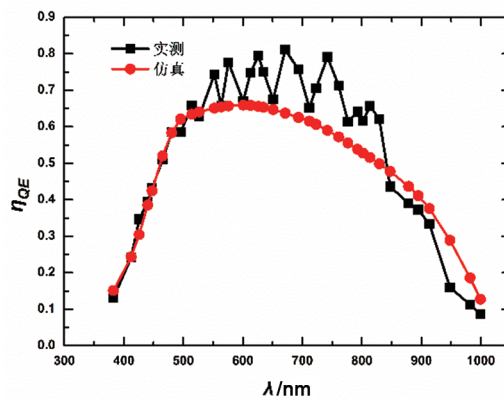
$$\eta = (1 - R) \left(e^{-\alpha x_{\text{fitted}}} - \frac{e^{-\alpha(x_j + W)}}{1 + \alpha L_{n,\text{fitted}}} \right) \quad (5)$$

其中, $J_{\text{diff}}, J_{\text{drift}}, J_{\text{tot}}$ 分别为扩散电流密度、漂移电流密度、总电流密度; η 为量子效率.

图5为 MATLAB 仿真与实测对比的光电二极管量子效率图, 可以看到修正公式得到的结果与实测数据基本一致. 同样, 建立其 TCAD 模型并提取关键参数.



(a) 由式(4)模拟得到的量子效率与测量值对比



(b) 由式(5)模拟得到的量子效率与测量值对比

图5 光电二极管 MATLAB 仿真结果

根据以上分析结果, 利用数学公式及其参数在 Pspice 中建立相应的 ABM (Analog Behavioral Modeling) 模型^[21]. 因此, 可得到光电二极管 D_2 的模型为: MODEL

PD D (AREA=1, PIN=1000m, LAMBDA=0.6, DEV_LENGTH=50E-4, XJ=0.5E-4, NA=5E15, ND=1E20, RS=1).

将表 1 所得参数置入之前的 SPICE 模型,完整的光电晶体管 SPICE 等效电路模型如图 6 所示.

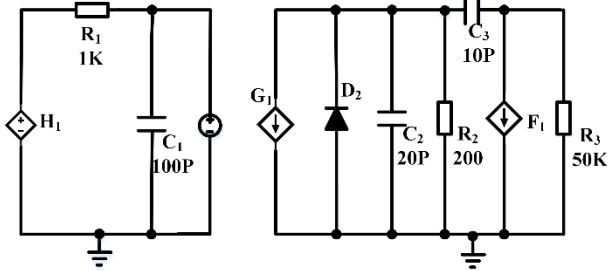


图 6 完整的光电晶体管等效电路模型图

4 SPICE 电路仿真与对比验证

利用 SPICE 电路仿真工具对所提出的电路模型进行仿真,并与 TCAD 仿真结果进行对比,以验证所提出的 SPICE 电路模型是否具有光电晶体管应有的特性.使用的软件为 OrCAD Capture Pspice. Cadence 公司的 Pspice 模拟软件是一个功能全面的通用模拟工具平台,能够进行模拟电路、数字电路以及数模混合电路的分析^[22].

通过对模型进行相应的仿真设置,得到如图 7 所示的电路特性曲线,并将其与器件仿真的结果进行对比.

通过对比可以发现,所提出的光电晶体管模型的输出电流能力如图 7(a)所示、电流放大能力如图 7(b)所示与器件仿真结果基本一致,同时仿真都达到了 >0.5A/W 的光响应度如图 7(c)所示,且两种模拟结果具有相似的曲线趋势.

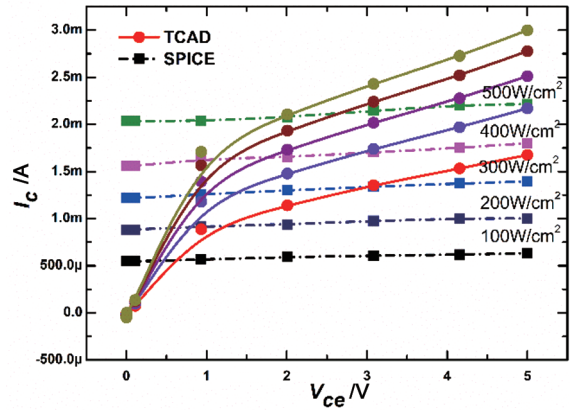
5 器件模拟与电路应用

为了验证本文所提出的 SPICE 模型的实用性,本节采用 ST-1MLB 型号光电晶体管所测得的器件参数,将其代入 SPICE 模型中,对比测试结果是否一致.图 8 为 ST-1MLB 型号光电晶体管及其测试设备.

