

TIGBT 的稳态和瞬态模型*

张 莉 鲁耀华 田立林

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 从沟槽绝缘栅双极晶体管(TIGBT)的物理结构出发, 提出了 TIGBT 的稳态模型和瞬态模型。该模型不仅考虑了槽底电子积累层引起的基区电导调制作用增强效应, 而且还考虑到缓冲层对器件性能的影响。通过与器件模拟结果的比较, 表明该模型能准确地描述 TIGBT 稳态和瞬态时的物理特性。

关键词: TIGBT; 稳态模型; 瞬态模型; 缓冲层; 积累层

EEACC: 2560; 2560B; 2560R

中图分类号: TN 386 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2003)07-0743-05

本文中公式符号简表:

A	基区有效面积	N_H	缓冲层掺杂浓度	R_L	负载电阻
A_{gd}	基区沟槽下方有效面积	n_i	本征载流子浓度	T	器件工作温度
b	基区迁移率比值, μ_n/μ_p	p_{L0}	中性基区缓冲层一侧边界过剩空穴浓度	V_{AA}	电源电压
C_{bcj}	集电结耗尽层电容	p_{H0}	缓冲层发射区一侧边界过剩空穴浓度	V_A	阳极电压
C_{dsj}	源-漏耗尽层电容	p_{HW}	缓冲层靠近基区一侧边界过剩空穴浓度	V_{bc}	集电结外加电压
C_{gd}	栅-漏电容	p_W	栅极下方阴极一侧过剩空穴浓度	V_{gs}	栅-源电压
C_{gs}	栅-源电容	Q_B	基区平衡态可动载流子电荷总量	V_h	缓冲层上的电势差
D_p	基区空穴扩散系数	Q_H	缓冲层过剩载流子电荷	W	准中性基区宽度
D_{ph}	缓冲层空穴扩散系数	Q_L	基区过剩载流子电荷	W_{bcj}	集电结耗尽层宽度
I_g	栅极输入电流	Q_T	基区和缓冲层总的过剩载流子电荷	W_L	冶金基区宽度
I_{mos}	MOSFET 沟道电流	R_b	基区调制电阻	W_H	缓冲层宽度
I_{sne}	发射结饱和电子电流			μ_{eff}	基区双扩散等效迁移率
I_T	阳极电流			τ_b	缓冲层载流子渡越时间
L	基区空穴扩散长度			τ_{HL}	大注入基区过剩载流子寿命
L_L	负载电感				
n_{eff}	基区有效载流子浓度				
N_L	基区掺杂浓度				

1 引言

沟槽绝缘栅双极晶体管(TIGBT)是 1989 年 Baliga 在绝缘栅双极晶体管(IGBT)的基础上提出的功率 MOS 器件^[1]。TIGBT 在不影响器件关断特性的前提下, 具有比 IGBT 更大的工作电流, 因此逐渐在中、大功率开关器件中占据了主导地位。为了有

效地模拟 TIGBT 的特性, 1997 年 Udrea 提出 TIGBT 的稳态模型^[2], 但该模型引入了一些经验参数, 且不能适用于具有缓冲层的 IGBT。

为了克服 Udrea 的 TIGBT 模型的局限性, 张^莉基于 Hefner 的 BIGBT 稳态模型提出了一种更通用的 TIGBT 稳态模型^[3], 能有效地描述 TIGBT 所具有的强烈的电导调制效应。但该模型是在 Hefner 的稳态 BIGBT 模型^[4]的基础上增加了新的方程而

* 教育部基础研究基金资助项目(No. ME9905)

