



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106295013 B

(45)授权公告日 2019.09.27

(21)申请号 201610663634.4

(22)申请日 2016.08.12

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106295013 A

(43)申请公布日 2017.01.04

(73)专利权人 全球能源互联网研究院有限公司
地址 102209 北京市昌平区未来科技城滨
河大道18号

专利权人 国网辽宁省电力有限公司电力科
学研究院
国家电网有限公司 清华大学

(72)发明人 蒋焯 蔡博 赵争鸣 乔光尧
陆振纲 雷晰 李凯 于弘洋
蔡林海 曾洪涛 周飞 潘冰
袁立强

(74)专利代理机构 北京三聚阳光知识产权代理
有限公司 11250

代理人 吴黎

(51)Int.Cl.
G06F 17/50(2006.01)

(56)对比文件
CN 105631083 A, 2016.06.01,
CN 104237761 A, 2014.12.24,
CN 103151938 A, 2013.06.12,
US 2014/0368232 A1, 2014.12.18,
JP 特开平10-225135 A, 1998.08.21,
Rui Wu等.Electro-Thermal Modeling of
High Power IGBT Module Short-Circuits
with Experimental Validation.《2015 Annual
Reliability and Maintainability
Symposium》.2015,全文.

审查员 严开元

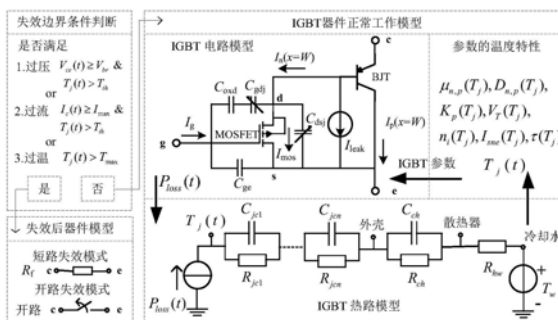
权利要求书1页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

一种高压半导体器件短期失效模型的建模
方法

(57)摘要

本发明实施例公开了一种高压半导体器件
的短期失效模型的建模方法,包括:根据高压半
导体器件的内部元胞结构得到正常工作模型;建
立根据所述高压半导体器件失效后的器件模型;
检测所述高压半导体器件的工作参数;当所述工
作参数满足失效边界条件时,从所述正常工作模
型切换到所述失效后的器件模型。由此,可以有
效地同时描述失效发展过程中的器件行为和器
件失效的最终状态。



1. 一种高压半导体器件短期失效模型的建模方法,其特征在于,包括:
根据所述高压半导体器件的内部元胞结构得到所述高压半导体器件的正常工作模型;
建立所述高压半导体器件失效后的器件模型;
检测所述高压半导体器件的工作参数;
当所述工作参数满足失效边界条件时,从所述正常工作模型切换到所述失效后的器件模型。
2. 根据权利要求1所述的建模方法,其特征在于,所述失效后的器件模型包括短路失效模型,所述高压半导体器件是压接式器件,所述当所述工作参数满足失效边界条件时,从所述正常工作模型切换到所述失效后的器件模型,包括:
当集射极电压超过雪崩击穿电压或集电极电流大于最大工作电流或结温超过器件可正常工作的最高结温时,切换到所述短路失效模型。
3. 根据权利要求1所述的建模方法,其特征在于,所述失效后的器件模型包括短路失效模型和开路失效模型,所述高压半导体器件是模块化封装的器件,所述当所述工作参数满足失效边界条件时,从所述正常工作模型切换到所述失效后的器件模型,包括:
当集射极电压超过雪崩击穿电压时,切换到所述短路失效模型;或者
当集电极电流大于最大工作电流或结温超过器件可正常工作的最高结温时,切换到所述开路失效模型。
4. 根据权利要求2或3所述的建模方法,其特征在于,所述短路失效模型是电阻值范围为 $0\sim 5\ \Omega$ 的电阻器。
5. 根据权利要求1-3中任一项所述的建模方法,其特征在于,所述正常工作模型是热电耦合模型,包括电路模型,参数的温度特性和热路模型。
6. 根据权利要求1-3中任一项所述的建模方法,其特征在于,所述根据所述高压半导体器件的内部元胞结构得到所述高压半导体器件的正常工作模型,包括:
建立所述高压半导体器件的瞬态机理模型;
提取瞬态机理模型的模型参数;
在瞬态机理模型中所述高压半导体器件的漏源极之间加入表述雪崩倍增效应的受控漏电流源;
根据所述高压半导体器件结构,建立器件热路或热场模型。
7. 根据权利要求1-3中任一项所述的建模方法,其特征在于,所述高压半导体器件是IGBT。