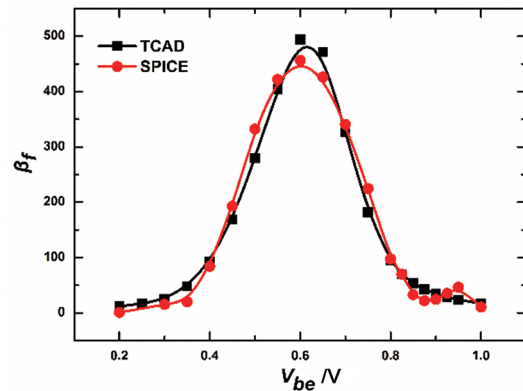
表 2 为测量并结合光电晶体管产品说明所得到的器件参数.

将表 2 数据依次代入图 6 的等效电路模型中并进行仿真,结果得到了如图 9 所示的对比曲线.

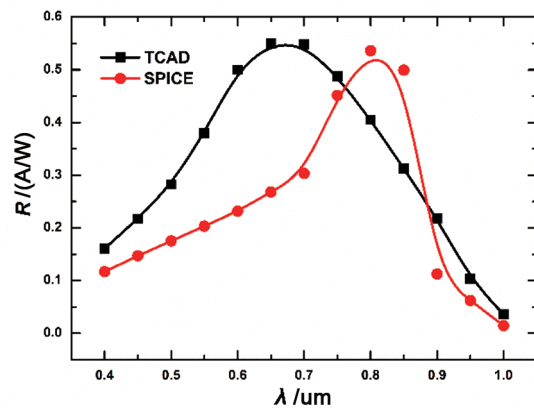
从图 9 可以看出,器件实测结果与模型仿真在输出电流能力与光相对灵敏度(峰值波长约为 850nm)上基本一致,验证了本文所提出的 SPICE 模型在器件模拟上的可行性.但其中还存在一定的误差.图 9(a)为光电晶体管的输出特性曲线,当输入光强较低时,器件的实测结果与仿真结果之间存在较大误差,随着光强的增



(a) 输出曲线的 TCAD 模拟与 SPICE 电路模拟对比



(b) SPICE 模型的电流增益仿真



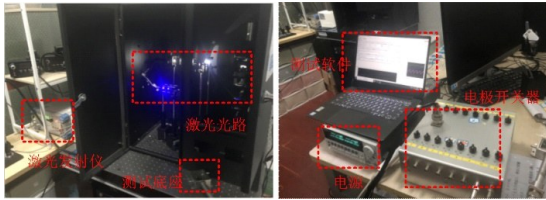
(c) 光谱响应的 TCAD 模拟与 SPICE 电路模拟对比

图 7 SPICE 模型的仿真特性曲线

大,仿真误差减小.这可能是由于仿真所对应的光电流比较理想,而在实测时,光电器件受到外界杂散光的影响,而且光源与器件受光区域角度存在偏差.图 9(b)为光谱响应曲线,仿真结果的灵敏度峰值所对应的波长数值与实测结果比较吻合,但在 0.4~1.1um 波长范围内,实测和仿真得到的光谱响应曲线存在较大差异,主要原因是所建立的光谱响应仿真模型是基于 ABM 模型



(a) ST-1MLB 晶体管实物

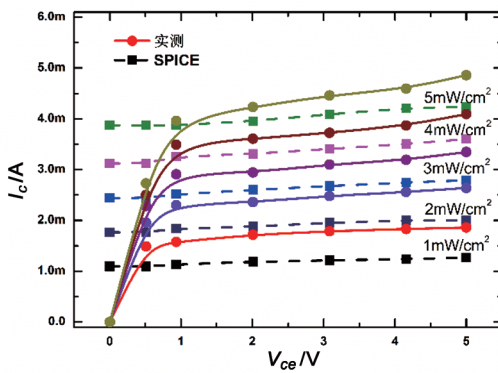


(b) 测试设备

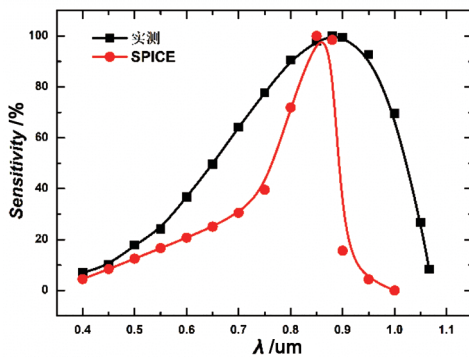
图 8 ST-1MLB 光电晶体管及其测试设备

表 2 光电晶体管器件参数

参数	物理值
基极发射极电阻 R_{BE} (R_2)	500 Ω
集电极发射极电阻 R_{CE} (R_3)	200 K Ω
总结电容 C_T (C_2)	9 PF