张 莉 女, 1970 年出生, 讲师, 研究兴趣主要为半导体器件的建模和参数提取。

田立林 女, 1946 年出生, 教授, 研究兴趣主要为深亚微米 MOSFET 的结构、工艺和建模、数字模拟技术和模型参数提取。

2002-08-23 收到, 2002-11-15 定稿

©2003 中国电子学会

得到的,使得该模型计算速度慢,收敛性差,并且该模型不能模拟TIGBT的瞬态特性。

这样,建立一个简单、物理概念清晰的TIGBT的稳态模型和瞬态模型是非常有意义的。

2 TIGBT 的工作原理

图1为TIGBT单元结构示意图。沟道右边(虚线右边)与传统IGBT一样,是一单边注入的宽基区PNP晶体管。当阳极电压为正,栅电压大于阈值电压时,在p区靠近垂直槽的表面形成沟道,电子由阴极通过沟道流入n⁻基区形成基极电流,PNP管导通,阳极向n⁻区注入空穴。由于n⁻区掺杂浓度很低,注入的空穴和沟道流入的电子在n⁻区产生大注入效应,非平衡载流子浓度远大于n⁻区掺杂浓度。但在阴极附近,集电结处于反偏状态,耗尽层边界附近的载流子浓度近似为零。沟道左边由于槽底栅电极的作用,在槽底形成了一层浓度很高的电子积累层,因此该部分可看作一双边注入的PIN二极管。正是PIN二极管的双载流子注入作用,使得左边槽底所对应的基区的电导调制效应比右边PNP管的更为强烈,因此与传统IGBT相比,TIGBT具有更小的导通电阻、更低的正向压降和更大的工作电流。

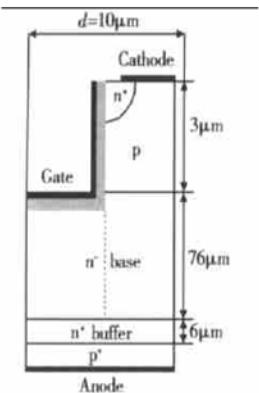


图1 TIGBT 单元结构示意图

Fig. 1 Cell structure of TIGBT

当栅极电压变成0后,沟道电流和槽底电子积累层将很快地消失,阴极一侧的载流子浓度在很短的时间内急剧下降,关断时间仍然由基区过剩载流子复合、缓冲层载流子复合和阳极一侧的注入效率这三项决定,与BIGBT的关断特性相同。因此,槽底的积累层在提高了TIGBT的稳态特性的同时,并不影响器件的关断特性,解决了IGBT需要在导通

压降和关断时间之间折衷的这一矛盾。

3 稳态模型

TIGBT的重掺杂n⁺缓冲层在实际工作条件下处于小注入状态,空穴的输运主要是扩散,而处于大注入状态的n⁻电子和空穴是相互耦合的输运状态^[5]。缓冲层的电荷可用(1)式描述:

$$Q_H = I_T \tau_h \quad (1)$$

$$\text{其中 } \tau_h = \frac{W_H^2}{2D_{ph}}$$

求出了Q_H,就可利用基区和缓冲层总的过剩载流子电荷Q_T求出Q_L,从而将张^[3]的TIGBT的稳态模型^[3]减少一个变量。

考虑到PIN二极管的作用,TIGBT在导通状态下,槽底阴极一侧载流子浓度不等于0,所以TIGBT基区的电导调制与BIGBT的不同,需要重新求解。BIGBT的基区调制电阻R_b可参考文献[4]得出:

$$R_b = \frac{W}{q\mu_{eff}A n_{eff}} \quad (2)$$

考虑到槽底电子积累层的影响,TIGBT的n_{eff}表达式需要修正。TIGBT注入基区的电子电流和空穴电流是同一个方向的,I_T在基区和缓冲层处处相同;同时考虑到重掺杂缓冲层处于小注入状态,在实际导通状态下,缓冲层上的电压降很低,缓冲层过剩载流子电荷为:

$$Q_H = \frac{qA W_H}{2} (p_{HO} + p_{HW}) \quad (3)$$

缓冲层处于小注入状态,有:

$$p_{HW} = p_{HO} \exp(-\frac{qV_h}{kT}) \quad (4)$$

联立求解(3)、(4)式,可得:

$$p_{HW} = \frac{2Q_H}{qA W_H [1 + \exp(\frac{qV_h}{kT})]} \quad (5)$$

缓冲层-基区两侧的过剩载流子浓度符合准平衡近似,即:

$$p_{HW} = \frac{p_{LO}(p_{LO} + N_L)}{N_H + p_{HW}} \approx \frac{p_{LO}^2}{N_H} \quad (6)$$

考虑p_w的影响^[2],可求出基区过剩载流子分布为:

$$\Delta p_1(x) = p_{LO} \frac{\sinh[(W-x)/L]}{\sinh(W/L)} \quad (7)$$

$$\Delta p_2(x) = p_{LO} \frac{\sinh[(W-x)/L]}{\sinh(W/L)} + p_w \frac{\sinh(x/L)}{\sinh(W/L)} \quad (8)$$

