

# 基于进化差分算法的整流二极管高频特性建模

张 成<sup>1</sup>, 孙逸群<sup>1</sup>, 周孟夏<sup>1</sup>, 刘兴发<sup>2</sup>, 颜 伟<sup>1</sup>, 裴亚康<sup>1</sup>, 王永安<sup>1</sup>

(1.南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

(2.中国电力科学研究院有限公司武汉分院电网环境保护国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

**[摘要]** 提出了一种基于进化差分(differential evolution, DE)算法的整流二极管高频建模方法. 首先,通过矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)提取了整流二极管截止时高频阻抗特性. 然后,基于进化差分算法进行整流二极管高频特性建模,同时,对比了进化差分算法与遗传算法的拟合结果. 结果表明:进化差分算法在拟合精度及运行速度均优于遗传算法. 通过实测曲线与仿真曲线对比表明拟合效果良好,验证了模型及参数的准确性. 最后,通过仿真验证了其导通关断特性.

**[关键词]** 整流二极管, 高频模型, 进化差分算法, 寄生参数

**[中图分类号]** TN111 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2021)03-0022-06

## Modeling of High Frequency Characteristics of Rectifier Diodes Based on Differential Evolution Algorithm

Zhang Cheng<sup>1</sup>, Sun Yiqun<sup>1</sup>, Zhou Mengxia<sup>1</sup>, Liu Xingfa<sup>2</sup>, Yan Wei<sup>1</sup>, Pei Yakang<sup>1</sup>, Wang Yongan<sup>1</sup>

(1.NARI School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Technology State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power  
Research Institute Wuhan Branch, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper proposes a high-frequency modeling method for the rectifier diode based on differential evolution (DE) algorithm. First of all, the vector network analyzer(VNA) is used to extract the high-frequency impedance characteristics of the rectifier diode on cut-off condition. Then, the high frequency characteristic modeling of rectifying diode is based on different evolution algorithm. At the same time, the fitting results of different evolution algorithm and genetic algorithm are compared with each other, and the results of different evolution algorithm are better than those of genetic algorithm both in fitting accuracy and running speed. Then, the comparison between the measured curve and the simulation curve shows that the fitting result is good, which verifies the accuracy of the model and parameters. Finally, the turn-on and turn-off characteristics of the rectifier diode are verified by simulation.

**Key words:** rectifier diode, high frequency model, different evolution algorithm, parasitic parameters

在科学和信息技术高速发展的背景下,半导体技术在近二三十年得到了十分迅猛的发展. 它的发展和应用给人们带来了福祉,尤其是在通信、高速计算、大容量信息处理、电子对抗以及武器装备的微型化、智能化等方面. 这些对国民经济和国家安全至关重要的领域出现了巨大的改变,受到了人们的欢迎和重视.

整流二极管是一种用于将交流电转变为直流电的半导体器件并广泛应用于射频、微波等电路中,其通常包含一个 PN 结,有正极和负极两个端子,二极管最重要的特性就是单向导电性<sup>[1-2]</sup>. 整流二极管主要用于各种低频半波整流电路例如开关电源电路中的整流电路. 张楠等提出了 PN 结二极管射频等效电路<sup>[3]</sup>,其将 PN 结二极管工作情况分为导通与截止两种情况并分别进行等效电路建模. 闫大为等还对肖特基二极管的正向电流运输及其低频噪声行为展开了研究<sup>[4]</sup>. 国外学者也对 PN 结二极管所使用的材料对其影响做了研究<sup>[5-8]</sup>. 但对二极管高频特性研究甚少,因此,需要对整流二极管高频特性进行建模.

收稿日期:2020-01-12.

基金项目:江苏省社会发展重点项目(BE2019716)、电网环境保护国家重点实验室开放基金项目.

通讯作者:颜伟,博士,副教授,研究方向:电磁兼容. E-mail:61197@njnu.edu.cn

## 1 二极管模型及寄生参数提取

### 1.1 二极管高频电路拓扑

在电路中二极管都被认为是理想器件,但在实际应用中需要考虑各种寄生参数的影响. 整流二极管高频等效电路模型如图 1 所示. 其中  $C_p$ 、 $R_p$ 、 $L_p$  分别为整流二极管的寄生电容、寄生电阻及寄生电感.  $D1$  则为理想二极管.

