

Threshold Voltage Measurement Method of SiC MOSFET Considering the Hysteresis Effect *

WANG Zhenzhuo^{1*}, REN Tingting²

(1. Teaching Affairs Office, Henan Polytechnic Institute, Nanyang He'nan 473000, China;
2. School of Electric Power and Architecture, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030000, China)

Abstract: The traps in the gate oxide layer of silicon carbide (SiC) MOSFET create the corresponding unique threshold voltage hysteresis effect, making the definition and measurement of the threshold voltage of SiC MOSFET a difficult task. Based on the saturation phenomenon of the hysteresis effect, a "pre-bias+measurement" combined measurement method is proposed. It is necessary to measure the threshold voltage twice to determine the upper and lower limits of the threshold voltage drift, and the average value is defined as the threshold voltage. An experimental measurement circuit is designed to perform the experimental measurements on a certain type of SiC MOSFET device under different pre-bias conditions to analyze the influence of pre-bias voltage and pulse duration on the measurement results. The experimental results show that a reasonable choice of the pre-bias conditions can ensure that the hysteresis effect is saturated, and reproducible threshold voltage measurement results can be obtained.

Key words: SiC MOSFET; threshold voltage measurement; hysteresis effect; pre-bias conditions

EEACC: 2570; 7310B doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.01.013

考虑弛豫效应的 SiC MOSFET 阈值电压测量方法研究 *

王臻卓^{1*}, 任婷婷²

(1. 河南工业职业技术学院教务处, 河南 南阳 473000; 2. 山西大学电力与建筑学院, 山西 太原 030000)

摘要: 碳化硅 (SiC) MOSFET 栅极氧化层中的陷阱造就了其独特的阈值电压弛豫效应的特性, 使得 SiC MOSFET 的阈值电压定义和测量成为一个棘手的问题。首先基于弛豫效应的饱和现象, 提出了“预偏置+测量”组合的测量方法, 一共需要测量两次阈值电压, 以确定阈值电压漂移的上下限, 并以其平均值定义为阈值电压。然后设计实验测量电路, 对某型号 SiC MOSFET 器件在不同预偏置条件下进行实验测量, 分析预偏置电压和脉冲持续时间对测量结果的影响, 结果表明合理选择预偏置阶段的实验条件可以确保弛豫效应达到饱和, 并可得到重复性的阈值电压测量结果。

关键词: SiC MOSFET; 阈值电压测量; 弛豫效应; 预偏置条件

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1005-9490(2023)01-0074-05

与硅 (Si) 相比, 碳化硅 (SiC) 具有更高的禁带宽度、临界场强和热导率等优异的材料特性^[1-3], 因此, 基于 SiC 的金属-氧化物-半导体场效应管 (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors, MOSFET) 更加适合高压、高频和高温等应用场景, 正广泛应用于新能源汽车、太阳能、风能变换器、无线电能传输等领域^[4-6]。

尽管 SiC MOSFET 具有这些众所周知的优点, 但是其栅极可靠性一直受到质疑。在栅极氧化工艺中, 碳化硅和氧化硅的界面处会存在大量晶格缺陷, 这种缺陷能够捕获沟道区中的载流子, 造成阈值电压发生偏移^[7]。不同于 Si 器件的阈值电压偏移, 这种偏移不是由于老化造成的, 是可以恢复的, 也被称之为弛豫效应^[8]。例如, 当栅极施加正压时, 陷阱

捕获电子进而造成阈值电压发生正偏移; 而当栅极施加负压时, 陷阱捕获空穴进而造成阈值电压发生负偏移。这种弛豫效应给 SiC MOSFET 器件的阈值电压测量带来难题, 而阈值电压是描述器件电气特性最基础最重要的指标之一。

