

IGCT 载流子寿命分布特性及参数提取方法研究

周亚星^{1,2}, 陈芳林³, 王佳蕊⁴, 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. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;
4. 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)物理模型中载流子寿命与器件动静态特性有着密切联系。现有基于器件关断拖尾电流的载流子寿命参数提取方法,假设关断拖尾电流的衰减主要取决于基区载流子的复合而忽略了阳极电子电流的影响,但 IGCT 采用透明阳极结构增强了关断时阳极电子的抽离,因此将该方法应用于 IGCT 存在不足。本文基于掺杂浓度依赖的载流子寿命模型和肖克莱-里德-霍尔(SRH)复合模型,分析了不同区域下载流子寿命的耦合关系;当透明阳极厚度远小于少子扩散长度,将透明阳极侧 PN 结等效为短二极管,分析了其少数载流子和电流分布特性,并由此提出载流子寿命参数提取的改进方法。最后,根据载流子等效寿命随外加电压变化的特性,实验提取了不同区域下的载流子寿命参数,通过器件双脉冲仿真及实验结果对比验证了参数提取结果的有效性。

关键词:集成门极换流晶闸管;载流子寿命;参数提取;透明阳极

DOI: 10.12067/ATEEE1812004 **文章编号:** 1003-3076(2020)02-0001-09 **中图分类号:** TM23

1 引言

集成门极换流晶闸管(Integrated Gate Commutated Thyristor,IGCT)由于采用了透明阳极、缓冲层结构以及门极硬驱动技术^[1,2],使其拥有晶闸管的通态特性和接近双极型晶体管的关断特性。由于其开关功率大、通态损耗低以及浪涌能力强等优势,IGCT 在冶金传动、船舶驱动、直流输电等领域仍是优选器件^[3]。

高精度的功率器件物理模型在进行微纳秒级时间尺度电路分析时发挥着重要的作用。近年来随着 IGCT 的推广应用,其物理建模及模型的参数提取成为 IGCT 相关研究的热点之一^[4-6]。其中,载流子寿命参数与器件动态特性、静态特性以及器件可靠性都有着密切联系。对于功率器件,少子寿命更是主要的特征参数之一。基于外特性的少子寿命参数的实验提取方法包括:开路电压衰减法^[7]、反向电流衰减法、频率法以及存储电荷法等^[8]。其中,开路

电压衰减法和反向电流衰减法只适用于功率二极管,且频率法只适用于小注入状态下测量^[9]。在功率器件建模研究中,参数的提取不仅仅限于长基区少子寿命,模型中涉及的参数需分区域和器件大小注入状态分别确定。与存储电荷法类似,文献[9]针对双极型功率器件绝缘栅双极晶体管(Insulate Gate Bipolar Transistor,IGBT)模型,提出了基于关断拖尾电流的基区大注入状态下载流子寿命参数的提取方法。文献[10,11]分别将该方法应用于门极可关断晶闸管(Gate Turn-Off thyristor, GTO)和 IGCT 等器件模型的参数提取中。利用器件外特性实验提取所得参数的准确性本身依赖于对器件机理的认识程度和器件模型的准确性。基于关断拖尾电流提取方法应用于 IGCT 的不足在于:该方法假设拖尾电流的衰减主要取决于基区载流子的复合作用,但 IGCT 透明阳极结构增强了关断时阳极电子电流密度,因此采用此方法将造成提取的载流子寿命参数小于实际值(用复合过程等效了透明阳极电子的抽

收稿日期: 2018-12-04
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;
陈芳林(1977-),女,湖南籍,高级工程师,研究方向为 IGCT 器件工艺等。

离)。另外,文献[11,12]利用不同钳位电压下的实验测试得到了缓冲层少子寿命,但对于 P 基区寿命参数则需要获取器件驱动开通延迟时间等参数。由于 IGCT 为驱动集成封装,延迟时间等参数测量实现极为困难,因而影响到参数提取的准确性。

针对以上问题,本文基于已有的载流子寿命参数提取方法,通过分析 IGCT 芯片中不同区域载流子寿命受掺杂和注入水平影响所呈现的分布特性,以及透明阳极结构电子输运对基区载流子复合的影响,提出载流子寿命参数提取的改进方法。首先,本文以非对称型 4500V/4000A IGCT 为对象,讨论了其物理模型涉及的基本参数,以及现有基于关断拖尾电流参数提取方法应用于 IGCT 模型的不足。其次,假设电子和空穴寿命的基值恒定,基于掺杂浓度依赖的载流子寿命模型和肖克莱-里德-霍尔(Shockley-Read-Hall, SRH)复合模型^[13],分析了器件各区域载流子寿命的耦合关系;将透明阳极结构等效为短二极管进行分析,得到了阳极侧电流分布特性;在此基础上对已有方法进行改进,并通过不同母线电压下器件关断实验提取了不同区域的载流子寿命参数。最后,在不同外加电压和负载电流下,采用该参数的器件模型仿真和实验对比验证了模型参数提取的准确性。