因此,整流二极管的阻抗可以表示为

$$Z = R_p + L_p s + \frac{1}{C_p s}, \quad (1)$$

$$s = j\omega, \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi f. \quad (3)$$

式中,  $R_p$ 、 $L_p$ 、 $C_p$  为二极管寄生参数,  $s$  为复数频率,  $\omega$  为角频率,  $f$  为频率.

### 1.2 整流二极管寄生参数提取

本文使用罗德施瓦茨公司的 ZVL 型 VNA 做信号输入及接收的设备,频率测量范围为 9 kHz~3 GHz. 测试之前,首先需要对设备进行校准,完成校准工作后,进行阻抗测量,得到整流二极管阻抗幅频特性曲线.

本文研究的对象是整流二极管,将其两端引脚分别焊在接口处的接地引脚和中心引脚,如图 2 所示.

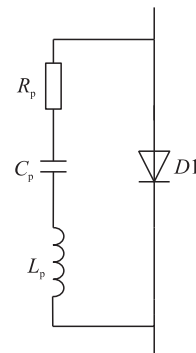
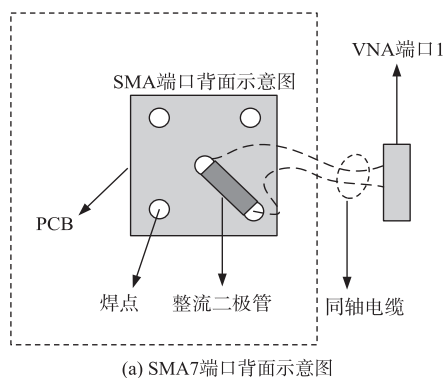


图 1 整流二极管高频等效电路模型

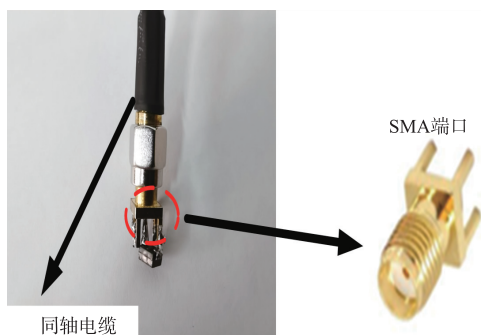
Fig.1 High frequency equivalent circuit model of rectifier diode



(a) SMA7端口背面示意图



(b) 实物



(c) 同轴电缆与实物连接示意图



(d) VNA 提取寄生参数

图 2 寄生参数提取示意图

Fig.2 Schematic diagram of parasitic parameter extraction

实测采样点个数设为 500 个,测试频率为 9 kHz~300 MHz. 二极管在 9 kHz~300 MHz 频率范围内的阻抗幅值曲线如图 3 所示.

## 2 基于 DE 算法估算阻抗 RLC 参数

### 2.1 DE 算法的优化准则

本文选用差分进化算法对二极管寄生参数进行估算. DE 算法是一种并行直接搜索算法,对候选总体进行随机操作:从随机

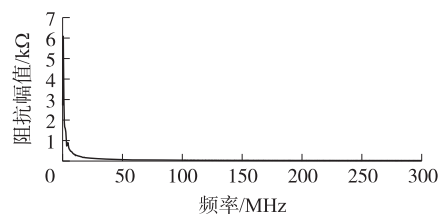


图 3 二极管截止阻抗曲线

Fig.3 Cut-off impedance curve of diode

选取的初始种群开始,主要操作过程包括选择、交叉和变异. DE 算法的流程图如图 4 所示.

采用差分拟合方法拟合二极管模型的等效参数  $R_p$ 、 $L_p$ 、 $C_p$  等.  $Z$  是待优化参数的原始函数,并用 VNA 测量阻抗  $Z_x$  为样本,取 9 kHz~1 GHz 中 500 个不同频率的数据.

将问题转化为使拟合阻抗与实际阻抗的差值最小,具体为  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_D$  对应于要优化的参数,在这里为  $R_p$ 、 $C_p$ 、 $L_p$ . 根据文献[9-11]中 DE 算法参数的选择原则,本文中 DE 算法的相关参数

$$\begin{aligned} Z &= \min f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_D) \\ \text{s.t. } x_j^L &\leq x_j \leq x_j^U, \quad j=1, 2, 3, \dots, D. \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $D$  是空间尺寸,  $D \subset \mathbf{R}^n$ ,  $x_j^L$  和  $x_j^U$  分别表示是第  $j$  个分量  $x_j$  的最大值和最小值.