目前相关测试标准都是针对 Si 器件制定的, 即使是 2018 年颁布的电动汽车用功率器件测试标准 AQG324, 没有对 SiC MOSFET 的阈值电压测量作特别说明^[9]。学术研究方面, 大多集中在阈值电压漂移的形成机理和影响因素方面^[10-11], 虽然为测量方法奠定了理论基础和提供指导, 但是并没有对测量方法作进一步阐述或所提方法不适用于一般性测量。例如文献[12]基于 SiC/SiO₂ 界面的高密度陷阱对短沟道效应的影响, 提出了一个阈值电压的计

项目来源: 河南省科技攻关项目 (212102310086)

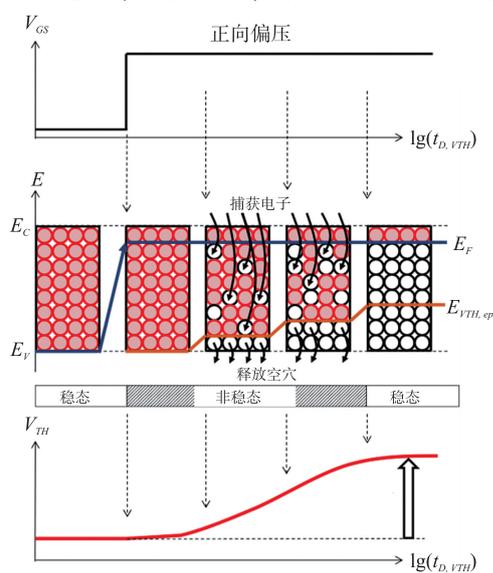
收稿日期: 2021-09-14 修改日期: 2022-01-21

算模型,然而该模型和方法所涉及的物理变量众多且不易实验提取,不利于实际测量。因此,本文在现有研究成果的基础上,提出一种“预偏置+测量”的 SiC MOSFET 阈值电压定义和测量方法,并讨论预偏置阶段的参数对测量结果的影响,确定参数的选择范围,以保证测试结果的可重复性,为制定相关测试标准提供依据和参考。

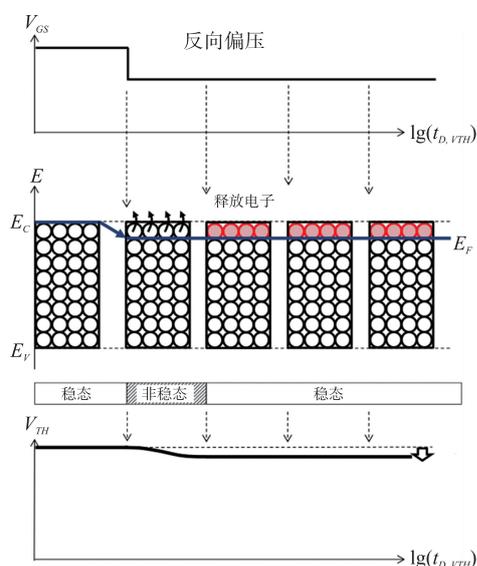
1 测试方法

1.1 弛豫效应的饱和现象

来自英飞凌公司的 Thomas A 等人^[13]对 SiC MOSFET 栅极阈值电压的弛豫效应及相关物理机理进行过深入研究,发现了弛豫效应具有饱和现象。如图 1 所示,在栅极施加正压或负压时,界面捕获电子或释放电子(捕获空穴)将经历稳态—非稳态—



(a) 持续正向偏压下的阈值电压变化



(b) 持续正向偏压下的阈值电压变化

图 1 小电流下饱和和压降测量电路

稳态三个阶段,导致阈值电压的变化最终也将达到稳定状态,而不会持续受栅极偏压的影响,这被称为弛豫效应的“饱和现象”。这种现象对于 SiC MOSFET 的应用显然是有利的,因为阈值电压漂移对器件特性的影响将是有限的,并且有可能是可控的。事实上,随着芯片栅极制造工艺的不断提升,目前的第三代 SiC 芯片相对第一代在栅极可靠性上已经取得了极大的进步^[14]。同时,这种“饱和现象”也为本文提出的阈值电压测量方法提供了指导和理论依据。