2 IGCT 基本模型及参数

IGCT 晶圆部分为典型的晶闸管结构,如图 1 所示。门极换流晶闸管(Gate Commutated Thyristor, GCT)由 P⁺透明阳极区、N 缓冲层、N 基区、P 基区、N⁺阴极区组成,A、K、G 分别为阳极、阴极和门极端子^[6]。IGCT 为电流型器件,与 IGBT 所不同的是,IGCT 基区多子的注入不依赖反型层因而不存在横向电场。因此,一维建模即可以反映器件的外特性。

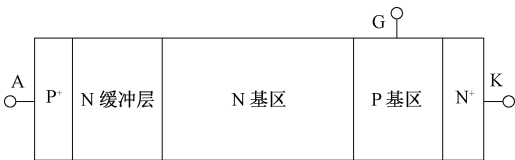


图 1 GCT 结构示意图

Fig.1 Structure diagram of GCT

对于微米级的功率半导体器件,描述其特性的漂移扩散模型(Drift-Diffusion Model, DDM)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^[13]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon}(p - n + N_{D+} - N_{A-}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} - R \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{-1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} - R \quad (3)$$

$$J_n = q\mu_n \left(-n \frac{\partial \psi}{\partial x} + V_T \frac{\partial n}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$J_p = q\mu_p \left(-p \frac{\partial \psi}{\partial x} - V_T \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (5)$$

式中, ε 为介电常数; q 为单位电荷; ψ 为电势; 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; x 为长度; t 为时间。

在电路级器件物理模型中,模型方程被进一步简化以降低建模难度。在准中性条件下,描述过剩载流子分布的为双极输运方程(Ambipolar Transport Equation, ATE)^[6]:

$$\frac{\partial(\delta p)}{\partial x} = D \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} + \mu E \frac{\partial(\delta p)}{\partial x} - \frac{\delta p}{\tau} \quad (6)$$

式中, μ 为双极迁移率; D 为双极扩散系数; E 为电场强度; τ 为双极载流子寿命; δp 为过剩载流子浓度(少子浓度)。

当过剩电子及空穴浓度远大于背景掺杂浓度,满足准中性大注入条件($p \approx n, p \gg N_{D+}$),此时描述载流子分布的模型为双极扩散方程(Ambipolar Diffusion Equation, ADE)^[12]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p}{\tau_{HL}} \quad (7)$$

式中, τ_{HL} 为大注入下双极载流子寿命;由于 $p \gg N_{D+}$, p 代替 δp 表示过剩载流子浓度(大注入时不区分电子和空穴)。

双极输运方程和双极扩散方程仅能描述准中性区载流子的分布,对式(7)采用不同的求解方法可以分别得到集总电荷模型^[14,15]、有限差分模型^[16]以及傅里叶模型^[17]。对于非准中性区,如耗尽区的承压可以由泊松方程求解得到。可以看出,除了半导体物理基本常数(如电子及空穴迁移率)之外,器件模型参数主要包括式(1)泊松方程中涉及的掺杂分布参数,以及式(6)或式(7)中涉及的载流子寿命参数。

3 基于关断拖尾电流的载流子寿命参数提取方法

IGCT 关断电压电流波形示意图如图 2 所示^[18],双极型器件关断时基区载流子分布示意图如图 3 所示^[19]。在 t_1 时刻即 IGCT 电压上升前,器件处于饱和导通状态。在 $t_1 \sim t_2$ 之间,器件阴阳极电压上升,但感性负载时器件阳极电流仍维持不变,此时 GCT 基区部分被耗尽,准中性区向阳极侧移动。在 t_2 时刻阳极电流开始下降,同时载流子在短时间内完成重新分布。 t_3 时刻之后器件处于拖尾阶段,由于器件承压逐渐稳定,此时准中性区边界移动缓慢。可以看出,器件钳位电压决定了拖尾阶段准中性区载流子复合所处的区域位置。

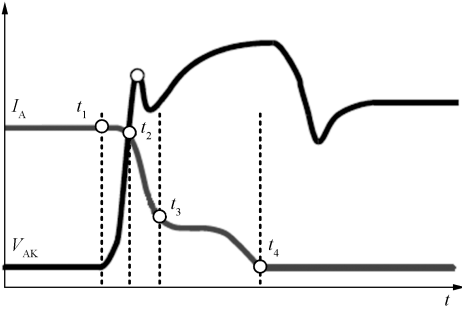


图 2 IGCT 关断电压电流波形示意图

Fig.2 Diagram of voltage and current waveform during turn off

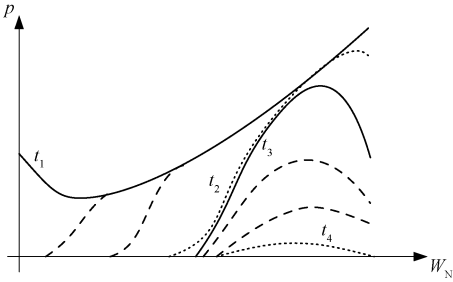


图 3 关断时载流子分布示意图

Fig.3 Diagram of carrier distribution during turn off

为得到拖尾电流的解析表达,需假设基区过剩载流子为准中性、大注入、线性分布。计算得到拖尾电流 I_T 与准中性区存储电荷 Q 的关系式^[9]:

$$I_T(t) = \frac{4D_p}{W^2} Q(t) \quad (8)$$

式中, 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:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{\tau_{HL}} - I_n(0) \quad (9)$$