DE 算法具体的应用过程如下:

第 1 步:初始化参数

对于初始种群  $\{x_i(0) \mid x_{j,i}^L \leq x_{j,i}(0) \leq x_{j,i}^U, i=1, 2, 3, \dots, N_p; j=1, 2, 3, \dots, D\}$  随机产生:

$$x_{j,i}(0) = x_{j,i}^L + \text{rand}(0, 1) \cdot (x_{j,i}^U - x_{j,i}^L). \quad (5)$$

式中,  $N_p$  为种群大小. 本文考虑数据量和处理精度等因素将其设为 100,  $x_i(0)$  指总体中第 0 代的第  $i$  个个体,  $x_{j,i}(0)$  指第 0 代的第  $i$  个个体的第  $j$  个基因.  $\text{rand}(0, 1)$  表示 0 到 1 之间的随机分布数.

第 2 步:变异操作

DE 算法以实际值参数向量作为每一代的种群,以种群中两个个体的加权差值作为中间个体,即差向量. 然后将差向量加到第三个个体上产生突变,

$$v_i(g+1) = x_{r_1}(g) + F(x_{r_2}(g) - x_{r_3}(g)). \quad (6)$$

式中,  $F$  是诱变因子,  $F=0.8$ ,  $x_i(g)$  是  $g$  代种群的第  $i$  个个体.

第 3 步:交叉操作

交叉操作是指按照一定的规则将当前种群中个体的某些组成部分与突变个体的相应组成部分进行交换,从而产生交叉种群.  $g$  代种群  $\{x_i(g)\}$  及其变异量  $\{v_i(g+1)\}$  的交叉运算为

$$u_i(g+1) = \begin{cases} v_{j,i}(g+1), & \text{rand}(0, 1) \leq C_R, \\ x_{j,i}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $j_{\text{rand}}$  是  $[1, 2, 3, \dots, D]$  中的随机整数,  $C_R$  是交叉概率,  $C_R=0.7$ .

第 4 步:选择操作

如果下一代个体的目标函数小于当前个体的目标函数,则下一代个体将取代当前个体.

$$x_i(g+1) = \begin{cases} u_i(g+1), & f(u_i(g+1)) \leq f(x_i(g)), \\ x_i(g), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

第 5 步:收敛判别操作

设  $x(g+1)$  中的最优个体为  $x_{\text{best}}(g+1)$ , 当 DE 算法运行到预定次数或所选的优秀个体小于某个设定值时,操作即可结束,预估结果为  $R_p$ 、 $C_p$ 、 $L_p$  的最优值. 如果没有收敛,则返回第 2 步,再次进行变异、交叉和选择.

## 2.2 整流二极管阻抗建模分析

为了验证差分进化算法的优越性,分别采用差分进化算法和遗传算法对整流二极管的等效电路参数进行优化. 文献[12-14]采用遗传算法对等效电路参数进行优化,文献[15-17]指出遗传算法(genetic algorithm, GA)在精度和速度上优于随机搜索、最小二乘法等传统方法. 前人已经提出了遗传算法的相关原理和等效电路参数优化的具体方法. 为了使 DE 算法和 GA 算法的比较公平,GA 算法中的种群大小和交叉率与 DE 算法的参数设置相同,分别为 100 和 0.7. 优化的初始值也与 DE 算法一致. 二极管阻抗信息

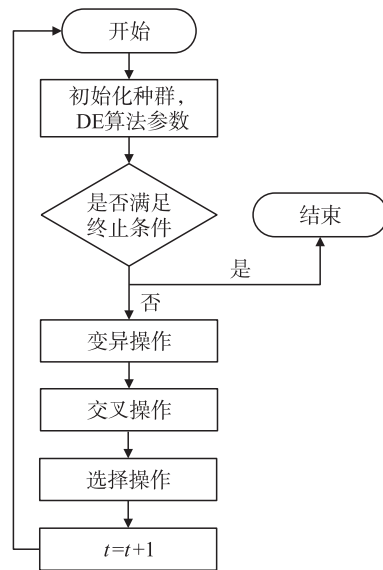


图 4 DE 算法流程图

Fig. 4 DE algorithm flow chart

采用 VNA(Rohde &Schwarz ZNB8) 提取. 由于二极管是单端口设备,所以只使用 VNA 的端口 1 进行测量. 具体测量步骤如下:首先,使用校准套件(Rohde & Schwarz ZV-Z121)对测量系统(VNA 和连接线)进行校准. 校正包括短路校正、开路校正及  $50\ \Omega$  标准阻抗校正. 将二极管焊接在 SMA 端口上. 最后将校准后的测量系统连接到与二极管焊接的 SMA 接口上完成测量. 将二极管直接焊接在 SMA 接口上,没有任何其他元件或电路. 然后,采用差分进化算法和遗传算法对二极管模型的等效参数进行优化. 二极管阻抗幅值拟合结果如图 5 和表 1 所示.