一种高压半导体器件短期失效模型的建模方法

技术领域

[0001] 本发明涉及半导体技术领域,具体涉及一种高压半导体器件短期失效模型的建模方法。

背景技术

[0002] 近十年来,高压半导体器件,如IGBT,以其耐压高、电流大、开关频率高和驱动功率小等优点,已经成为中大功率场合应用最为广泛的电力电子主动开关器件。

[0003] 高压半导体器件短期失效是指单个或若干个开关周期内,由于过压、过流、过 di/dt 、过 dv/dt 等等过应力因素造成的短时间内发生的严重的器件失效。如保护不当,单个高压半导体器件的失效极有可能造成整个电力电子装置发生故障,破坏性巨大。因此研究电力电子装置中高压半导体器件的失效行为具有重要意义。

[0004] 但现有高压半导体器件模型中,绝大多数只能描述正常工作时的暂态行为,可用于仿真非正常工况的器件模型并不多,且绝大多数仅限于描述短路过程。目前还没有一种仿真模型可以同时描述失效发展过程中的器件行为和器件失效的最终状态,从而也就无法应用器件模型来模拟失效导致电力电子装置故障的行为过程。

发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题在于,现有的高压半导体仿真模型无法同时描述失效发展过程中的器件行为和器件失效的最终状态。

[0006] 为此,本发明实施例提供了一种高压半导体器件短期失效模型的建模方法,包括:

[0007] 根据所述高压半导体器件的内部元胞结构得到所述高压半导体器件的正常工作模型;

[0008] 建立根据所述高压半导体器件失效后的器件模型;

[0009] 检测所述高压半导体器件的工作参数;

[0010] 当所述工作参数满足失效边界条件时,从所述正常工作模型切换到所述失效后的器件模型。

[0011] 优选地,所述失效后的器件模型包括短路失效模型,所述高压半导体器件是压接式器件,所述当所述工作参数满足失效边界条件时,从所述正常工作模型切换到所述失效后的器件模型,包括:

[0012] 当集射极电压超过雪崩击穿电压或集电极电流大于最大工作电流或结温超过器件可正常工作的最高结温时,切换到所述短路失效模型。

[0013] 优选地,所述失效后的器件模型包括短路失效模型和开路失效模型,所述高压半导体器件是模块化封装的器件,所述当所述工作参数满足失效边界条件时,从所述正常工作模型切换到所述失效后的器件模型,包括:

[0014] 当集射极电压超过雪崩击穿电压时,切换到所述短路失效模型;或者

[0015] 当集电极电流大于最大工作电流或结温超过器件可正常工作的最高结温时,切换

到所述开路失效模型。

[0016] 优选地,所述短路失效模型是电阻值范围为 $0\sim 5\ \Omega$ 的电阻器。

[0017] 优选地,所述正常工作模型是热电耦合模型,包括电路模型,参数的温度特性和热路模型。

[0018] 优选地,所述根据所述高压半导体器件的内部元胞结构得到所述高压半导体器件的正常工作模型,包括:

[0019] 建立所述高压半导体器件的瞬态机理模型;

[0020] 提取瞬态机理模型的模型参数;

[0021] 在瞬态机理模型中所述高压半导体器件的漏源极之间加入表述雪崩倍增效应的受控漏电流源;

[0022] 根据所述高压半导体器件结构,建立器件热路或热场模型。

[0023] 优选地,所述高压半导体器件是IGBT。

[0024] 本发明实施例的高压半导体器件短期失效模型的建模方法,通过建立正常工作模型和失效后的模型,并当工作参数满足失效边界条件时,从正常工作模型切换到失效后的模型,从而可以有效地同时描述失效发展过程中的器件行为和器件失效的最终状态。