式中, Q 为准中性区电荷总量; $I_n(0)$ 为阳极侧电子电流。

式(9)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 $I_n(0)$ 引起的载流子减少共同决定。

综合式(8)与式(9)可以得到拖尾电流计算的解析式^[9]:

$$\frac{d \ln I_T}{dt} = \frac{d I_T}{dt} / I_T \approx -\frac{1}{\tau_{HL}} \left(1 + \frac{I_T}{I_k^T} \right) \quad (10)$$

式中

$$I_k^T = \frac{q^2 A^2 D_p n_i^2}{I_{sne} \tau_{HL}} \quad (11)$$

式中, A 为器件有效面积; I_{sne} 为电子饱和电流,其经验值为 $1e^{-13}$ 量级; n_i 为本征载流子浓度。

由于文献[9]中基于电流拖尾的载流子寿命参数提取方法是针对 IGBT 所提出的,该方法仅能获取基区少子寿命。对于器件其他区域载流子寿命参数的获取,需要获取器件开通延迟时间,对于驱动集成封装的 IGCT,该时间参数的获取极为困难。另外,理论上 N 基区准中性区内任意一点电子和空穴的成对复合并不形成器件阴阳极方向上的电流。准中性区过剩载流子引起电流拖尾的原因在于:在耗尽边界,当准中性区空穴浓度大于耗尽区空穴浓度时,与空穴对应的漂移电流和扩散电流由于方向相同而不能建立平衡使空穴停止移动,因此准中性区有过剩空穴就存在拖尾电流。但是漂移区电流的大小只取决于准中性区边界载流子浓度的梯度,载流子复合速度只是间接影响电流拖尾的时长。影响拖尾电流的另一因素是阳极电子电流。由于式(11)中 I_{sne} 的取值依赖于经验计算,阳极电子电流的影响几乎被忽略。IGCT 透明阳极结构使得准中性区电子从阳极侧抽离的增加,电子电流所占总电流比重远大于传统穿通型 IGBT,对电流拖尾有着显著的影响。在器件物理模型的建模中,可以通过有效寿命的减少等效阳极侧电子的抽离,但该模型所表现的外特性显然会受到影响。透明阳极电子电流的作用不能用电子饱和电流表示,本文通过对其机理进行解析建模以改进现有参数提取方法。

4 改进基于关断电流拖尾的载流子寿命参数提取方法

4.1 过剩载流子寿命的区域分布特性

本文所提改进方法基于对IGCT中电子和空穴寿命的基值不随空间变化的假设,即认为没有引入如质子辐照等工艺引起局部的寿命分布。电子和空穴的寿命分布变化仅由重掺杂影响,即考虑掺杂浓度依赖的寿命模型。等效的过剩载流子寿命则计及不同区域实际载流子浓度、外加电压以及器件终端阳极对电子抽取的影响。

由于掺杂浓度与载流子寿命存在耦合关系,为获取器件模型所需非均匀分布的掺杂参数,利用扩展电阻法分辨率低但可测量深度大,而二次离子质谱分析法可测量深度小但分辨率高的特点分别获取器件阴极侧和透明阳极的纵向掺杂参数。IGCT纵向掺杂浓度 $\lg(n)$ 和电子寿命 τ 分布见图4。

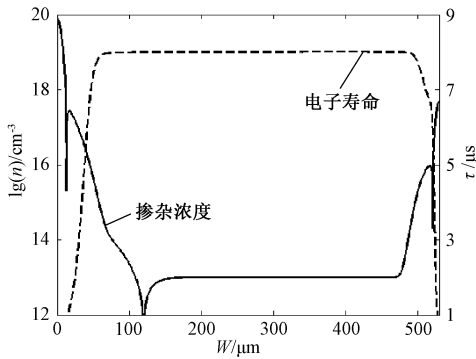


图4 IGCT纵向掺杂和电子寿命分布

Fig.4 Profile of longitudinal doping concentration and electron lifetime of IGCT

由掺杂对载流子寿命的影响^[13],有:

$$\tau_{p,n} \approx \frac{\tau_{p0,n0}}{1 + N_{\text{total}}/N_{\text{ref}}} \quad (12)$$

式中, τ_p 和 τ_n 分别为空穴和电子寿命; τ_{p0} 和 τ_{n0} 分别为空穴和电子寿命基值; N_{total} 为总掺杂浓度; N_{ref} 为参考浓度。