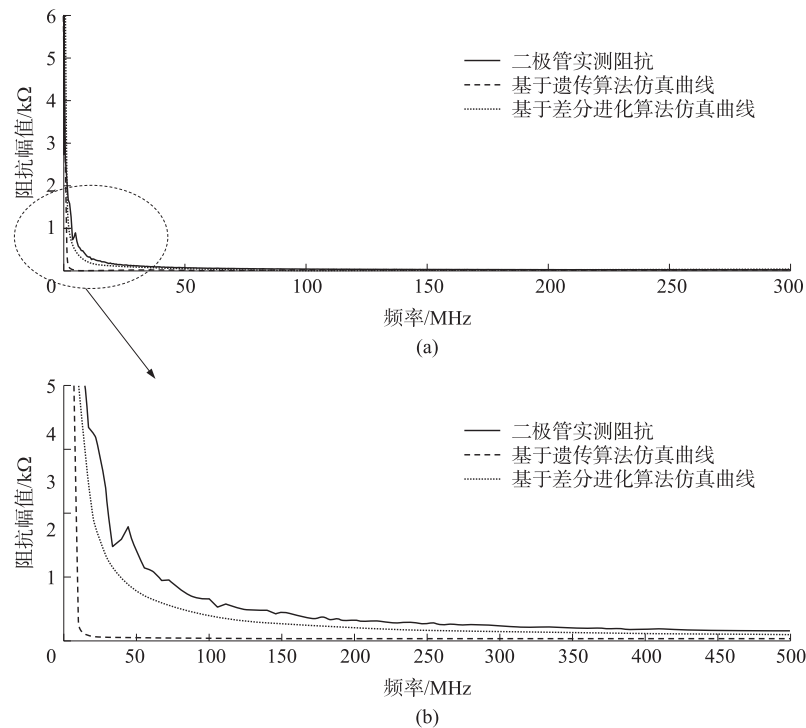


图 5 二极管截止阻抗拟合仿真  
Fig. 5 Cut-off impedance fitting simulation of diode

由上述仿真结果可以发现,在  $9\ \text{kHz}\sim 30\ \text{MHz}$  范围内 DE 算法对于二极管截止阻抗幅值的拟合结果明显要优于 GA 算法,更加接近实测值. 最终二极管基于 DE 算法与 GA 算法的等效  $R$ 、 $C$ 、 $L$  参数对比如表 1 所示.

3 二极管高频模型动态特性仿真分析

在电路仿真软件中构建如图 6 所示的电路,其中在二极管施加一  $50\ \text{V}$  交流方波激励,其  $V_{\text{peak}} = 50\ \text{V}$ ,  $V_{\text{dc}} = 0\ \text{V}$ ,  $\text{Freq} = 200\ \text{Hz}$ ,并在二极管后端串联一值为  $50\ \Omega$  的负载. 二极管动态特性仿真结果如图 7 所示,当方波激励为  $50\ \text{V}$  时二极管正向导通,导通时其电流应达到最大,其电压应为  $0\ \text{V}$ . 方波激励为  $-50\ \text{V}$  时二极管反向截止,截止时电流应为最小,其电压应为  $-50\ \text{V}$ . 由图 7(a)、图 7(c)可知,所建立的二极管电路模型基本符合上述分析. 但从图 7(c)中发现有电流反冲现象,通过查阅整流二极管数据手册可知其具有反向特性且反向恢复时间  $T_{\text{rr}} = 1.5\ \mu\text{s}$  (如图 7(b)所示). 因此,图 7(c)中出现的电流反冲现象也与实际相符合. 该整流二极管的伏安特性曲线如图 7(d)所示,通过仿真得到的伏安特性曲线如图 7(e)所示. 通过两者比较,仿真结果与实际结果基本相符. 所以,该模型能基本反应二极管特性.