附图说明

[0025] 通过参考附图会更加清楚的理解本发明的特征和优点,附图是示意性的而不应该理解为对本发明进行任何限制,在附图中:

[0026] 图1为本发明实施例的高压半导体器件短期失效模型的建模方法的流程图;

[0027] 图2为本发明实施例的高压半导体器件元胞结构示意图;

[0028] 图3为图2所示的高压半导体器件元胞结构的等效电路图;

[0029] 图4为图3所示的等效电路加入考虑雪崩倍增效应的漏电流源的等效电路图;

[0030] 图5为本发明实施例的高压半导体器件的热路模型示意图;

[0031] 图6为本发明实施例的高压半导体器件失效模型整体结构示意图;

[0032] 图7为根据本发明实施例的高压半导体器件失效模型得到的仿真波形。

具体实施方式

[0033] 下面将结合附图对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0034] 如图1所示,本发明实施例提供了一种高压半导体器件短期失效模型的建模方法,包括:

[0035] S1.根据高压半导体器件的内部元胞结构得到该高压半导体器件的正常工作模型。具体地,该正常工作模型可以是热电耦合模型,包括电路模型,参数的温度特性和热路模型。由于IGBT的内部参数随温度发生较大变化,因此IGBT器件特性也随温度变化有所不同。IGBT的热电耦合模型考虑了温度与器件特性之间的相互影响,在IGBT电学模型的基础上又加入了热学模型进行联合仿真,在温度波动较大时可以更准确地仿真器件行为。

[0036] S2.建立根据该高压半导体器件失效后的器件模型。

[0037] S3.检测所述高压半导体器件的工作参数。

[0038] S4.当该工作参数满足失效边界条件时,从该正常工作模型切换到该失效后的器件模型。

[0039] 具体地,失效边界条件和失效后状态是通过分析器件主要的失效模式而得到的。短期失效模式主要包括过压失效、过流失效或过热失效。过压失效是由于IGBT的集射极电压达到雪崩击穿电压后,电流进一步增大,当结温达到基区本征温度时,发生二次击穿,从而造成不可恢复的失效。因此可以认为电压达到IGBT雪崩击穿电压,且器件结温上升至一定值时,器件已经过压失效。集射极过压失效后IGBT器件呈现不同的失效状态。压接器件由于热因素导致的失效最终都会导致器件短路,因此对于压接器件,过压失效后认为器件短路,用一个小电阻($R=0-5$ 欧姆)代替。过流和过热的本质都是热失效,在单个脉冲造成的短期失效行为中,器件结温 T_j 反映了芯片和封装内部热量积累的情况。因此,可以认为器件结温达到器件工作温度上限时器件进入失效。具体地,根据IGBT集射极电压 V_{ce} ,集电极电流 I_c 和结温 T_j 及其相互关系,判定IGBT处于正常工作状态,或发生过压、过流、过热失效。

[0040] 本发明实施例的高压半导体器件短期失效模型的建模方法,通过建立正常工作模型和失效后的模型,并当工作参数满足失效边界条件时,从正常工作模型切换到失效后的模型,从而可以有效地同时描述失效发展过程中的器件行为和器件失效的最终状态。

[0041] 在一个优选的实施例中,该失效后的器件模型包括短路失效模型,该高压半导体器件是压接式器件,当工作参数满足失效边界条件时,从正常工作模型切换到失效后的器件模型,包括:

[0042] 当集射极电压超过雪崩击穿电压或集电极电流大于最大工作电流或结温超过器件可正常工作的最高结温时,切换到该短路失效模型。

[0043] 在另一个优选的实施例中,该失效后的器件模型包括短路失效模型和开路失效模型,该高压半导体器件是模块化封装的器件,当工作参数满足失效边界条件时,从正常工作模型切换到失效后的器件模型,包括:

[0044] 当集射极电压超过雪崩击穿电压时,切换到该短路失效模型;或者

[0045] 当集电极电流大于最大工作电流或结温超过器件可正常工作的最高结温时,切换到该开路失效模型。

[0046] 在另一个优选的实施例中,根据高压半导体器件的内部元胞结构得到高压半导体器件的正常工作模型,包括:

[0047] 建立高压半导体器件的瞬态机理模型;

[0048] 提取瞬态机理模型的模型参数;

[0049] 在瞬态机理模型中该高压半导体器件的漏源极之间加入表述雪崩倍增效应的受控漏电流源;

[0050] 根据该高压半导体器件结构,建立器件热路或热场模型。

[0051] 优选地,该短路失效模型是电阻值范围为 $0\sim 5\ \Omega$ 的电阻器。

[0052] 优选地,该高压半导体器件是IGBT。

[0053] 下面以图2所示的4500V/1800A压装式IGBT为例,进一步地详细说明根据本发明的实施例。

[0054] 一、建立正常工作模型,包括电路模型,参数的温度特性和热路模型:

[0055] 1. 建立电路模型:

[0056] 图2是该IGBT的内部元胞结构,其等效电路模型如图3所示, R_g 为驱动门极电阻。模型主要包含四部分:定值栅极氧化层电容,主要为栅极和发射极之间的栅极电容 C_{ge} 和栅极与集电极间的电容 C_{oxd} ;耗尽层等效变值电容,主要为栅极与集电极间的电容 C_{gdj} 和集电极和发射极间的电容 C_{dsj} ;MOSFET中的n沟道,用压控电流源 I_{mos} 表示;大注入BJT (Bipolar Junction Transistor 双极结型晶体管),主要包含电子电流 I_n 和空穴电流 I_p 。模型给出了栅极g、集电极c和发射极e三个外部端口之间的电压电流关系。

[0057] MOS沟道电流 I_{mos} 表示为

$$[0058] \quad I_{mos} = \begin{cases} 0 & V_{gs} < V_T \\ K_p (V_{gs} - V_T - \frac{V_{ds}}{2}) V_{ds} & V_{ds} \leq V_{gs} - V_T \\ K_p (V_{gs} - V_T)^2 / 2 & V_{ds} > V_{gs} - V_T \end{cases} \quad (1)$$

[0059] 式(1)中 V_{gs} 为等效电路中g和s节点之间的电压, V_{ds} 为等效电路中d和s节点之间的电压, V_T 为MOS沟道的阈值电压, K_p 为沟道跨导参数。

[0060] 栅极电容 C_{ge} 为定值电容,集栅极电容 C_{gd} ,集射极电容 C_{dsj} 为可变电容,表达如下:

$$[0061] \quad C_{gd} = \begin{cases} C_{oxd} & V_{ds} \leq V_{gs} \\ \frac{C_{oxd} C_{gdj}}{(C_{oxd} + C_{gdj})} & V_{ds} > V_{gs} \end{cases} \quad (2)$$

$$[0062] \quad C_{dsj} = (A - A_{gd}) \varepsilon \sqrt{\frac{qN_B}{2\varepsilon V_{ds}}} \quad (3)$$

[0063] 其中

$$[0064] \quad C_{gdj} = A_{gd} \varepsilon \sqrt{\frac{qN_B}{2\varepsilon V_{ds}}} \quad (4)$$

[0065] q 为元电荷电量, ε 为硅的介电常数, A 为基区有效面积, A_{gd} 为 C_{gdj} 对应的耗尽层面积, N_B 为基区掺杂浓度。

[0066] IGBT基区电流由电子电流 I_n 和空穴电流 I_p 两部分构成,其中电子电流从BJT部分栅极流出,空穴电流从BJT的集电极流出。电子电流和空穴电流都由漂移电流和扩散电流两部分组成:

$$[0067] \quad J_n = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (5)$$

$$[0068] \quad J_p = q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (6)$$

[0069] J_n 和 J_p 分别为电子和空穴的电流密度, μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率, D_n 和 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数, n 和 p 分别为电子和空穴浓度, dn/dx 和 dp/dx 表示电子和空穴浓度在基区宽度方向上的分布。基区满足大注入条件,基区内部电子和空穴的浓度近似相等。