其中(7)式为图1右侧PNP管过剩载流子分布,(8)式为沟槽下方过剩载流子分布.对(7),(8)式积分可得TIGBT基区的过剩载流子电荷:

$$Q_L = Q(0)(p_{L0}A + p_w A_{gd}) \quad (9)$$

其中 $Q(0) = qL \tanh(\frac{W}{2L})$

(9)式等号右边第一项为IGBT的基区过剩电荷,第二项为TIGBT因引入沟槽所产生的过剩电荷.即

$$p_w = \frac{Q_L - Q(0)p_{L0}A}{Q(0)A_{gd}} \quad (10)$$

综合考虑(5)、(6)和(10)式,就可以解出 p_w .由文献[5]可知:

$$\frac{1}{n_{eff}} = \frac{1}{W} \int_0^W \frac{dx}{N_L + \delta p(x)} \quad (11)$$

TIGBT的基区可分为两个部分,栅极下方部分阴极一侧载流子浓度为 p_w ,另一部分阴极一侧的载流子浓度为0.这样,在求出 p_w 的情况下,对(11)式积分,就可求得 n_{eff} ,代入(2)式即可得到TIGBT的基区调制电阻 R_b .将这一结果代入张文的稳态模型^[3],又可减少一个变量.参看文献[6]中的等效电路,推导出控制TIGBT工作状态的五个非线性方程.由于引入缓冲层而改变的参数的求解参看文献[4].利用牛顿-拉夫森法求解这个非线性方程组,可求出TIGBT的各种稳态特性.

图2为用该模型得到的TIGBT输出特性,数

值模拟利用二维器件模拟软件ATLAS,其中单元横向尺寸为10μm,纵向尺寸为90μm,栅氧化层厚度为0.1μm,缓冲层掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,厚度为6μm,基区掺杂浓度为 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,厚度为76μm,沟道区掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,沟道长度为2μm.

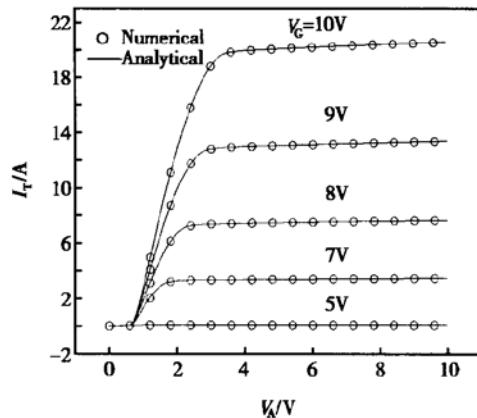


图2 TIGBT输出特性

Fig. 2 TIGBT output characteristics

4 瞬态模型

在文献[5]中,对不含缓冲层的IGBT已经有了一个完整的瞬态模型,利用RKF法解方程(12)就可以得到相应的瞬态特性:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dQ_T(t)}{dt} = I_{mos} + (C_{dsj} + C_{gd}) \frac{dV_{bc}(t)}{dt} - C_{gd} \frac{dV_{gs}(t)}{dt} - \frac{Q_T(t)}{\tau_{IL}} - \frac{4I_{sne}Q_T^2(t)}{n_i^2 q^2 A^2 (W_L - W_{bcj})^2} \\ \frac{dV_{bc}(t)}{dt} = \frac{I_T - \frac{4D_p}{(W_L - W_{bcj})^2} Q_T(t) + (1 + \frac{1}{b}) [\frac{C_{gd}}{C_{gs} + C_{gd}} I_T(t) - I_{mos}]}{(1 + \frac{1}{b}) [C_{dsj} + \frac{C_{gs} C_{gd}}{C_{gs} + C_{gd}} + \frac{C_{bcj} Q_T}{3Q_B}]} \\ \frac{dV_{gs}(t)}{dt} = \frac{I_g}{C_{gs} + C_{gd}} + \frac{C_{gd}}{C_{gs} + C_{gd}} \times \frac{dV_{bc}(t)}{dt} \\ \frac{dI_T(t)}{dt} = \frac{1}{L_L} [V_{AA} - R_L I_T(t) - V_A(t)] \end{array} \right. \quad (12)$$

我们的思路是仍然利用(12)式来描述含缓冲层的BIGBT的瞬态特性,不同的是:对于IGBT, $Q_T = Q_L$;而对于BIGBT, $Q_T = Q_H + Q_L$,需要同时考虑基区的载流子和缓冲层载流子的影响.求出 Q_H 和 Q_L ,就可以利用(12)式来获得BIGBT瞬态模型.式中由于引入缓冲层而改变的参数的求解参看文献[4].