表 1 二极管模型参数值

Table 1 Parameter values in the diode model		
参数	DE 算法	GA 算法
$C_p/\text{nF}$	0.082 4	2.993
$L_p/\text{nH}$	20	14.5
$R_p/\Omega$	29.424	14.712
Number of iterations	186	628
Convergence duration/s	225	335

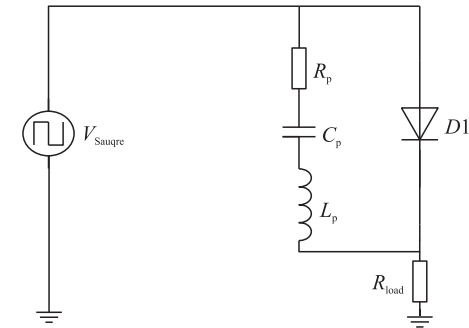


图 6 二极管仿真电路  
Fig. 6 Simulation circuit of diode

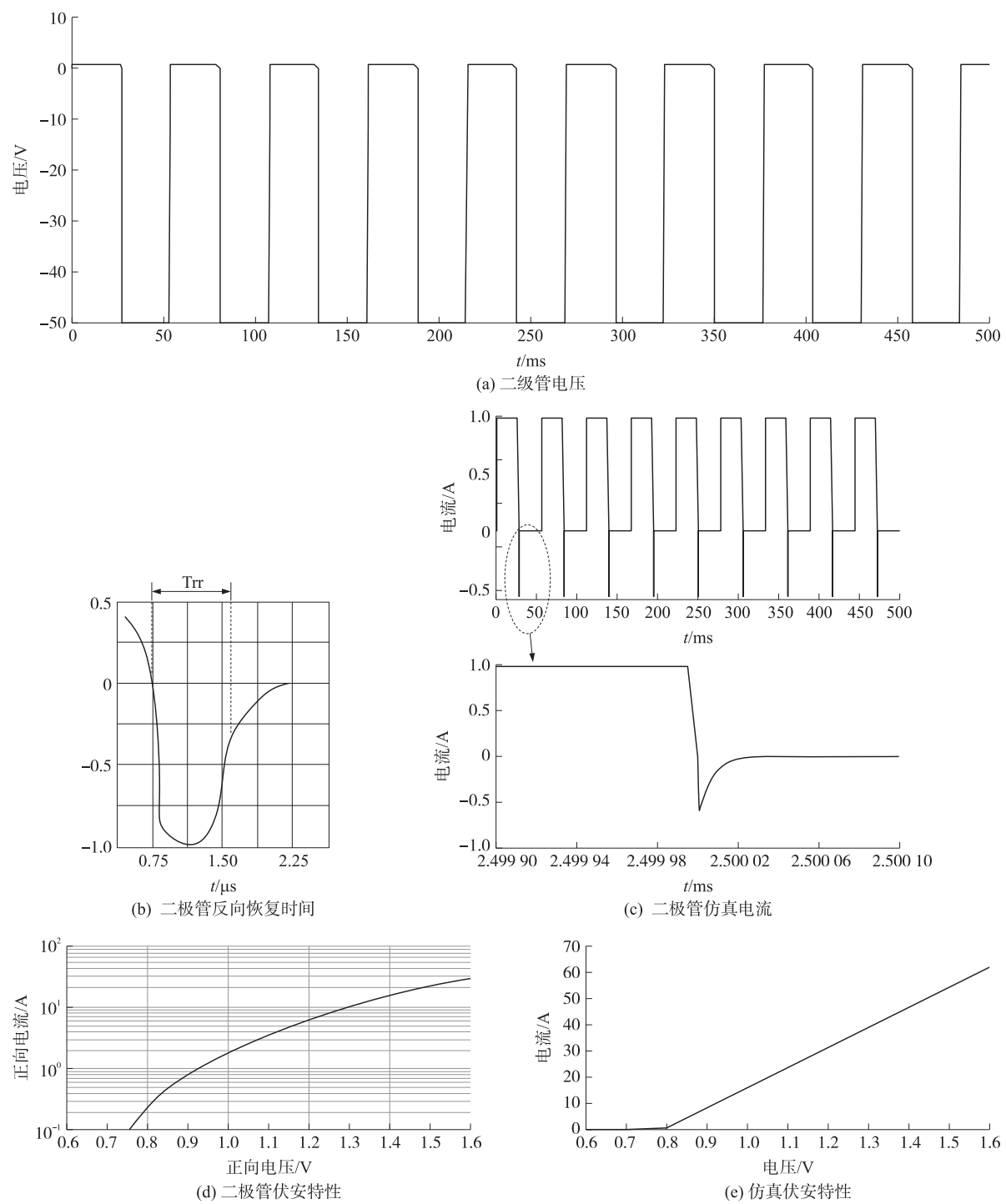


图 7 二极管动态特性仿真结果

Fig. 7 Diode dynamic characteristics simulation results

4 结论

本文提出了一种基于 DE 算法的整流二极管高频建模方法,首先通过 VNA 设备提取了整流二极管截止时高频阻抗特性. 然后基于 DE 算法进行整流二极管高频特性建模,同时遗传对比了 DE 算法与遗传算法的拟合结果. 结果表明;DE 算法在 9 kHz~30 MHz 频率范围内拟合精度比 GA 算法更优,DE 算法运行速度也比 GA 算法更快. 然后通过仿真得到二极管正向导通电压约为 0 V,二极管反向截止电压 50 V,仿真结果也出现了反冲电流现象,初步认定是其反向恢复特性所致,基本与二极管导通关断特性相符,验证了模型及参数的准确性.

## [参考文献] (References)

- [1] 张斌,黄新,陈思敏. 快恢复二极管设计原理综述[J]. 电力电子,2008,6(6):45-51.
- [2] 赵继聪,李森,陶梦江. 二极管工作原理及其主要应用[J]. 科技传播,2010,2(10):45-46.
- [3] 张楠,冯宇波. PIN 二极管在射频开关电路中的工作原理及应用[J]. 科技信息(学术研究),2007,2:5-9.
- [4] 闫大为,田葵葵,闫晓红,等. GaN 肖特基二极管的正向电流输运和低频噪声行为研究[J]. 物理学报,2021(8):362-368.
- [5] XU H,SCHOENTHAL G S,LIU L,et al. On estimating and canceling parasitic capacitance in submillimeter-wave planar schottky diodes[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2009,19(12):807-809.
- [6] HU J,ALATISE O,GONZALEZ J O. Avalanche Ruggedness of parallel connected diodes:SiC Schottky diodes vs silicon PiN diodes[C]//8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016). Glasgow, United Kingdom, 2016.
- [7] WAARTS R,SANDERS S,PARKE R,et al. Frequency-doubled monolithic master oscillator power amplifier laser diode[J]. IEEE Photonics Technology Letters,1993,5(10):1122-1125.