[0070]
$$\frac{dp}{dx} = \frac{dn}{dx} \quad (7)$$

[0071] 由

[0072]
$$I_c = A(J_n + J_p) \quad (8)$$

[0073] 式(8)中 I_c 为集电极电流,使用式(7)和式(8)简化式(5-6)可知

[0074]
$$I_n = \frac{D_n}{D_n + D_p} I_c + \frac{2qAD_n D_p}{D_n + D_p} \frac{dp}{dx} \quad (9)$$

[0075]
$$I_p = \frac{D_p}{D_n + D_p} I_c - \frac{2qAD_n D_p}{D_n + D_p} \frac{dp}{dx} \quad (10)$$

[0076] 基区集总电荷为 Q ,由连续性方程有:

[0077]
$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{\tau} + I_{p0} - I_{pw} \quad (11)$$

[0078] τ 为载流子平均寿命, I_{p0} 为集电结处的空穴电流, I_{pw} 为耗尽层处的空穴电流密度,考虑载流子寿命随载流子浓度的变化有

[0079]
$$\tau = \frac{1}{C_p p + 1/\tau_t} \quad (12)$$

[0080] 其中 C_p 表示载流子寿命随载流子浓度变化的系数, τ_t 为载流子浓度很低时的载流子寿命。这里对于 dp/dx 描述中使用一阶近似,并考虑准静态假设。 P_0 为集电结处的载流子浓度。

[0081]
$$I_{pw} = \frac{D_p}{D_n + D_p} I_c + \frac{qAD}{W} P_0 \quad (13)$$

[0082] W 表示基区有效宽度,可以由基区宽度 W_B 减去耗尽层宽度得到

[0083]
$$W = W_B - \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{ds}}{qN_B}} \quad (14)$$

[0084] 这里对于 dp/dx 描述中使用一阶近似,并考虑准静态假设。

[0085] I_{p0} 由 P_0 决定,有

[0086]
$$I_{p0} = I_{cne} - \lambda P_0^2 \quad (15)$$

[0087] 其中 I_{sne} 为发射极饱和电流, n_i 为本征载流子浓度。

[0088]
$$\lambda = I_{sne} / n_i^2 \quad (16)$$

[0089] 为了考虑过压失效工况,在所建立的IGBT模型的MOSFET的漏源极之间加入考虑雪崩倍增效应的漏电流源,如图4所示。

[0090] 其中

[0091]
$$I_{leak} = (M-1)(I_{mos} + I_c) + MI_{gen} \quad (17)$$

[0092] 其中 I_{gen} 为空间电荷区产生的电流, M 为雪崩倍增系数,与击穿电压和集射极电压 V_{ce} 有关。

$$[0093] \quad M = \left(1 - \left(\frac{V_{ce}}{V_{br}} \right)^4 \right)^{-1} \quad (18)$$

[0094] V_{br} 为雪崩击穿电压,与基区掺杂浓度 N_B 有如下关系,

$$[0095] \quad V_{br} = 5.34 \times 10^{13} N_B^{-0.75} \quad (19)$$

[0096] IGBT瞬态机理模型参数可以从数据手册,经验公式和实验波形进行提取。

[0097] 2. 获取参数的温度特性

[0098] 高压IGBT的温度特性主要通过参数随温度的变化规律来体现。提取高压IGBT瞬态机理模型参数后,将随温度变化的参数如电子和空穴的迁移率 μ_n 和 μ_p ,电子和空穴的扩散系数 D_n 和 D_p ,载流子平均寿命 τ ,发射极饱和电流 I_{sne} ,沟道跨导参数 K_p ,阈值电压 V_T ,本征载流子浓度 n_i 写作随结温变化的表达形式,其中 T_0 为基准温度,一般为300k, μ_{n0} , K_{p0} 等为基准温度下的参数值。