设电子寿命基值为 $8\mu\text{s}$, 则得到电子寿命分布如图4中虚线所示。可以看出,在器件两端的高掺杂区域,高掺杂浓度导致了载流子寿命的衰减。根据霍尔近似^[20],假定在 P^+ 和 N^+ 区域内的复合是可以忽略的,本文不讨论终端区域的少数寿命。

分析了电子及空穴寿命随掺杂浓度分布关系后,考虑过剩载流子等效寿命分布。载流子复合机制可分为三种:SRH复合、俄歇(Auger)复合及直接

复合^[21]。其中,俄歇复合和直接复合在载流子浓度非常大($>1e17/\text{cm}^3$)时才有显著影响。由于IGCT采用透明阳极结构增加了电子的抽离进而改变了基区载流子饱和程度,使得基区饱和导通时载流子浓度稍低于晶闸管。在器件关断过程中随着载流子浓度的降低,俄歇复合和直接复合的作用可忽略不计。

分析SRH复合的影响,其表达式为^[13]:

$$R_{\text{SRH}} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p [n + n_i \exp(\frac{E_{\text{trap}}}{kT})] + \tau_n [p + n_i \exp(\frac{-E_{\text{trap}}}{kT})]} \quad (13)$$

式中, R_{SRH} 为复合率; E_{trap} 为复合中心能级; k 为玻耳兹曼常数; T 为温度。

当区域满足准中性大注入条件($p \approx n, p \gg n_i$),如器件的基区,对式(13)同时除以 n ,得到:

$$R_N = \frac{p}{\tau_{\text{HL}}} \approx \frac{p}{(\tau_{p0} + \tau_{n0})/(1 + N_{\text{total}}/N_{\text{ref}})} \quad (14)$$

而在小注入条件下,对于N缓冲层($n \gg p, pn \gg n_i^2$),过剩少子为空穴 p ,对式(13)同时除以 n ,有:

$$R_{\text{Nb}} = \frac{p}{\tau_{\text{Nb}}} \approx \frac{p}{\tau_{p0}/(1 + N_{\text{total}}/N_{\text{ref}})} \quad (15)$$

相类似的,对于P基区($p \gg n, pn \gg n_i^2$),过剩少子为电子 n ,对式(13)同时除以 p ,有:

$$R_p = \frac{p}{\tau_p} \approx \frac{p}{\tau_{n0}/(1 + N_{\text{total}}/N_{\text{ref}})} \quad (16)$$

由以上推导可以看出,载流子在不同掺杂区域表现出不同的等效寿命,其根本原因在于:在大注入时($p \approx n$),电子和空穴浓度才具有相同比重;而在N型掺杂和P型掺杂小注入时,电子和空穴分别作为该区域内的少数载流子占主导影响;由于电子寿命和空穴寿命的差异性以及重掺杂的影响最终导致了不同区域内等效少数寿命的差异。以上推导分析了电子和空穴寿命基值与不同区域和注入状态下少数寿命的耦合关系,结果也表明了载流子寿命参数实际仅需提取电子的空穴寿命参数。在获取电子及空穴寿命参数后,利用式(14)~式(16)反推即可得到各区域过剩载流子寿命参数。

4.2 改进的载流子寿命参数提取方法

为将基于关断拖尾电流的载流子寿命参数提取方法应用于IGCT模型,须考虑透明阳极结构对关断时电子抽离,即对基区内载流子浓度衰减的影响。以下通过分析器件阳极侧电子电流分布对该影响进行说明。

阳极侧过剩载流子及电流分布如图 5 所示。

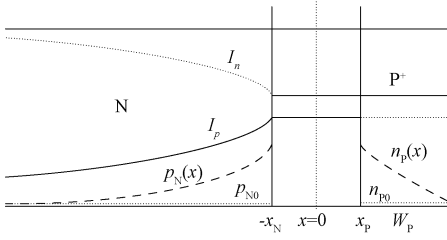


图 5 阳极侧过剩载流子及电流分布示意图

Fig.5 Diagram of excess carrier and current distribution

图 5 中 PN 结两侧分别为 N 掺杂区和 P⁺透明阳极(厚度 W_p 约为 $2\mu\text{m}$),中间则为耗尽区,在耗尽区中电流恒定通过且载流子浓度不发生衰减。当器件阳极电流较小时,阳极电子电流所占总电流比重很小,这使得开通时所需的电流触发脉冲较小。当器件阳极电流较大时,阳极电子电流所占总电流比重将大于空穴电流。由于关断拖尾电流达到上百安,本文分析适用于后者,将透明阳极的电流分布按照短二极管进行分析(电子扩散长度远大于阳极厚度)。静态时的双极扩散方程可表示为:

$$\frac{d^2(\delta n_p)}{dx^2} - \frac{\delta n_p}{L_n^2} = 0 \quad (17)$$

式中, L_n 为电子扩散长度; δn_p 为 P⁺区过剩电子浓度。

方程的边界条件分别为:

$$n_p(x_p) = n_{p0} \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) \quad (18)$$

$$n_p(x_N + W_p) = n_{p0} \quad (19)$$

式(18)为理想 PN 结两侧过剩载流子浓度^[21], V_a 为正向压降, n_{p0} 为 P⁺区电子平衡浓度。

由此得到透明阳极的过剩电子分布为:

$$\delta n_p(x) = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \frac{\sinh[(x_N + W_p - x)/L_n]}{\sinh(W_p/L_n)} \quad (20)$$

