

IGCT 关断暂态温度特性及其电热模型

周亚星^{1,2}, 卫 炜^{1,2}, 王佳蕊³, 孔 力^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 国网吉林省电力有限公司电力科学研究院, 吉林 长春 132000)

摘要:集成门极换流晶闸管(IGCT)广泛应用于高压大功率电力电子装置中,受到环境温度变化和器件自热等影响,其开关特性发生显著改变。本文针对不同温度下的器件开关特性开展了测试实验,利用分阶段解析建模的方法分析了影响器件关断存储、基区承压以及拖尾电流三个阶段的关键温度依赖参数。分析结果表明关断存储阶段主要受到载流子寿命和射极复合系数的影响,但射极复合系数相对于载流子寿命对电流拖尾过程的影响随温度变化更为显著。在此基础上由所得关键参数建立了 IGCT 温度依赖模型,利用封装传热阻容子电路网络建立了器件的结壳传热模型。最后,基于该模型对 IGCT 关断暂态过程进行了电热仿真分析,通过仿真波形与实测波形的比较验证了该模型的准确性以及关键温变参数的影响。

关键词:集成门极换流晶闸管; 关断暂态; 电热模型; 温度特性

DOI: 10.12067/ATEEE1902025 **文章编号:** 1003-3076(2020)04-0008-08 **中图分类号:** TM23

1 引言

集成门极换流晶闸管(Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT)在传统晶闸管的基础上集成了门极硬驱动技术^[1],关断特性接近门极开路晶体管且具备在无缓冲电路条件下开断大电流的能力,因而广泛应用于冶金传动、船舶驱动、直流输电等领域^[2-6]。

受大功率电力电子装置工作环境温度以及半导体器件本身发热等影响,器件芯片结温在工作过程中不断发生改变。硅基半导体材料受温度影响显著,其器件外特性也随温度变化发生较大改变。由于器件工作时芯片结温与电气特性相互耦合,在电力电子电路的电热耦合分析时则需要构建器件的电热模型。单一温度下器件模型引起的特性偏差将在电热耦合过程中被逐渐累积放大,因而不能反映实际工况下的特性。目前对于 IGCT 器件机理以及电热特性的研究仍然较为有限。在应用层面基于 IGCT 的变流器损耗及温升的计算主要依赖于行为模型^[7,8]。而基于半导体数值软件 TCAD(Technolo-

gy Computer Aided Design)的 IGCT 温度特性分析主要是从器件设计角度分析其稳态及击穿特性^[9],仿真过程也欠缺对门极驱动电路、测试电路以及封装传热的考虑。文献[10,11]分别基于傅里叶模型和集总电荷模型建立 IGCT 的电模型以及结壳传热模型,但模型没有考虑 IGCT 射极注入效率的影响,因而导致关断时电流拖尾阶段的拟合精度较差。对于绝缘栅双极晶体管(Insulate Gate Bipolar Transistor, IGBT)的温度特性,文献[12]分析认为载流子寿命是其中关键的温度依赖参数。但 IGCT 采用了门极硬驱动技术和透明阳极结构,其关断退饱和过程不同于传统晶闸管,而且电流拖尾阶段过负载流子的衰减不仅依赖于基区内复合也受到阳极侧电子抽离的影响。因此对于 IGCT 关断暂态温度特性的研究需要根据其器件机理考虑更多除载流子寿命等典型参数之外的影响。

本文通过对 IGCT 温度特性开展测试实验,结合解析建模得出其中关键温变参数,并以此建立电热耦合模型。首先,对不同温度下 IGCT 开关特性进行了实验测试。对关断暂态按存储阶段、基区承

收稿日期: 2019-02-26
基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-JSC025)
作者简介: 周亚星(1989-),男,湖南籍,博士研究生,研究方向为大功率器件数值模型等;
卫 炜(1989-),男,河南籍,博士研究生,研究方向为多电平变换器等。

压以及电流拖尾阶段分别进行了建模分析,得到了不同阶段下占主导影响的载流子寿命、射极复合系数等关键温变参数。其次,根据所得关键参数建立 IGCT 参数温度依赖模型以及器件的结壳封装传热模型,进而在 IGCT 电模型的基础上建立 IGCT 的电热耦合模型。最后,通过实验波形和仿真波形的比较验证该模型的准确性,同时也通过仿真对比验证不同阶段下关键参数的影响。

2 IGCT 关断暂态温度特性分析

2.1 开关暂态特性测试

为对 IGCT 温度特性进行测试,采用 IGCT 数据手册中给出的标准器件双脉冲测试电路,测试电路原理图如图 1 所示。带加热模块的 IGCT 测试台如图 2 所示。将 IGCT 温度分别设定为 25℃、50℃、75℃、100℃ 和 125℃,对其导通和关断暂态的电压、电流数据进行测量。