(a) 输出曲线



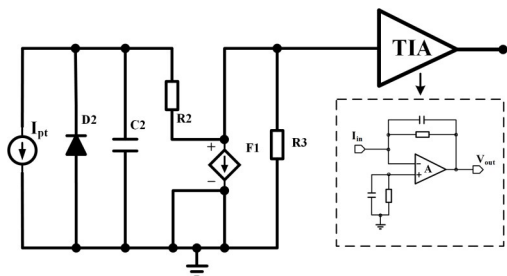
(b) 光谱响应

图 9 器件实测与模型仿真对比曲线

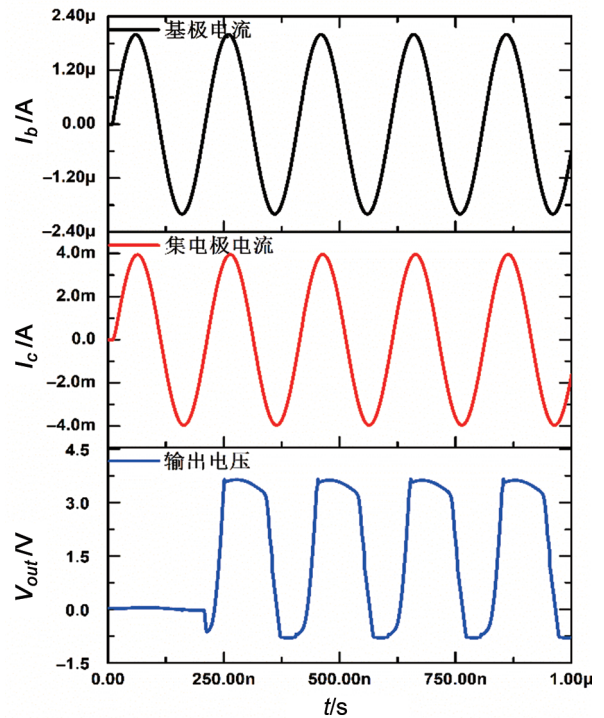
的,该模型对于光谱响应峰值的计算比较准确,但在整个光谱范围内的相对灵敏度的计算,则存在较大的误差.

此外,由于光电晶体管普遍应用于光电接收电路中,因此,在本节中,对该模型应用于电路中的性能进行了仿真.图 10 为测试的电路结构与仿真波形,模型由光电晶体管模型与跨阻放大器组成,该电路可以将电流转化为电压,以便后续 CMOS 电路的输入.从图 10 中可以看出,微小的输入光电流 I_b 经过光电晶体管与跨阻放大器的两级放大后,成功转化为可用于后续输入的大电压 V_{out} ,验证了模型在电路应用中的可行性.

如上文分析,本文提出的 SPICE 等效电路模型在器件模拟与电路应用中还存在不足之处.例如,所提出的等效电路模型在模拟器件低压时的导通趋势与高压时



(a) 应用电路结构



(b) 输入输出波形

图 10 模型应用电路与仿真波形

的击穿趋势上误差较大;且在光谱响应方面,在峰值灵敏度计算较为准确,但整个光谱范围内的相对灵敏度计算,则存在较大误差.同时,在电路应用中,仿真输出的信号也存在失真.对此,需要:1)完善实验过程,排除外界干扰;2)对器件参数的提取过程进行优化,如通过使用精确测量仪器及提参软件对器件参数进行提取;3)建立描述器件导通与击穿特性的紧凑型模型;4)优化等效电路模型与后续电路的匹配等.

6 结论

为了验证光电晶体管的光响应特性与电响应特性,本文提出了一种建立高频硅基光电晶体管 SPICE 等效模型以及参数提取的方法.验证结果通过 OrCAD Capture Pspice 获得,将电路仿真结果与 Silvaco TCAD 仿真结果进行了比较,两种模拟结果具有很好的一致性.验证了该模型的光电特性,模型电流增益 β_f 约为 500,光响应度大于 0.5 A/W,为高性能光学器件建模与仿真提供了工具.此外,该模型在器件模拟与电路应用中的可行性也得到了验证.