对于 N 掺杂区,运用同样的分析方法可得其过剩空穴分布为:

$$\delta p_N(x) = p_{N0} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{x_N + x}{L_p}\right) \quad (21)$$

式中, L_p 为空穴扩散长度。

由于阳极厚度远小于电子扩散长度,此时忽略电子在透明阳极的复合作用,进行线性近似得到:

$$\delta n_p(x) = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \frac{x_N + W_p - x}{W_p} \quad (22)$$

假设电流由扩散项构成,得到电子和空穴电流分别为:

$$J_n = \frac{qD_n n_{p0}}{W_p} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (23)$$

$$J_p = \frac{qD_p p_{N0}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (24)$$

得到电子电流占总电流的比重为:

$$\lambda = \frac{J_n}{J_n + J_p} = \frac{D_n n_{p0} L_p}{D_n n_{p0} L_p + D_p p_{N0} W_p} \quad (25)$$

由以上推导可知,当忽略过剩电子在透明阳极的复合作用,载流子近似线性分布且形成的电流恒定。由于 W_p 较小,器件关断时基区的电子大量透过阳极区域,从而加速了拖尾电流的衰减。

当掺杂浓度较高时 ($>1e17/\text{cm}^3$),需考虑由重掺杂引起的禁带变窄效应,此时有效本征浓度将增加,并使得 P⁺区内电子平衡浓度的增加。有效本征浓度受掺杂影响表示如下^[13]:

$$n_{ie}^2 = n_i^2 \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad (26)$$

式中, ΔE_g 为禁带宽度的变化量。

由于本文采用离子质谱的方法获取了 IGCT 阳极的掺杂分布,因而可以计算得到阳极 PN 结电子及空穴平衡浓度,由此得到电流拖尾阶段电子电流占拖尾电流 I_T 的比重 λ ,代入式(10)得到:

$$\frac{dI_T}{dt} / I_T \approx -\frac{1}{\tau_{HL}} - \frac{\lambda W_p^2}{4D_p} \quad (27)$$

由此得到等效寿命 τ_{eq} 与式(10)中 τ_{HL} 关系为:

$$\tau_{eq} = \frac{1}{1/\tau_{HL} - 4\lambda D_p / (W_N - w_{sc})^2} \quad (28)$$

式中,耗尽区宽度 w_{sc} 由关断时器件外加电压 V_{sc} 和阳极电流 I_A 决定^[17]:

$$w_{sc} = \sqrt{\frac{2\epsilon_{si} V_{sc}}{q [N_{BN} + I_A / (qAV_{sat})]}} \quad (29)$$

式中, V_{sat} 为空穴漂移饱和速度; N_{BN} 为 N 基区的掺杂浓度。

第 3 节中对图 3 的分析表明,在不同外加电压下,基区载流子受空间电荷区的影响随电压的升高由 N 基区向 N 缓冲层移动。由于不同区域载流子等效寿命的不同,在寿命参数提取时,器件 N 基区及 N 缓冲层寿命均由不同钳位电压下器件关断拖尾电流决定。当钳位电压较小时,器件 N 基区未耗尽宽度远大于 N 缓冲层,此时计算得到的载流子寿命为 N 基区寿命。当钳位电压较大使得 N 基区接

近完全耗尽时,N 缓冲层中的载流子复合主要决定了拖尾电流大小。

不同外加电压下的双极载流子寿命如图 6 所示,提取结果对应值由‘▽’标记。图 6 中所示虚线为通过式(10)拟合 IGCT 关断实验曲线得到不同外加电压下的双极载流子寿命(没有考虑透明阳极影响)。由于关断电流影响了漂移区载流子浓度即影响耗尽区宽度,从而改变准中性区载流子分布,而且不同关断电流意味着基区载流子注入程度不同,因此在同一电压下,不同电流对应的有效寿命有所差异。图 6 中虚线对应为注入程度较高时的双极载流子寿命变化曲线。随着外加电压的增加,N 基区完全耗尽,准中性区仅存在于 N 缓冲层。又由于缓冲层掺杂浓度较高,载流子在关断过程中很快由大注入向小注入过渡,此时图 6 中寿命参数提取结果‘▽’差异也逐渐减小。

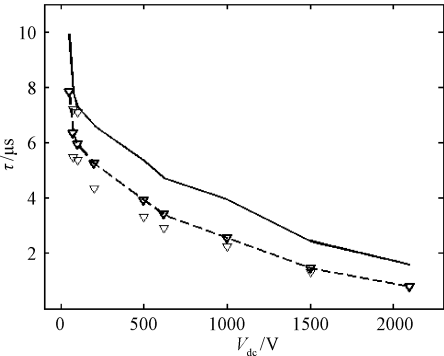


图 6 不同外加电压下的双极载流子寿命
Fig.6 Ambipolar carrier lifetime with different applied voltage