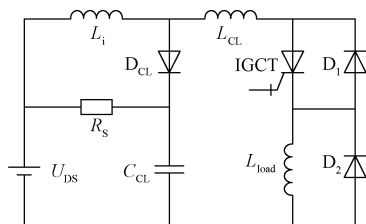


图 1 IGCT 测试电路图

Fig.1 Test circuit of IGCT

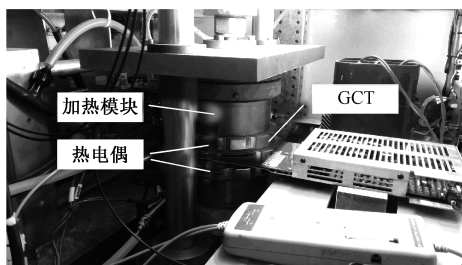
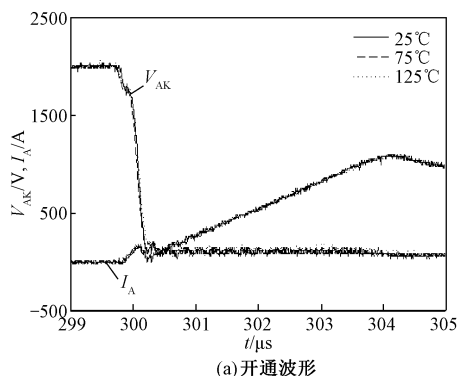


图 2 带加热模块的 IGCT 测试台

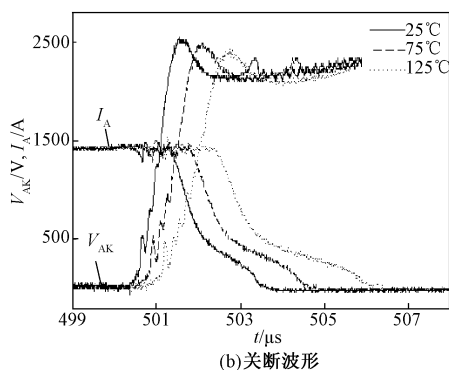
Fig.2 Test platform of IGCT with heater clamp

图 3 为不同温度下,器件开关暂态电流电压波形实验结果对比。对比不同温度下的器件外特性可知,不同温度下开通波形基本重合,温度对于开通过程影响较小。由于开通波形受驱动脉冲、钳位电感、寄生电感和二极管换流的影响,不同温度下器件外特性在纳秒尺度上的差异不能反映 IGCT 物理参数上的变化。

在不同温度下关断波形差异较大。尽管关断过程同样受到 IGCT 反并联二极管反向恢复过程的影



(a) 开通波形



(b) 关断波形

图 3 25℃~125℃下 IGCT 开通和关断波形

Fig.3 Turn-on and turn-off waveforms of IGCT under temperatures from 25℃ to 125℃

响,但其引起的振荡在电压初始上升阶段已基本衰减。另外,关断时第一个电压尖峰受到电路中寄生电感 L_{CL} 的影响,在暂态测试下可以认为 L_{CL} 大小基本不随温度而改变。因此,关断过程不同温度下器件外特性的变化主要由器件本身物理参数的改变引起。图 3(b)中主要变化为:关断电压上升起点随温度升高而延迟;电压上升率随温度升高而减小,第一个电压尖峰峰值降低;关断时电流拖尾过程延长,与之相应的是第一和第二电压尖峰时间延长。以下分阶段对其中温度依赖参数进行分析。

2.2 关断暂态各阶段关键温变参数分析

IGCT 关断过程较为复杂,这里将其简单分为存储阶段、耗尽承压以及电流拖尾三个阶段。分阶段处理的优势在于,各阶段内部分物理量保持恒定或线性变化,因而可以进行解析建模。利用解析模型可以直观地分析出各个阶段占主导影响的温度依赖参数,由此可以得到其中关键参数建立电热耦合模型。

2.2.1 存储阶段

IGCT 由集成门极驱动电路与门极换流晶闸管 (Gate Commutated Thyristor, GCT) 组成。如图 1 所

示,IGCT由N⁺区、P基区、N基区、N缓冲层以及P⁺区构成。存储阶段包括器件从阴极到门极换流和P基区载流子抽离两个过程。由于IGCT采用集成门极进行强迫换流,换流时间远小于P基区载流子抽离时间。因此存储时间近似为从门阴极PN结反偏截止到N基区建立耗尽承压的负电压持续时间。

IGCT掺杂及稳态电流分布如图4所示。其中,两条实线分别为电子电流 I_n 、空穴电流 I_p ,虚线为掺杂浓度分布。任一载流子位移形成的电流可以认为是由基区复合电流和发射极复合或透过电流两部分构成。因此,基区内复合电流等于空穴流从阳极至阴极的衰减量(电子电流即为从阴极至阳极衰减),得到:

$$J_R = J_A - J_h = \int_l^r \frac{qn(x)}{\tau_{HL}} dx \quad (1)$$

式中, J_R 为复合电流密度; J_A 为阳极电流密度; J_h 为发射极电子或空穴复合电流密度; q 为单位电荷; τ_{HL} 为大注入下载流子寿命; r 为右边界; l 为左边界; n 为过剩载流子浓度。