对于TIGBT,还需要考虑槽底电子积累层的影响.利用(2)~(11)式修正器件导通状态下的基区调

制电阻 R_b .

综上所述,考虑到缓冲层和沟槽的影响,修正了基区电荷和基区调制电阻后,就可以利用(12)式来获得TIGBT的瞬态特性.

为了验证模型,我们用ISE的器件模拟器DESSIS对TIGBT的瞬态特性进行了数值模拟,图3为模拟电路图,其中电源电压 $V_{AA} = 300V$,电阻负载 $R_L = 30\Omega$,负载电感 $L_L = 4\mu H$,输入电阻 $R_g =$

3.1Ω , 开态输入电压 $V_{gg}(\text{on}) = 20V$, 基区空穴平均迁移率 $\mu_p = 450\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 基区电子平均迁移率 $\mu_n = 1500\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 基区载流子寿命分别取 $3\mu\text{s}$ 和 $0.1\mu\text{s}$, 其余参数与稳态模拟相同.

图 4 是一组不同载流子寿命下得到的阳极电流、阳极电压波形图. 从图中可以看到, 用 DESSIS 模拟的结果与用瞬态模型算出的结果符合得很好, 证明我们提出的 TIGBT 瞬态模型是准确的. 从图 5 中可以看出当载流子寿命较短时, 在关断过程中会出现振荡. 我们的模型很好地反映了这点.

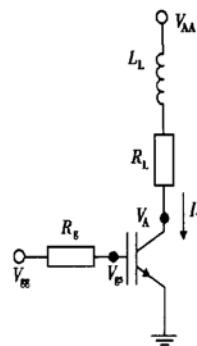


图 3 瞬态模拟电路图

Fig. 3 Circuit configuration of transient analysis

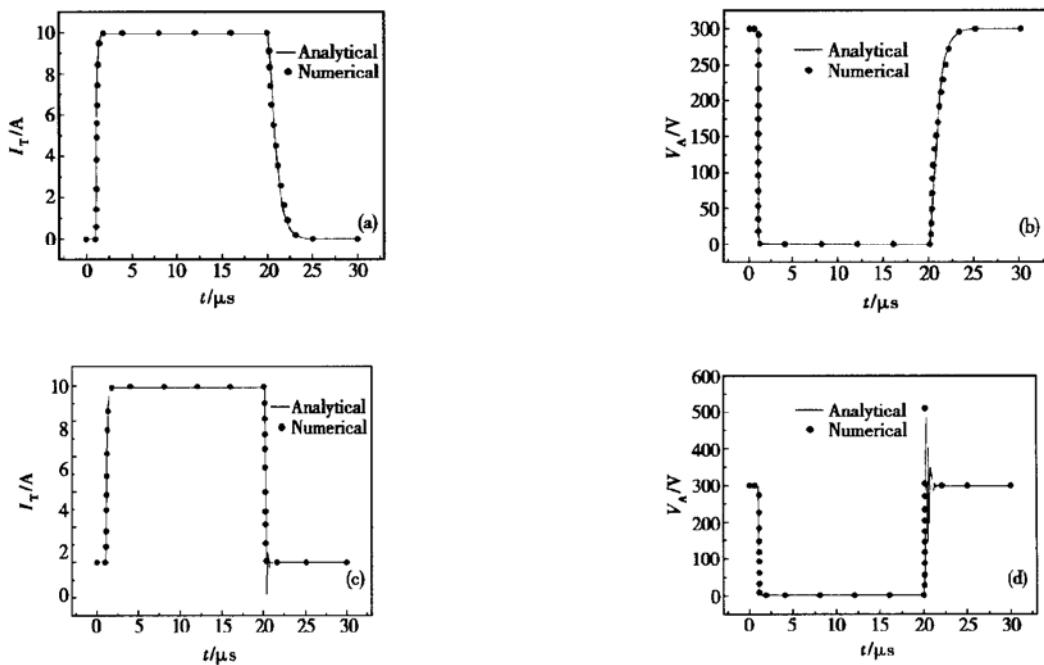


图 4 TIGBT 阳极电流、阳极电压波形图 (a)、(b) 基区载流子寿命= $3\mu\text{s}$; (c)、(d) 基区载流子寿命= $0.1\mu\text{s}$

Fig. 4 TIGBT anode current and anode voltage transient waveforms (a), (b) Base carrier lifetime= $3\mu\text{s}$; (c), (d) Base carrier lifetime= $0.1\mu\text{s}$