- [8] TÉKAM G T O,GINIS V,DANCKAERT J. Implementation of a PN junction rectifying diode in a metasurface for efficient electromagnetic energy harvesting[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference. Munich, Germany, 2017.
- [9] MARRISON C I,CHRISTOPHER I,STENGEL R F,et al. Robust control system design using random search and genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1997,42(6):835-839.
- [10] ZHANG X,ZHANG X,HO S L,et al. Designing loudspeaker by ensemble of composite differential evolution ingredients[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2014,50(11):1-4.
- [11] BAATAR N,ZHANG D,KOH C. An improved differential evolution algorithm adopting  $\lambda$ -best mutation strategy for global optimization of electromagnetic devices[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2013,49(5):2097-2100.
- [12] SHUO W,LEE F C,ODENDAAL W G. Characterization and parasitic extraction of EMI filters using scattering parameters[J]. IEEE Trans Power Electron,2005,20(2):502-510.
- [13] MENGXIA Z,YANG Z,JINGRUI Y,et al. Study on conducted EMI noise source modelling applied in electromagnetic compatibility analysis based on GA in cooperation with LM[J]. IET Power Electron,2020,13(5):927-935.
- [14] MENGXIA Z,YANG Z,WEI Y,et al. Investigation on conducted EMI noise source impedance extraction for electromagnetic compatibility based on SP-GA algorithm[J]. IET Power Electron,2019,12(7):1792-1799.
- [15] 李庆良,雷虎民,邵雷,等. 一种基于差分进化算法的多模型建模方法[J]. 控制与决策,2010,25(12):1866-1869, 1874.
- [16] 郝跃,贾新章. 器件模型参数优化提取的混合算法[J]. 半导体学报,1989,10(3):168-172.
- [17] DALESSANDRO L,ODENDAAL W G H,KOLAR J W. HF characterization and nonlinear modeling of a gapped toroidal magnetic structure[J]. IEEE Trans Power Electron,2006,21(5):1167-1175.

[责任编辑:陈 庆]