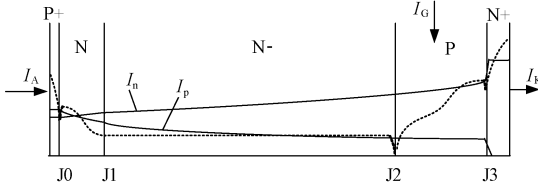


图4 IGCT掺杂及稳态电流分布示意图

Fig.4 Diagram of IGCT doping concentration and current distribution during on state

由式(1)可以估计P基区载流子浓度,得到:

$$n_{av} = \frac{J_R \tau_{HL}}{q(W_P + W_N)} \quad (2)$$

式中, n_{av} 为平均过剩载流子浓度; W_P 和 W_N 分别为P基区和N基区宽度。

存储时间等于P基区过剩电荷的抽离时间^[13]:

$$t_s = \frac{(J_A - J_h) \tau_{HL} W_P}{J_G (W_P + W_N)} \quad (3)$$

式中, t_s 为存储时间; J_G 为门极电流密度,由于IGCT为强迫换流,此时 $J_G \geq J_A$ 。

发射极复合系数与载流子扩散系数以及终端区域少子寿命相关,近似表示为^[14]:

$$h \approx \frac{1}{N} \sqrt{\frac{D}{\tau}} \quad (4)$$

式中, D 为扩散系数; N 为掺杂浓度; τ 为载流子寿命; h 为发射极复合系数,在N型或P型掺杂中分别

对应为空穴或电子。

由式(3)可得,当关断电流恒定,存储时间受到载流子寿命和器件基区宽度影响。负电压阶段不同温度下的关断电压波形如图5所示,存储时间随温度的升高而显著增加。由以上推导可知,影响存储时间的关键温变参数包括载流子寿命和发射极复合系数。其中,载流子寿命与其为正相关,而复合系数为负相关。

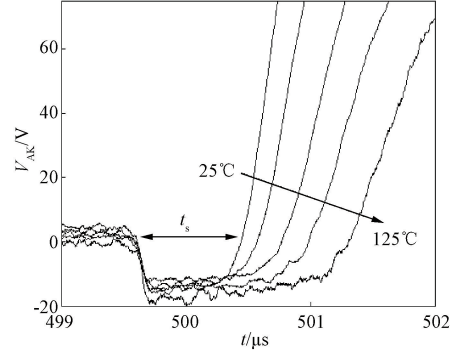


图5 负电压阶段不同温度下关断电压波形

Fig.5 Voltage waveforms with different temperature during negative voltage interval

2.2.2 耗尽承压阶段

当器件P基区完成退饱和,其不再向N基区注入电子,阴极侧PN结J2的低掺杂侧进而出现耗尽承压。器件承压与耗尽区电荷分布有关,耗尽区模型可由泊松方程得到:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon} (p_{eff} + N_d) \quad (5)$$

式中, ϵ 为介电常数; ψ 为电势; p_{eff} 为耗尽区电流产生的有效电荷浓度; N_d 为基区背景掺杂浓度。

在N基器件中,耗尽区产生的电场方向指向P基区,因此从准中性区进入耗尽区的载流子主要为空穴。假设载流子在电场的作用下速度达到饱和,此时可以认为耗尽区空穴浓度为均匀分布,关断时基区载流子分布如图6所示。耗尽区宽度 w_{sc} 与耗尽区承压 V_a 关系式为:

$$w_{sc} = \sqrt{\frac{2\epsilon V_a}{q[N_d + J_A/(qv_{sat})]}} \quad (6)$$

式中, v_{sat} 为饱和载流子漂移速度。

在器件建立承压阶段,耗尽宽度随承压增加,因此耗尽边界的移动等效于准中性区电荷的抽离。假设耗尽区漂移电流等于阳极电流,得到^[13]:

$$J_A = qn_{av} \frac{\partial w_{sc}}{\partial t} \quad (7)$$

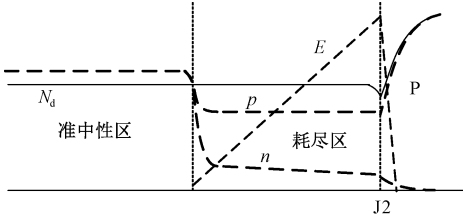


图6 关断时N基区载流子分布示意图

Fig.6 Diagram of carrier distribution of N base during turn off

综合式(6)和式(7),再对时间积分,可得:

$$V_a = \frac{[N_d + J_A / (qv_{sat})] J_A^2}{2q\epsilon n_{av}^2} t^2 \quad (8)$$

图7为不同温度下的关断电压波形,随温度的升高电压变化率减小且电压峰值也随之降低。由以上推导可得,电压上升阶段的电压变化率受到参数 v_{sat} 和 n_{av} 的影响。 n_{av} 正比于载流子寿命因而正比于温度,而 v_{sat} 与温度为负相关。综合实验测试结果可知, v_{sat} 对电压变化率的影响小于 n_{av} 。