图 6 中所示实线为由式(28)所得改进后的结果。由此可得,低电压时 N 基区大注入时的寿命为 10μs,高电压时 N 缓冲层小注入下的寿命约为 1.8μs。4.1 节中的分析表明,N 基区双极载流子寿命为基区电子和空穴寿命之和,N 缓冲层寿命对应该区域空穴寿命。在式(28)分析结果的基础上,考虑掺杂对寿命参数的衰减影响,修正得到空穴寿命约为 2μs,电子寿命约为 8μs。由此反推得到不同区域载流子寿命,计算中各参数取值以及各区域载流子寿命计算结果如表 1 所示。

5 载流子寿命参数提取方法验证

在 Matlab/Simulink 环境下构建了第 2 节中的 DDM 模型用于仿真对比。模型方程离散后利用 s 函数求解,并通过受控电压源模块建立方程 s 函数与 Simulink 中电路仿真环境的连接。利用半导体数

表 1 计算中各参数取值
Tab.1 The value of parameters during calculation

参 数	数值
阳极掺杂峰值浓度 N_{p+pk}/cm^{-3}	9.3e17
阳极少子平衡浓度 n_{p0}/cm^{-3}	1.1e3
阳极厚度 $W_p/\mu\text{m}$	2
N 缓冲层掺杂峰值浓度 N_{NBpk}/cm^{-3}	5.5e15
N 缓冲层少子平衡浓度 p_{N0}/cm^{-3}	3.8e4
N 缓冲层少子扩散长度 $L_p/\mu\text{m}$	50
P 基区掺杂浓度均值 N_{pav}/cm^{-3}	1.6e16
N 基区大注入寿命 $\tau_{HL}/\mu\text{s}$	10
N 缓冲层少子寿命 $\tau_{Nb}/\mu\text{s}$	1.8
P 基区少子寿命 $\tau_p/\mu\text{s}$	6.1

值仿真软件 Silvaco Atlas 建立了 GCT 半元胞模型,芯片二维结构分布由扫描电镜获取。

首先,采用以上参数提取结果,对基于 TCAD 和基于 DDM 的 IGCT 模型进行了仿真对比。由于 TCAD 为半导体设计软件,其器件电路混合仿真能力有限,建模时采用了由简化模型构建的驱动电路以及续流二极管模型。

不同钳位电压(2500V,1500V,500V)下双脉冲测试第一个关断电压及电流波形如图 7 所示。由于关断时门极驱动施加的负电压使得器件反并联二极管导通从而使负载电流短暂上升。此时 GCT 尚未建立承压,而二极管中的暂态电流流过了 GCT 阳极。由于 Silvaco 和 Simulink 中驱动电路模型和反并联二极管简化模型的差异,以及 Silvaco 中单元胞模型二维特性等影响,仿真结果中负载电流短暂上升时间稍大于本模型仿真结果。除此之外,在不同外加电压及负载电流下,器件模型的外特性均有较高的拟合度,因而验证了 IGCT 模型本身的正确性。

为了验证本文所述参数提取方法的准确性,对 IGCT 进行了单管测试,测试电路采用 IGCT 数据手册中给出的标准器件双脉冲测试电路,如图 8 所示,本文中载流子寿命参数提取所依据的电流拖尾波形同样由此单管测试实验电路获得。测试平台如图 9 所示。测试电路其他元件参数如表 2 所示。

双脉冲实验包括器件的开通和关断过程,其中开通时电压和电流特性主要受驱动电流脉冲和限流电感影响,关断特性则受测试电路参数影响较小。感性负载下,不同钳位电压和器件关断电流下为考虑阳极电子抽离和考虑电子抽离影响的仿真和实验波形对比结果如图 10 所示。

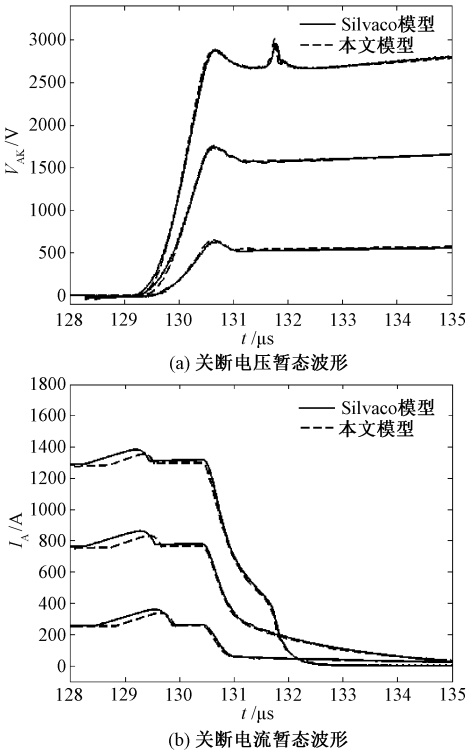


图 7 不同钳位电压和关断电流时仿真波形对比
Fig.7 Comparison of simulations waveforms with different clamped voltage and turn-off current