1.2 定义及测量方法

根据 SiC MOSFET 栅极阈值电压特有的弛豫效应,提出一种“预偏置+测量”组合的测量思想,示意图如图 2 所示。

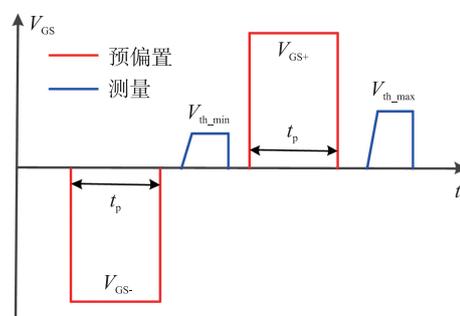


图 2 SiC MOSFET 阈值电压测量示意图

整个流程分为四个阶段,首先施加一个脉冲反向偏压,大小为 V_{GS-} ,持续时间为 t_p ,使得陷阱释放电子达到饱和,阈值电压漂移也达到稳定,然后测量一次阈值电压,此时测得阈值电压最小,定义为 V_{th_min} ;再然后施加一个脉冲正向偏压,大小为 V_{GS+} ,持续时间同样为 t_p ,使得陷阱捕获电子达到饱和,阈值电压漂移也达到稳定,最后再次测量阈值电压,此时测得阈值电压最大,定义为 V_{th_max} 。两次测量可以确定阈值电压变化的上下限,为了更方便地描述阈值电压,定义阈值电压为两者的平均值:

$$V_{th} = \frac{(V_{th_max} + V_{th_min})}{2} \quad (1)$$

2 实验测量

2.1 测量电路

阈值电压的测量方法有很多,不同方法下得到的阈值电压也不尽相同^[15],主流的测量方法主要分为两种,一种是双电源法,一种是单电源法^[16],如图 3 所示。前者需要用到两个电压源,并且实时测量电路中的电流,相对复杂;后者只需要用到一个恒定电流源,测量器件两端电压即可,相对简单,被大多数器件厂商所采用。本文也选择恒定电流法作为

阈值电压测量方法。

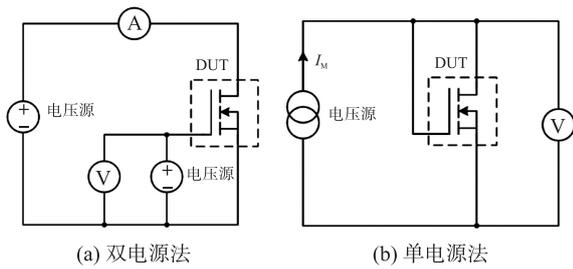


图 3 常用两种阈值电压测量方法

根据图 2 所示的测量示意图,设计的 SiC MOSFET 阈值电压测量电路如图 4 所示,包括偏压加载单元和阈值电压测量单元。开关 S_1 用于控制正向偏压和反向偏压的选择, S_2 用于对待测器件的栅极和漏极短接以便进行阈值电压测量, S_3 用于控制电压偏置和阈值电压测量,不同开关在切换过程中均有 $100 \mu\text{s}$ 的间隔时间防止逻辑判断冲突。具体流程为:

①反向脉冲电压偏置:首先 S_3 使得器件源漏极短接,间隔 $100 \mu\text{s}$ 后 S_1 接反向电压源,持续脉冲时间为 t_p ;

②第一次阈值电压测量:首先 S_1 断开,间隔 $100 \mu\text{s}$ 后 S_2 使得器件栅极和漏极短接,再次间隔 $100 \mu\text{s}$ 后 S_3 接阈值电压测量单元,记录测得电压值即为最小阈值电压;

③正向脉冲电压偏置:首先通过调节 S_3 使得器件源漏极短接,间隔 $100 \mu\text{s}$ 后 S_2 断开,再间隔 $100 \mu\text{s}$ 后 S_1 接正向电压源,持续脉冲时间为 t_p ;