$$[0099] \quad \mu_n(T_j) = \mu_{n0} (T_0/T_j)^{-1.2} \quad (20)$$

$$[0100] \quad \mu_p(T_j) = \mu_{p0} (T_0/T_j)^{-1.5} \quad (21)$$

$$[0101] \quad D_p = \mu_p k T_j / q \quad (22)$$

$$[0102] \quad D_n = \mu_n k T_j / q \quad (20)$$

$$[0103] \quad K_p = K_{p0} (T_0/T_j)^{0.8} \quad (24)$$

$$[0104] \quad V_T = V_{T0} - 0.009 (T_j - T_0) \quad (25)$$

$$[0105] \quad n_i = 4.82 \times 10^{15} \left(\frac{m_n m_p}{m_0^2} \right)^{3/4} T^{1.5} e^{-E_g/2kT} \quad (26)$$

$$[0106] \quad \tau = \tau_0 (T_0/T_j)^{-1.5} \quad (27)$$

[0107] I_{sne} 随温度的变化可以采用实验方法测定,这里采用经验公式

$$[0108] \quad I_{sne} = \frac{I_{sne0} (T_j / T_0)^{0.5}}{\exp(14000(1/T_j - 1/T_0))} \quad (28)$$

[0109] 3. 建立热路模型

[0110] IGBT器件的热路或热场模型根据器件和散热器结构建立。这里采用集总参数的RC网络作为热路模型,如图5所示。一般大功率压接式IGBT采用水冷方式散热。 $R_{jc1} \sim R_{jen}$ 及 $C_{jc1} \sim C_{jen}$ 表示IGBT结到壳之间的热阻和热容网络,参数可由IGBT数据手册上的瞬态热阻抗曲线拟合得到。 T_w 为冷却水的温度, R_{hw} 为散热器到冷却水之间的热阻, R_{ch} 和 C_{ch} 为散热器的热阻和热容。

[0111] 由此,可以得到该IGBT的热电耦合模型,将根据器件机理模型计算得到的损耗功率作为热路模型的输入量,热路模型中计算得到的结温即为电学模型中的结温,模型参数随该温度实时变化,将模型进行热电联合仿真。

[0112] 二、设置IGBT失效边界条件

[0113] 高压IGBT短期失效模式主要包括过压失效,过流失效和过热失效。无论上述何种失效条件满足,均认为器件失效,根据不同器件的失效模式,将器件模型切换到失效后的器件模型。

[0114] 具体地,

[0115] 过压失效条件为: $V_{ce}(t) \geq V_{br} \& T_j(t) > T_{th}$;

[0116] 过流失效条件为： $I_c(t) \geq I_{max}$ & $T_j(t) > T_{th}$ ；

[0117] 过热失效条件为： $T_j(t) > T_{max}$ 。

[0118] 其中 I_{max} 为器件的最大工作电流， T_{th} 表示器件过压过流失效的结温阈值， T_{max} 表示器件可正常工作的最高结温。

[0119] 三、设置失效后的器件模型

[0120] 本例所选器件为平板压装器件，上述几种失效最终都会造成器件短路，即此时的器件呈现不受控制的电阻特性，集射极电压 V_{ce} 和集电极电流关系表示为：

$$[0121] \quad V_{ce} = R_f I_c \quad (29)$$

[0122] 由此，得到了该IGBT的短期失效模型，如图6所示。

[0123] 图7还示出了用该模型仿真得到的IGBT短路失效过程中的电压和电流波形。从图7可以看出，器件在3000V的母线电压下正常开通，负载电流为1500A，5 μ s时负载短路，集电极电流 I_c 迅速上升，集射极电压 V_{ce} 也逐渐上升到母线电压。在此过程中器件结温迅速上升，至27 μ s，即短路22 μ s后器件结温达到工作温度上限，此时器件失效转变为电阻特性，由于回路中短路电感的存在，电流会继续上升至更大的值，至30 μ s时给器件发关断信号，而从图7中看出，此时器件已经失效，无法再正常关断短路电流，仍呈现失效后小电阻的特性，说明模型可以准确反映失效过程中的内部物理机制、外部行为和失效最终状态

[0124] 虽然结合附图描述了本发明的实施方式，但是本领域技术人员可以在不脱离本发明的精神和范围的情况下作出各种修改和变型，这样的修改和变型均落入由所附权利要求所限定的范围之内。