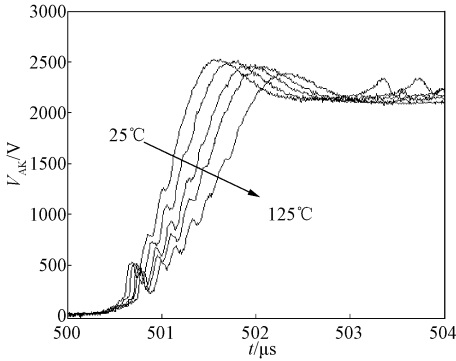


图7 电压上升阶段不同温度下关断电压波形

Fig.7 Voltage waveforms with different temperature during voltage rising interval

2.2.3 电流拖尾阶段

感性负载下,器件阳极电流在建立承压后才开始下降。电流下降初始受器件承压受回路寄生电感的影响,但在电流拖尾阶段阳极电流衰减与基区过剩载流子衰减直接相关。在器件关断建立稳定承压后,基区耗尽边界基本不再移动,因而准中性区宽度基本固定。假设基区过剩载流子为准中性、大注入、线性分布,得到拖尾电流 I_T 与准中性区存储电荷 Q 的关系式^[15]:

$$I_T(t) = \frac{4D_p}{W^2} Q(t) \quad (9)$$

式中, Q 为准中性区电荷总量; W 为准中性区宽度; D_p 为空穴扩散系数。

器件关断时基区电荷的描述可由电荷存储模型表示,对电子电流连续方程进行积分得到^[15]:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{\tau_{HL}} - I_n(0) \quad (10)$$

式中, I_n 为阳极侧电子电流,即透明阳极穿透电流。

式(10)表明,过剩载流子的衰减由载流子本身的复合以及注入阳极电子电流 I_n 引起的载流子减少共同决定。

联立求解式(9)和式(10),得到:

$$\frac{dI_T/dt}{I_T} = -\frac{1}{\tau_{HL}} - \frac{I_n}{I_T} \frac{W^2}{4D_p} \quad (11)$$

在给定温度下,阳极电流与总电流比值基本恒定。不同温度下关断电流波形如图8所示,拖尾电流的衰减随温度升高而减缓。式(11)表明,在器件电压穿通前,阳极电流大小以指数衰减。同时,式(11)也表明电流衰减同时受到载流子寿命和阳极电子电流对过剩载流子抽离的影响。

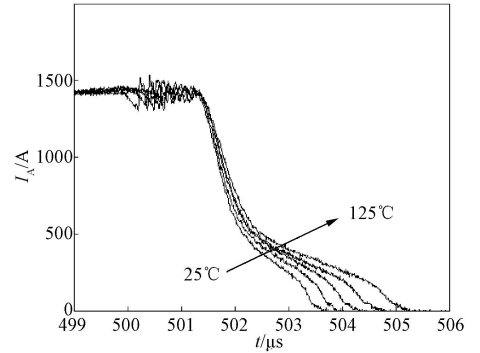


图8 电流拖尾阶段不同温度下关断电流波形

Fig.8 Current waveforms with different temperature during current-tail interval

3 IGCT 参数温度依赖和封装结壳传热模型

温度对器件外特性的影响可以分为两个方面:温度对半导体基本物理参数的影响和器件封装结构对芯片散热的影响。

3.1 参数温度依赖模型

在功率半导体器件模型中,受温度影响的基本物理参数包括载流子寿命 τ 、迁移率 μ 、本征载流子浓度 n_i 、载流子饱和和漂移速度 v_{sat} 、碰撞电离系数以及禁带宽度相关的参数等等。建立电路级器件模型仅需考虑以上分析的主要参数,总结如表1所示。其中,关联参数一项包括了与复合过程相关的本征载流子浓度 n_i 以及考虑载流子非饱和时的迁移率

参数 μ 。以下分别对各参数模型进行说明。

表 1 IGBT 关断暂态温度依赖参数

Tab.1 Key parameters of IGBT during turn off transient		
关断阶段	等效参数	关联参数
存储阶段	h, τ	μ, τ, n_i
基区承压阶段	τ, v_{sat}	$v_{\text{sat}}, \mu, \tau, n_i$
电流拖尾阶段	h, τ	μ, τ, n_i

大注入下载流子寿命等于电子和空穴寿命之和,其参数温度依赖模型为^[16]:

$$\tau_{\text{HL}} = \tau_n \left(\frac{T}{300} \right)^{1.77} + \tau_p \left(\frac{T}{300} \right)^{0.57} \quad (12)$$