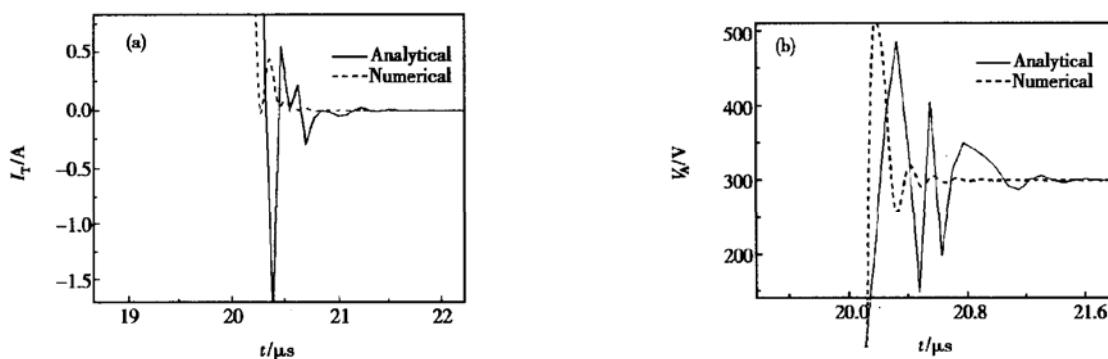


图 5 阳极电流(a)、阳极电压(b)局部波形图 基区载流子寿命= $0.1\mu\text{s}$

Fig. 5 Enlarged anode current (a) and anode voltage (b) transient waveforms Base carrier lifetime= $0.1\mu\text{s}$

5 结论

本文提出的 TIGBT 的稳态和瞬态模型具有明确的物理意义。通过与器件模拟分析结果的比较,表明该模型能准确地描述缓冲层、槽底积累层对 TIGBT 稳态和瞬态特性的影响,并具有较高的精度。它的提出简化了 TIGBT 的稳态模型,并能正确模拟 TIGBT 的瞬态特性,适用于 TIGBT 的电路模拟和参数提取。考虑到 p_w 在沟槽底部的非均匀分布,还可进一步改进模型,以提高模拟精度。

参考文献

- [1] Chang H R, Baliga B J. 500-V n-channel insulated-gate bipolar transistor with a trench gate structure. IEEE Trans Electron Devices, 1989, 36(9): 1824
- [2] Udrea F, Amarasinghe G A J. An on-state analytical model for the TIGBT. Solid-State Electron, 1997, 41(8): 1111
- [3] Zhang Min, Yang Zhilian. Study of steady state model of TIGBT. Proceedings of 2000 Conference of Post Doctor, Fascicule of Computer and Communication. Beijing: Science Press, 2001: 386 (in Chinese) [张旻, 杨之廉. TIGBT 稳态模型分析. 2000 年中国博士后学术大会论文集, 计算机与信息分册. 北京: 科学出版社, 2001: 386]
- [4] Hefner A R. Modeling buffer layer IGBT's for circuit simulation. IEEE Trans Power Electron, 1995, 10(2): 111
- [5] Hefner A R, Blackburn D L. An analytical model for the steady-state and transient characteristics of the power insulated-gate bipolar transistor. Solid-State Electron, 1988, 31(10): 1513
- [6] Hefner A R, Diebolt D M. An experimentally verified IGBT model implemented in the Saber circuit simulator. IEEE Trans Power Electron, 1994, 9(5): 532

Steady-State and Transient Model of TIGBT*

Zhang Li, Lu Yaohua and Tian Lilin

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A model for the steady-state and transient characteristics of the trench insulated gate bipolar transistor (TIGBT) is presented according to its physical structure. This model takes into account not only the turn-off characteristic influenced by high-doped buffer layer that is working in low-level injection condition, but also the on-state characteristic influenced by trench gate that modulates the conduction of base. As a result of comparison with numerical simulation, this model is valid for circuit simulation.

Key words: TIGBT; steady-state model; transient model; buffer layer; accumulated layer

EEACC: 2560; 2560B; 2560R

Article ID: 0253-4177(2003)07-0743-05

* Project supported by the Fundamental Research Foundation of Ministry of Education (No. ME9905)

Zhang Li female, was born in 1970, lecturer. Her main research areas are in the areas of semiconductor devices including modeling, numerical simulation and model parameter extraction.

Tian Lilin female, was born in 1946, professor. Her main research interests include deep-submicrometer MOSFET structure, processing and modeling, numerical simulation technique, and model parameter extraction.