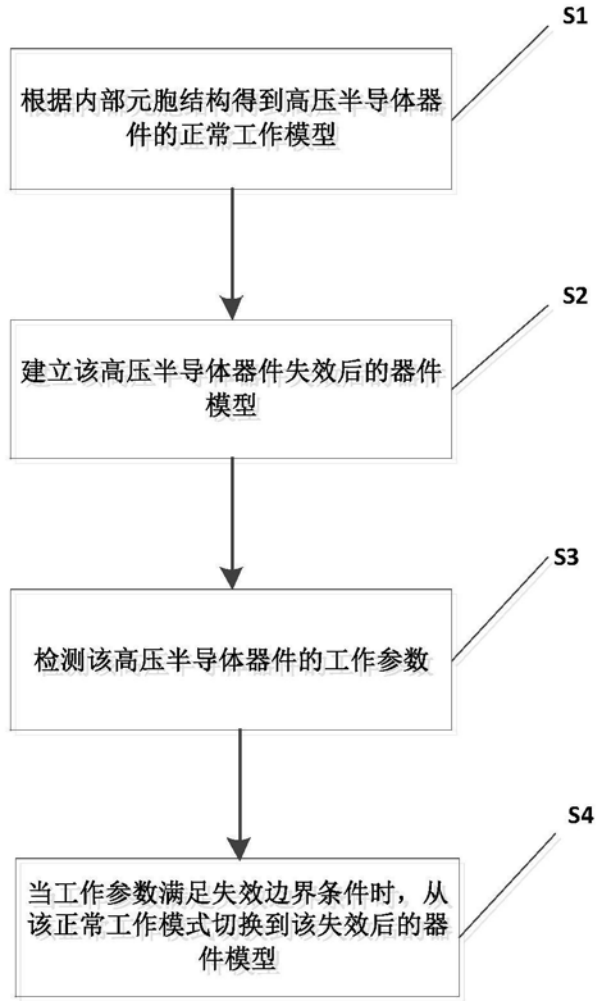


图1

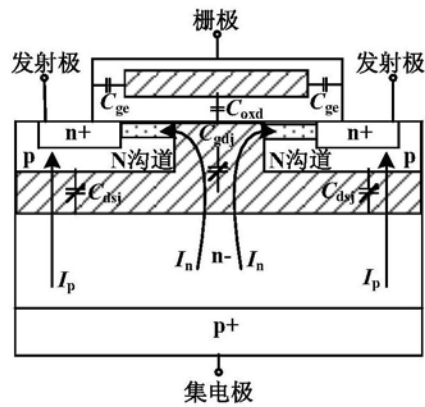


图2

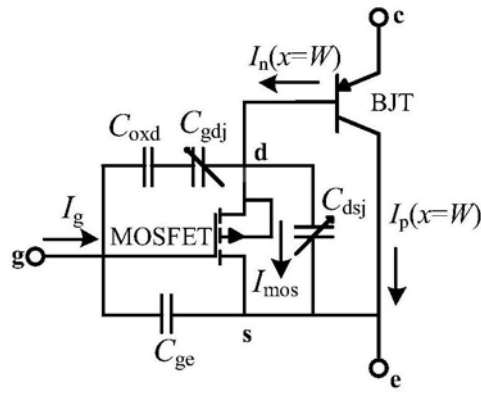


图3

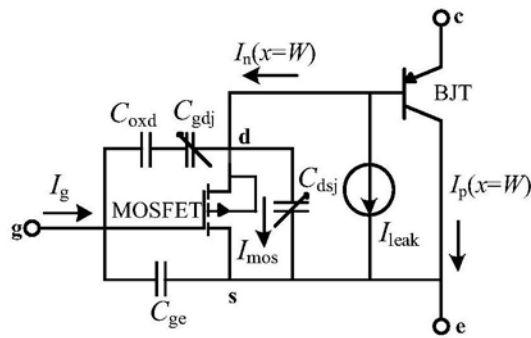