式中, τ_n 为电子寿命; τ_p 为空穴寿命。

对于基区承压阶段,载流子饱和漂移速度的变化引起耗尽区等效正电荷浓度的变化。这一过程与载流子的移动速度相关,因此实际模型需要考虑载流子在耗尽区电场作用下的加速过程,即考虑迁移率模型,其温度依赖方程包括^[10]:

$$\mu_n = 1360 \left(\frac{T}{300} \right)^{-2.423} \quad (13)$$

$$\mu_p = 495 \left(\frac{T}{300} \right)^{-2.2} \quad (14)$$

式中, μ_n, μ_p 分别为电子及空穴迁移率。

载流子饱和漂移速度温度依赖模型为^[17]:

$$v_{\text{sat}} = 8.37e^6 \left(\frac{300}{T} \right)^{0.52} \quad (15)$$

对载流子复合过程,其温度依赖参数包括本征浓度和载流子寿命。本征浓度的乘积对应平衡态下电子和空穴浓度的乘积,因此本征浓度影响了过剩载流子恢复到平衡态的速度。本征浓度温度依赖模型表示为^[10]:

$$n_i = 3.87 \times 10^{16} T^{1.5} \exp \frac{-7.02 \times 10^3}{T} \quad (16)$$

阳极侧过剩载流子及电流分布如图 9 所示。阳极侧过剩电子浓度 δn_p 分布可由稳态下的双极扩散方程求解得到,其满足双曲分布:

$$\delta n_p(x) = n_p \frac{\sinh[(x_n + W_p - x)/L_n]}{\sinh(W_p/L_n)} \quad (17)$$

式中, L_n 为电子扩散长度。

由于阳极厚度远小于电子扩散长度 L_n ,对 \sinh 项进行线性近似得到:

$$\delta n_p(x) = n_p \frac{x_n + W_p - x}{W_p} \quad (18)$$

假设阳极侧少数电流主要为扩散电流,有:

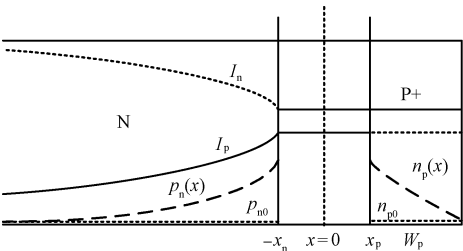


图 9 阳极侧过剩载流子及电流分布示意图

Fig.9 Diagram of excess carrier and current distribution

$$J_n \approx \frac{eD_n n_p}{W_p} = h_n n_p \quad (19)$$

式中, n_p 为阳极侧 PN 结过剩电子浓度; D_n 为电子扩散系数,其与电子迁移率满足关系 $D_n = \mu_n V_T$ 。

以上分析结果表明,P 基区少数电流与少数扩散长度无关,即与透明阳极区域寿命参数无关($L_n^2 = D\tau$)。由式(19)可知阳极侧复合系数 h_n 随温度变化与载流子迁移率参数接近。

3.2 封装结壳传热模型

IGCT 封装结构如图 10 所示^[18],芯片及封装涉及的材料包括硅、铝、铜以及铜。除了在芯片 P 基区铝元素扩散形成部分 P 掺杂分布外,在芯片表面存在 8~10 μm 厚度的铝电极已与硅片构成良好的欧姆接触。在铝层外,铜片因热膨胀系数小夹在硅片两侧以防止芯片损坏,铜块作为最外侧材料实现与外电路的压接。

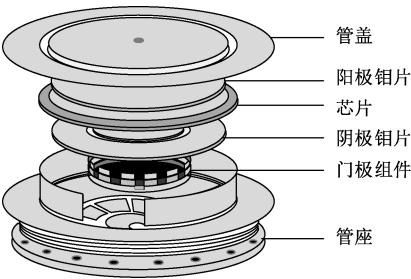


图 10 GCT 封装结构示意图

Fig.10 Diagram of GCT package

一维情形下热传导方程表示如下^[19]:

$$P_{\text{in}} = -\lambda A \frac{dT}{dl} + \rho c l A \frac{dT}{dt} \quad (20)$$

式中, P_{in} 为热源实时功率; λ 为材料热导系数; c 为材料比热容; ρ 为材料密度; l 和 A 分别为材料的长度和面积。

IGCT 实时功率由 GCT 和集成驱动电路功率两部分组成:

$$P_{\text{Si}} = V_{\text{AK}} I_{\text{A}} + V_{\text{GK}} I_{\text{G}} \quad (21)$$

按材料区域对式(20)进行差分离散,得到:

$$P_{in} = \frac{T_{in} - T_{out}}{R} + C \frac{dT}{dt} \quad (22)$$

式中, T_{in} 和 T_{out} 分别为输入、输出温度;热阻 R 和热容 C 为:

$$R = \frac{l}{\lambda A} \quad (23)$$

$$C = \rho c l A \quad (24)$$

由 GCT 封装中各材料参数得到等效热阻和热容如表 2 所示。

表 2 计算中各参数取值

Tab.2 Value of parameters during calculation

参数	数值			
	硅(Si)	铝(Al)	钼(Mo)	铜(Cu)
密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.33	3.97	10.20	8.96
比热容 $c/(\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K}))$	0.70	0.76	0.25	0.375
热导 $\lambda/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	148	36	138	401
面积 A_A/cm^2	65.0	65.0	54.1	41.6
厚度 l_A/cm	0.0265	1e-3	0.206	1.03
热阻 $R_A/(\text{K}/\text{W})$	2.7e-4	4.3e-5	2.8e-3	6.2e-3
热容 $C_A/(\text{J}/\text{W})$	2.81	0.20	28.42	147.80
面积 A_K/cm^2	12.3, 65.0	12.3	45.4	32.0
厚度 l_K/cm	1.5e-3, 0.025	1e-3	0.206	1.03
热阻 $R_K/(\text{K}/\text{W})$	8e-5, 2.6e-4	3.3e-3	8e-3	2.3e-4
热容 $C_K/(\text{J}/\text{W})$	0.03, 2.65	0.037	23.87	113.70

封装传热热阻网络电路模型示意图如图 11 所示。仿真时为保证传热模型的精度,对同一材料对应的热阻热容进行进一步的子网络离散串联。图 11 中 IGCT 实时功率 P_{AK} 作为等效电流源输入,电路节点电压 T 和 T_a 分别对应 GCT 结温和环境温度。由于芯片门极与阴极位于同一侧,因而阴极侧等效面积较小。考虑到芯片本身有效面积减少的因素,本文将阴极侧芯片分成阴极 N+区和硅片中点到阴极侧 PN 结两部分。图 11 中所示的封装热阻网络模型中的输入为 IGCT 瞬时功率,输出为芯片结温。而 IGCT 电模型中的输入包括了芯片结温,并输出器件电流电压外特性。由此,IGCT 电模型和传热模型的联合构成了耦合仿真过程。

4 IGCT 电热耦合模型实现及验证

4.1 基于 DDM 的 IGCT 物理模型

IGCT 电热模型由基于器件物理的电气模型和传热模型两部分构成。对于物理模型部分,本文采用了微米级功率半导体基本模型:漂移扩散模型

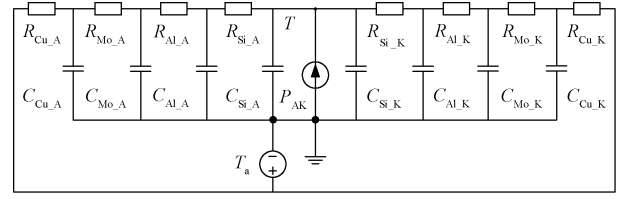


图 11 GCT 封装热阻网络模型示意图

Fig.11 Diagram of thermal impedance network of GCT package

(Drift-Diffusion Model, DDM) 作为基本建模方程。由于 GCT 门极与阴极位于芯片同一侧,且阴极梳条交叉排列的结构减小了如普通晶闸管结构中的导通横向扩展时间,因而确保了开通电流的均匀性,结构上引起的二维效应被最小化,因此一维模型即可反映器件的外特性。DDM 方程组包括:泊松方程、电子及空穴电流连续性方程、电子及空穴电流密度方程,一维情形下写成如下形式^[16]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon} (p - n + N_{D+} - N_{A-}) \quad (25)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} - R \quad (26)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} - R \quad (27)$$

$$J_n = q\mu_n (-n \frac{\partial \psi}{\partial x} + V_T \frac{\partial n}{\partial x}) \quad (28)$$

$$J_p = q\mu_p (-p \frac{\partial \psi}{\partial x} - V_T \frac{\partial p}{\partial x}) \quad (29)$$

式中, p 、 n 分别为空穴浓度及电子浓度; N_{D+} 、 N_{A-} 分别为 n 型及 p 型掺杂浓度; J_n 、 J_p 分别为电子及空穴电流密度; μ_n 、 μ_p 分别为电子及空穴迁移率; R 为复合率; V_T 为热电压。

由于本文主要讨论温度模型的建立,此处仅对电气模型建模关键环节进行阐述。由于该模型的建立主要应用于电路级仿真模拟,模型在考虑精度的基础上需保证其求解速度以及收敛性。首先,由于 DDM 方程中载流子浓度和电场分布耦合在一起,这种耦合描述了关断 N 基区承压、开通时的电导调制等决定器件外特性的过程,同时也导致模型在仿真计算时的收敛性较差。为解决载流子浓度与电势指数关系引起的数值振荡问题,采用 S-G 迎风格式^[20]对电流密度方程离散如下:

$$J_n = \frac{qV_n\mu_n}{\Delta x} [n_{i+1}B(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{V_T}) - n_iB(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{V_T})] \quad (30)$$

$$J_p = \frac{qV_T\mu_p}{\Delta x} \left[p_i B \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{V_T} \right) - p_{i+1} B \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{V_T} \right) \right]$$

(31)

式中, B 为伯努利方程:

$$B = \frac{x}{e^x - 1}$$

(32)