参考文献

- [1] 史晓凤,王梦迪,张静秋,等.基于光电集成芯片的塑料光纤通信系统研究[J].阜阳师范学院学报(自然科学版),2017,34(2):57-61.
Shi X F, Wang M D, Zhang J Q, et al. Research of plastic optical fiber communication system based on opto-electronic integrated chips[J]. Journal of Fuyang Normal University (Natural Science), 2017, 34(2): 57 - 61. (in Chinese)
- [2] 李应辉,陈春霞,蒋城,等.光电耦合器总剂量辐照的噪声表征[J].电子学报,2009,37(8):1707-1711.
Li Y H, Chen C X, Jiang C, et al. 1/f Noise denoting for radiation total dose of optocoupler[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(8): 1707 - 1711. (in Chinese)
- [3] 李霆霆,张明,潘明俊.一种 MHz 光耦隔离放大器的设计与分析[J].电子学报,2014,42(7):1398-1402.
Li T T, Zhang M, Pan M J. Design and analysis of an optocoupler isolation amplifier with MHz bandwidth[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(7): 1398 - 1402. (in Chinese)
- [4] 陈龙超,范文慧.高灵敏度低噪声太赫兹光电探测器研究[J].电子学报,2012,40(9):1705-1709.
Chen L C, Fan W H. Study on high sensitivity and low noise electro-optic terahertz detector[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(9): 1705 - 1709. (in Chinese)
- [5] Bermejo S, Molinero D, Ortega P, et al. Optocoupler driving of MEMS electrostatic switches[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2008, 18(5): 055044.
- [6] Kieschnick K, Zimmermann H, Seegebrecht P. Silicon-based optical receivers in BiCMOS technology for advanced optoelectronic integrated circuits[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2000, 3(5): 395 - 398.
- [7] Zhi W, Quan Q, Yu P, et al. A 45 nm CMOS avalanche photodiode with 8.4-GHz bandwidth[J]. Micromachines, 2020, 11(1): 65.
- [8] Teegne Z G, Viana C, Polleux J, et al. Intrinsic frequency response of silicon-germanium phototransistor associated with 850-nm multimode fiber[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(6): 2537 - 2543.
- [9] Swe T N, Yeo K S. An accurate photodiode model for DC and high frequency SPICE circuit simulation[A]. 2001 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems[C]. USA: Nanyang Technological University, School of Electrical and Electronic Engineering Nanyang Avenue, 2001.
- [10] Ahmadov F, Abdullayev F, Akberov R, et al. On iterative model of performance of micropixel avalanche photodiodes[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2018, 912: 287 - 289.
- [11] Blanco F B, López P, and Roldán J B. Analytical modeling of size effects on the lateral photoresponse of CMOS photodiodes[J]. Solid State Electronics, 2012, 73: 15 - 20.
- [12] Stawarz G B, Cichosz J, Konczakowska A. The noise macromodel of an optocoupler including 1/fⁿ noise source[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2008, 56(1): 41 - 42.
- [13] Górecki K, Stepowicz W. Electrothermal model of optocoupler for SPICE[J]. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 2009, 22: 321 - 333.
- [14] Betta G, Pignatelli G U, Verzellesi G, et al. Design and optimization of an npn silicon bipolar phototransistor for optical position encoders[J]. Microelectronics Journal, 1998, 29: 49 - 58.
- [15] Vladescu M, Codreanu N D, Bonea A, et al. Modelling the optical behaviour of LED's and PD's for PSpice simulation readiness[A]. 2010 IEEE 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIIT-EM)[C]. Pitesti, Romania: IEEE, 2010, 189 - 192.
- [16] Feruglio S, Courcier T, Tsiakaka O, et al. A CMOS buried quad p-n Junction photodetector model[J]. IEEE Sensors

- Journal, 2016, 16(6): 1611 – 1620.
- [17] Berning P H. Theory and calculation of optical thin films [A]. Cottey A A. Physics of Thin Films[C]. New York, USA: Plenum, 1963.
- [18] Software version. 5.6.0.R. ATLAS user's manual[DB/OL]. www.silvaco.com, 2003.
- [19] Micro-Cap 9. Electronic circuit analysis program reference manual, spectrum software[DB/OL]. www. spectrum-soft.com, 2007.
- [20] 晋文亮, 牛文成. 与 CMOS 兼容的光电二极管模型及其 SPICE 模拟分析[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2006, 39(2): 1 – 5.
Jin W L, Niu W C. Modeling of CMOS compatible photodiode and SPICE simulation analysis[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2006, 39(2): 1 – 5. (in Chinese)
- [21] Perry R J, Arora K. Using PSPICE to simulate the photoreponse of ideal CMOS integrated circuit photodiodes[A].

Proceedings of SOUTHEASTCON '96[C]. Tampa, Florida, USA: IEEE, 1996. 374 – 380.

- [22] Fitzpatrick D. Analog Design & Simulation Using Orcad Capture & Pspice[M]. Netherlands: Elsevier, 2012. 53 – 67.

作者简介



张子同 男, 1996 年生, 江苏连云港人. 2018 年毕业于江南大学微电子科学与工程系, 同年进入江南大学集成电路工程专业攻读硕士学位, 主要从事光电集成电路方面的研究.
E-mail: 6181916020@stu.jiangnan.edu.cn



姜岩峰(通信作者) 男, 1972 年生, 吉林四平人. 博士, 教授, 博士生导师. 主要从事射频集成电路设计与实现以及新型电路结构设计与实现方面的研究.
E-mail: jiangyf@jiangnan.edu.cn