④第二次阈值电压测量:首先 S_1 断开,间隔 $100 \mu\text{s}$ 后 S_2 使得器件栅极和漏极短接,再次间隔 $100 \mu\text{s}$ 后 S_3 接阈值电压测量单元,记录测得电压值即为最大阈值电压。

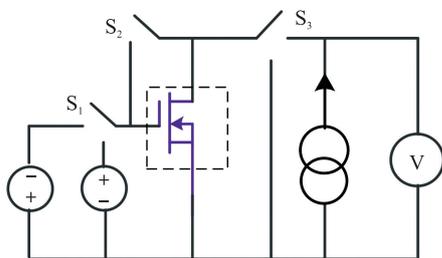


图 4 SiC MOSFET 阈值电压测量电路

2.2 偏置电压和脉冲时间的选择

本文所提方法的核心思想是通过预偏置过程使得待测器件阈值电压漂移达到饱和状态,进而分别测量最小和最大阈值电压。因此,合理选择偏置电压和脉冲时间非常重要。本文以 CREE 公司生产的型号为 C3M0120090D 的器件作为研究对象,实验分

析偏置电压和脉冲时间的选择对测得结果的影响,以此指导预偏置阶段实验条件的选择。

通过控制变量法,首先研究偏置电压大小的选择对测得结果的影响,此时脉冲时间为 10 ms 。为了所提方法的简单性和操作性,正向偏压和反向偏压的大小和持续时间相同,电压变化范围从 5 V 到 15 V ,实验结果如表 1 所示,更直观的阈值电压随偏压大小变化趋势如图 5 所示。可以看出,当反向偏压从 -5 V 向 -10 V 变化时,测得阈值电压一直在下降,说明界面陷阱释放电子并未达到稳定状态,而当反向偏压小于 -11 V 时,测得阈值电压开始趋于稳定,此时阈值电压漂移达到饱和状态。同理可看出正向偏压高于 13 V 时阈值电压漂移才逐渐达到饱和状态。另外,正向漂移量显然比反向漂移量大,说明 SiC MOSFET 栅极氧化层的界面缺陷将更容易捕获更多的电子,造成阈值电压发生正向漂移,这与图 1 中反映出的结果一致。

表 1 不同偏置电压下的实验结果 单位:V

反向偏压	最小阈值电压	正向偏压	最大阈值电压	阈值电压
-15	1.81	15	3.52	2.665
-14	1.81	14	3.52	2.665
-13	1.82	13	3.50	2.66
-12	1.82	12	3.43	2.625
-11	1.83	11	3.35	2.59
-10	1.89	10	3.26	2.575
-9	1.94	9	3.16	2.550
-8	2.01	8	3.05	2.530
-7	2.06	7	2.93	2.495
-6	2.15	6	2.84	2.495
-5	2.30	5	2.63	2.465

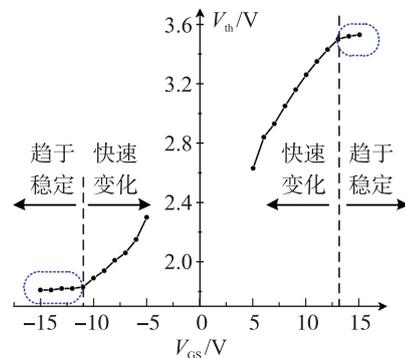


图 5 阈值电压漂移与偏置电压的关系

然后研究脉冲偏置电压的持续时间对测得阈值电压的影响,此时正向偏置电压选择为 15 V ,反向偏置电压选择为 -15 V ,脉冲持续时间变化范围从 0.01 ms 到 100 ms ,实验结果如表 2 所示,更直观的