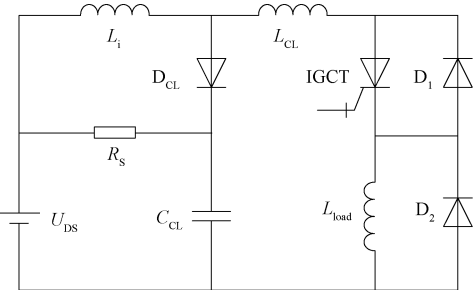


图 8 IGCT 测试电路
Fig.8 Test circuit of IGCT

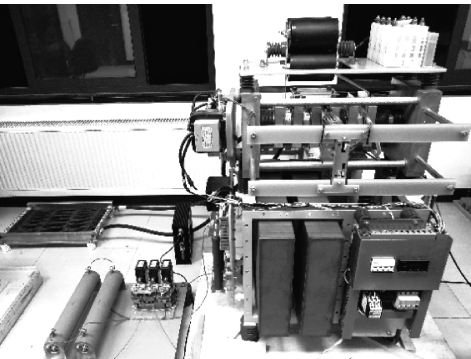


图 9 IGCT 基本电路单元测试平台
Fig.9 Test platform of basic circuit unit of IGCT

表 2 IGCT 测试电路元件参数取值	
Tab.2 Values of IGCT test circuit components	
参数	数值
限流电感 $L_i/\mu\text{H}$	5.8
缓冲电阻 R_s/Ω	0.7
钳位电容 $C_{CL}/\mu\text{F}$	20
负载电感 $L_{load}/\mu\text{H}$	172

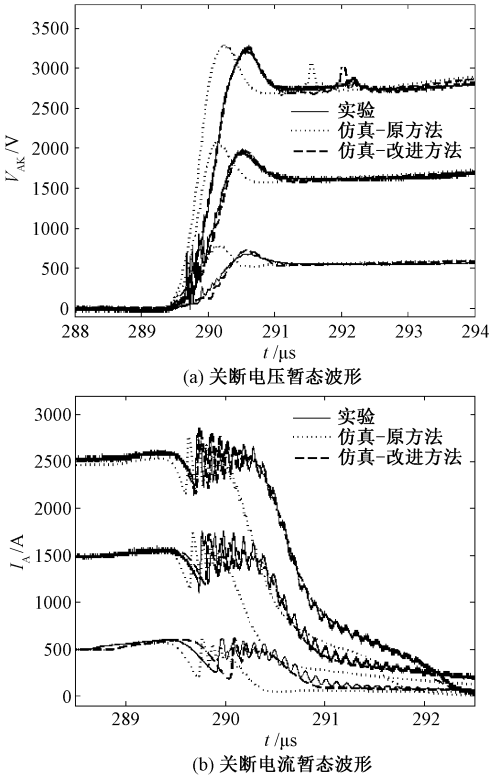


图 10 不同钳位电压和关断电流时仿真与实验波形
Fig.10 Waveforms of simulations and test with different clamped voltage and turn-off current

对比图 10 仿真和实验波形:

(1)在关断初始阶段,集成门极驱动换流时施加的负电压使得 IGCT 反并联二极管 D_1 短暂导通,且在 GCT 电压上升后经反向恢复过程关断。在 D_1 的反向恢复过程中,二极管的结电容、IGCT 基区的耗尽电容以及续流回路的寄生电感构成振荡回路,导致在图 10 关断暂态初始阶段 V_{AK} 及 I_A 的振荡。仿真中对图 8 中的快恢复二极管 D_1 同样采用了数值模型,因而模型能一定程度上反映器件振荡过程中的容性电流。图 10(b)中关断电流为 2.5kA 时电流拖尾的最后阶段电流快速减少,对应图 10(a)中感应出的电压尖峰明显高于实验值,但仿真波形与 Silvaco 中相一致。分析原因在于对器件厚度测量存在数微米的误差,且测量值小于实际值导致穿通

电压小于实际穿通电压因而出现尖峰。

(2) 器件基区掺杂浓度及载流子寿命主要影响关断时的电压上升率,而透明阳极掺杂浓度及阳极侧 PN 结决定了阳极侧电子注入效率,其与载流子寿命共同决定关断时的拖尾电流。由图 10 可知,在未考虑阳极电子抽离影响时,所得寿命参数较小使得:P 基区载流子浓度衰减时间变短,即图 10(a)中电压上升提前;基区寿命值较小使得电压变化率大于实验结果;电流拖尾时间小于实验结果。对比改进后的仿真和实验波形可知,器件开关暂态过程仿真与实验结果中电压变化率及电流拖尾均具有较高的拟合程度,因此可以验证本文参数提取方法的有效性。