其次,由图 4 中所示的掺杂分布可知,器件基区为所有区域中的低掺杂区域,在器件开关过程中基区出现电导调制效应或在低掺杂区出现单边耗尽承压。因此,本文仅对基区进行数值离散求解,器件阴极侧 PN 结的解析建模在文献[10]中已有介绍。

IGCT 模型方程离散后利用 Matlab/Simulink 环境下的 s 函数进行求解。模型中采用电流输入和由 s 函数计算的电压经 Simulink 中受控电压源模型作为输出,从而实现 IGCT 数值模型和电路中集总元件的联立求解。

4.2 电热模型仿真与实验对比

不同温度下仿真与实验关断波形对比如图 12 所示,仿真及实验波形较高的一致性表明了模型的准确性。图 12 中主要的差异在于,关断电压上升初始阶段,IGCT 反并联二极管反向恢复过程存在一定电流振荡,该振荡引起的感应电压叠加在电压测量端,因而仿真不能模拟此电压波动过程。

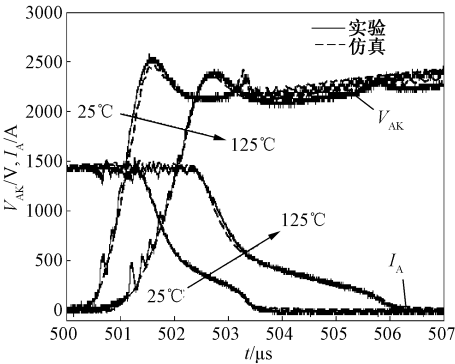


图 12 不同温度下仿真与实验关断波形对比
Fig.12 Comparison of simulation and experiment waveforms of turn off with different temperature

不同温变参数的影响对比如图 13 所示,图 13 中仿真波形为该参数不随温度改变的仿真结果。对比各仿真波形可知,由于复合系数和载流子寿命直接影响 P 基区载流子浓度,在关断存储阶段尚未建立承压时,当以上两者采用 25℃ 下的参数值,其对应的电压上升时间点明显提前。由图 13 可知,存储

时间并未受迁移率参数和饱和载流子漂移速度参数的影响,这与 2.2.1 节中分析结果相一致。

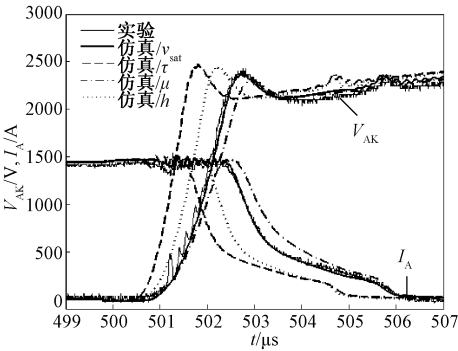


图 13 不同温变参数的影响对比
Fig.13 Comparison of influence of different temperature dependent parameters

在基区承压阶段,由仿真和实验对比结果可知,电压变化率受载流子寿命和迁移率两个参数的影响。由于载流子在进入耗尽区时存在加速过程,载流子迁移率大小与温度为负相关。采用 25℃ 下的迁移率参数值等效了较低的耗尽区空穴浓度,因此对应的仿真波形中电压变化率相对实际值较小。除此之外,载流子饱和漂移速度受温度减小的幅值较小,因而基本不影响到器件外特性。

在电流拖尾阶段,采用 25℃ 下的载流子寿命参数和复合系数均使得拖尾时间缩短,但相比较而言复合系数的影响更为显著。仿真结果也说明了 IGCT 透明阳极结构对关断时载流子的抽离有着显著影响,阳极侧电子的抽离相对于载流子本身的复合随温度变化的影响更大。

5 结论

本文通过不同温度下 IGCT 测试分析得到了影响器件特性的温变参数模型,建立了 IGCT 电热仿真模型,并对器件暂态电热特性进行了分析验证。

对不同温度下 IGCT 开关过程的测试结果表明,温度主要影响其关断过程,且器件随温度的升高关断显著延迟。其中,影响关断存储时间的关键温变参数为载流子寿命参数和复合系数;影响关断电压变化率主要为载流子寿命和迁移率参数;拖尾电流的衰减受到载流子寿命参数的直接影响,但在温度敏感性上阳极侧复合系数的影响对电流拖尾过程更为显著。

参考文献 (References):