图4

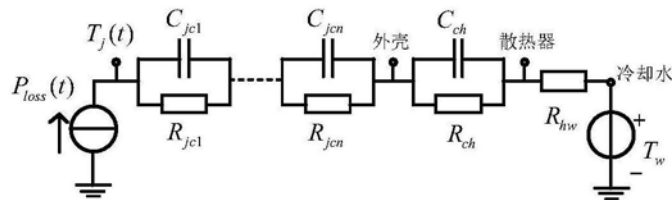


图5

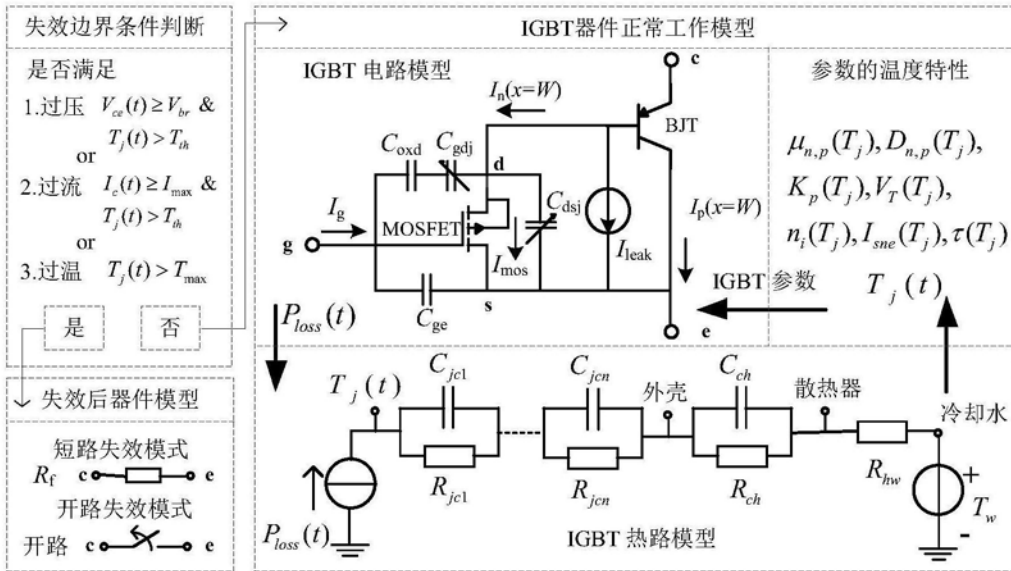


图6

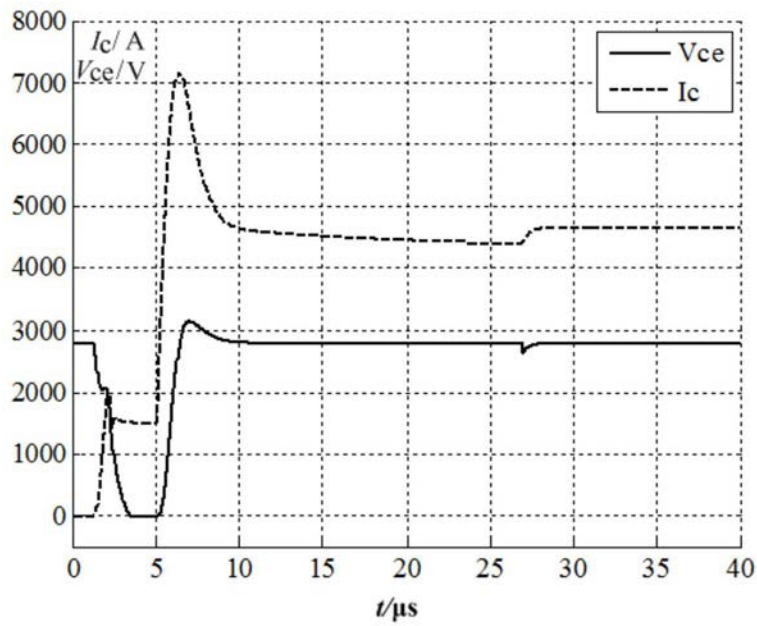


图7