6 结 论

本文针对非对称型 IGCT 改进了其物理模型中载流子寿命参数的提取方法。

在通过芯片测试提取掺杂浓度分布保证模型结构参数准确性的前提下,基于 SRH 复合模型和掺杂浓度依赖载流子寿命模型,分析表明电子和空穴寿命参数与不同区域过剩载流子寿命存在耦合关系,本文利用这种耦合特性简化了 P 基区载流子寿命参数的提取难度。

对 IGCT 的透明阳极结构机理以及阳极侧电流分布进行了分析,建立了短二极管假设下电子电流分布的解析模型;透明阳极引起基区电子抽离的增加从而加速了拖尾电流的衰减,本文讨论了现有参数提取方法应用于 IGCT 的误差来源,并由此提出了相应的改进方法。

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] 5 SYA2031-04, Applying IGCT gate units [S].

[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器件特性研究 (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] Lyu G, Zhuang C, Zeng R, et al. Physics-based compact model of integrated gate-commutated thyristor with multiple effects for high-power application [J]. IET Power Electronics, 2018, 11 (7): 1239-1247.

[6] 王佳蕊, 孔力, 屈慧, 等 (Wang Jiarui, Kong Li, Qu Hui, et al.). 基于傅里叶级数的改进型 IGCT 物理模型 (Improved IGCT physical model based on Fourier series) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2017, 43 (7): 2175-2185.

[7] Derdouri M, Leturcq P, Munoz-Yague A, et al. A comparative study of methods of measuring carrier lifetime in p-i-n devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1980, 27 (11): 2097-2101.

[8] 王益成 (Wang Yicheng). 电力半导体器件中间测试技术 (Intermediate testing technology for power semiconductor devices) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1990.

[9] Hefner A R. Characterization and modeling of the power insulated gate bipolar transistor [D]. Maryland: University of Maryland, 1987.

[10] Grhler L, Lange T, Sigg J. A destruction-free parameter extraction scheme for GTO models [A]. 1998 IEEE Industry Applications Conference [C]. St Louis, USA, 1998. 999-1004.

[11] Wang X, Hudgins J, Santi E, et al. Destruction-free parameter extraction for a physics-based circuit simulator IGCT model [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42 (6): 1395-1402.

[12] 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.

[13] Silvaco Inc. ATLAS User's Manual [M]. Santa Clara: Silvaco, 2012.

[14] 肖友国, 彭振东, 任志刚 (Xiao Youguo, Peng Zhendong, Ren Zhigang). 基于 Saber 的 IGCT 集总电荷模型研究 (Research on lump-charge model of IGCT using Saber software) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2015, 49 (11): 83-86.

[15] Talwalkar N, Lauritzen P O, Fatemizadeh B, et al. A power BJT model for circuit simulation [A]. PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference [C]. Baveno, Italy, 2002. 50-55.

[16] Kuhn H, Schroder D. A new validated physically based

- IGCT model for circuit simulation of snubberless and series operation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38 (6): 1606-1612.
- [17] 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.
- [18] ABB Switzerland Ltd, IGCT 5SHY 35L4520 datasheet [Z].
- [19] Sheng Kuang, Williams B W, Finney S J, et al. A review of IGBT models [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15 (6): 1250-1266.
- [20] Lutz J, Schlangenotto H, Scheuermann U, et al. Semiconductor Power Devices [M]. New York: Wiley, 1977.
- [21] Baliga B. Fundamentals of power semiconductor devices [M]. New York: Springer, 2008.

Study on distribution characteristics and parameter extraction method of IGCT carrier lifetime

ZHOU Ya-xing^{1,2}, CHEN Fang-lin³, WANG Jia-rui⁴, 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. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;
4. State Grid Jilin Electric Power Research Institute, Changchun 132000, China)

Abstract: There is a strong relationship between carrier lifetime of Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT) physical model and dynamic or static characteristics. The existing turn-off current-tail based parameter extraction method of carrier lifetime assumes that the deceasing of current-tail mainly depends on the carrier recombination in N-base neglecting the extraction of electron from anode, therefore there is a limitation when applying to IGCT in which the extraction of electron from anode is enhanced by using transparent anode structure. In this paper, based on doping concentration dependent carrier lifetime model and Shockley-Read-Hall (SRH) recombination model, the coupled relation between carrier lifetimes in different regions is analyzed; the distribution characteristics of minority carrier and its current are discussed and analyzed by taking the PN junction near anode side as a short diode considering that the thickness of transparent anode is much less than the minority carrier diffusion length; then an improved method of carrier lifetime extraction is proposed. At last, the parameters of carrier lifetime in different region are derived from experiment as the effective carrier lifetime varying with the applied voltage; and good agreement between the experimental data and simulation results of double-pulse show the correctness of the proposed method of parameters extraction.

Key words: integrated gate commutated thyristor (IGCT); carrier lifetime; parameter extraction; transparent anode