- [1] Carroll E, Klaka S, Linder S. Integrated gate-commutated thyristors: a new approach to high power electronics [A]. Proceedings of IEEE IEMDC IGCT Press Conference [C]. Milwaukee, USA, 1997. 1-12.
- [2] ABB Switzerland Ltd. Applying IGCT gate units; 5SYA2031-04 [R]. 2013.
- [3] 吴煜东, 陈芳林, 雷云, 等 (Wu Yudong, Chen Fanglin, Lei Yun, et al.). 集成门极换流晶闸管特性研究 (Research on the performance of integrated gate commutated thyristor) [J]. 大功率变流技术 (High Power Converter Technology), 2012, (6): 1-4.
- [4] 张波, 葛琼璇, 王晓新, 等 (Zhang Bo, Ge Qiongxiuan, Wang Xiaoxin, et al.). 三电平 ANPC 变流器中点电位控制策略研究 (Research on neutral point potential balancing for three-level ANPC converter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 1-7.
- [5] 李武华, 陈玉香, 罗皓泽, 等 (Li Wuhua, Chen Yuxiang, Luo Haoze, et al.). 大容量电力电子器件结温提取原理综述及展望 (Review and prospect of junction temperature extraction principle of high power semiconductor devices) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (13): 3546-3557.
- [6] 方春恩, 李威, 李先敏, 等 (Fang Chun'en, Li Wei, Li Xianmin, et al.). PIN 型功率二极管动态特性物理模型参数提取 (Pin power diode dynamic behavior and physics-based model parameter extraction method) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (6): 208-215.
- [7] 袁立强, 赵争鸣, 白华, 等 (Yuan Liqiang, Zhao Zhengming, Bai Hua, et al.). 用于大功率变流器的 IGCT 功能型模型 (The functional model of IGCTs for the circuit simulation of high-voltage converters) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2004, 24 (6): 65-69.
- [8] 王成胜, 李崇坚, 李耀华, 等 (Wang Chengsheng, Li Chongjian, Li Yaohua, et al.). IGCT 器件工作过程损耗分析 (Analysis on the loss of IGCT) [J]. 控制工程 (Control of Engineering of China), 2009, 16 (S3): 33-36.
- [9] Zhang R, Gao Y, Wang C, et al. Analysis of GCT temperature characteristics [A]. Power Electronics and Motion Control Conference [C]. Wuhan, China, 2009. 1217-1219.
- [10] Wang X, Caiafa A, Hudgins J, et al. Implementation and validation of a physics-based circuit model for IGCT with full temperature dependencies [A]. IEEE 35th Power Electronics Specialists Conference (PESC) [C]. Aachen, Germany, 2004. 597-603.
- [11] Wang X, Caiafa A, Hudgins J, et al. Temperature effects on IGCT performance [A]. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference [C]. Salt Lake City, USA, 2003. 1006-1011.
- [12] 唐勇, 汪波, 陈明 (Tang Yong, Wang Bo, Chen Ming). IGBT 开关瞬态的温度特性与电热仿真模型 (Temperature characteristic and electric thermal model of IGBT switching transient) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (12): 146-153.
- [13] Baliga B. Fundamentals of power semiconductor devices [M]. New York: Science Business Media Springer, 2008.
- [14] 卢茨 (Josef L). 功率半导体器件: 原理、特性和可靠性 (Semiconductor power devices: physics, characteristics, reliability) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2013.
- [15] Hefner A R. Characterization and modeling of the power insulated gate bipolar transistor [D]. Maryland: University of Maryland, 1987.
- [16] Silvaco Inc. ATLAS User's Manual [Z].
- [17] 张朋 (Zhang Peng). IGBT 模块电气特性建模方法研究 (Research on electrical modeling method of IGBT module) [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences), 2012.
- [18] 曾文彬, 颜骥, 任亚东, 等 (Zeng Wenbin, Yan Ji, Ren Yadong, et al.). IGCT 晶片的封装结构设计 (Package structure design of IGCT wafer) [J]. 大功率变流技术 (High Power Converter Technology), 2015, (6): 20-24.
- [19] 王佳蕊, 孔力, 周亚星, 等 (Wang Jiarui, Kong Li, Zhou Yaxing, et al.). 基于物理的 IGCT 电路模型参数提取方法 (Parameter extraction method of IGCT circuit model based on physics) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 1-11.
- [20] Scharfetter D L, Gummel H K. Large-signal analysis of a silicon read diode oscillator [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1969, 16 (1): 64-77.

Temperature characteristics of IGCT turn-off transient and its
electro-thermal model

ZHOU Ya-xing^{1,2}, WEI Wei^{1,2}, WANG Jia-rui³, KONG Li^{1,2}

(1.Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3.State Grid Jilin Electric Power Research Institute, Changchun 132000, China)

Abstract: Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT) is widely used in high-voltage power electronics, and its switching performance is greatly affected by working temperature and self-heating effect. In this paper, the experiments of switching transient under different temperature is conducted; and the key temperature dependent parameters which is associated with different interval: turn off storage, n base voltage withstanding, and current tail are studied separately by using analytical modeling methods. The analytical model shows that the turn off interval is affected by carrier lifetime and the emitter recombination coefficient, but the former affects the current tail interval more obviously. Based on the key parameters, the temperature dependent parameter models of IGCT are developed, and the junction-case heat-conduction model is developed by equivalent circuit network of thermal resistance and thermal capacitance of package. Finally, the turn off transient simulation based on the proposed model is conducted to analyze the electro-thermal characteristic, and the comparison of electro-thermal simulation and experiment results has verified the accuracy of the proposed model and the influence of the key parameters of the electro-thermal model.

Key words: integrated gate commutated thyristor (IGCT); turn-off transient; electro-thermal model; temperature characteristic