阈值电压随脉冲持续时间变化趋势如图 6 所示。从结果可以看出,当施加负压持续时间大于 0.1 ms 时,阈值电压漂移便达到稳定,而当施加正压持续时间大于 1 ms 时,阈值电压漂移才达到稳定,所需时间比反向漂移稍长。为了保证正向漂移和反向漂移均能达到饱和,持续时间至少需要 1 ms。

综上,对于预偏置过程的试验条件的选择,正向偏置电压可以选择为 15 V,反向偏置电压选择为 -15 V,持续时间至少为 1 ms,可以满足相关要求。

表 2 不同脉冲持续时间的实验结果

脉冲时间 /ms	最小阈值电压/V	最大阈值电压/V	阈值电压 /V
0.01	1.96	2.74	2.35
0.05	1.88	3.08	2.48
0.1	1.82	3.32	2.57
0.5	1.81	3.46	2.635
1	1.80	3.52	2.66
5	1.81	3.52	2.665
10	1.81	3.52	2.665
50	1.81	3.53	2.67
100	1.81	3.53	2.67

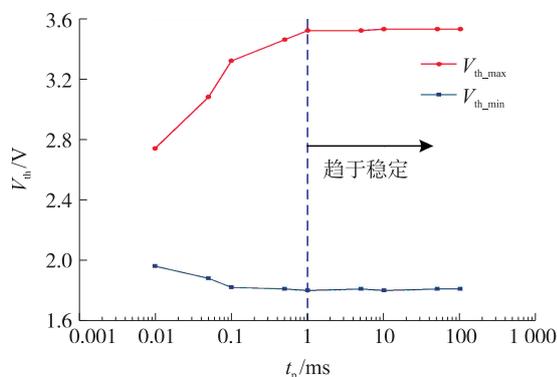


图 6 阈值电压漂移和脉冲偏置电压持续时间的关系

3 结论

本文基于阈值电压弛豫效应的饱和现象提出了一种“预偏置+测量”组合的测量方法来解决 SiC MOSFET 阈值电压测量难题。该方法通过反向预偏压和正向预偏压过程可以获得最小阈值电压和最大阈值电压,为了描述的方便,定义两者平均值作为 SiC MOSFET 的阈值电压。以某型号的器件进行实验测试,讨论了预偏置电压和脉冲持续时间对测量结果的影响,结果表明 ± 15 V 的偏置电压以及至少 1 ms 的脉冲时间可以得到一个可重复的测量结果。对于不同器件预偏置过程的实验条件可能存在不同,但是本文为其确定和选择提供了方法指导和标准范例。

参考文献:

- [1] 张波,邓小川,张有润,等. 宽禁带半导体 SiC 功率器件发展现状及展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009,4(2):111-118.
- [2] 彭咏龙,江涛,李亚斌,等. SiC MOSFET 高频感应加热电源系统研究[J]. 电气传动,2017,47(3):70-73.
- [3] 张经纬,张甜,冯源,等. SiC MOSFET 串联短路动态特性[J]. 电工技术学报,2021,36(12):2446-2458.
- [4] 王彦楠,李铮,杨鹏飞,等. 考虑温度影响的 SiC MOSFET 动态性能分析与优化[J]. 半导体技术, 2021,46(6):466-473.
- [5] 李国文,杭丽君,童安平,等. 串扰有源抑制型 SiC MOSFET 驱动方法[J]. 中国电机工程学报,2021,41(11):3915-3923.
- [6] 王臻卓,王慧,郝春玲. 双馈风电变流器 IGBT 模块损耗及结温的计算分析及变化规律研究[J]. 电子器件, 2017,40(2):296-300.
- [7] Zhang E X,Zhang C X,Fleetwod D M,et al. Bias-Temperature Instabilities in 4H-SiC Metal-Oxide-Semiconductor Capacitors[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability,2012,12(2):391-398.
- [8] Puschkarsky K,Reisinger H,Aichinger T,et al. Threshold Voltage Hysteresis in SiC MOSFETs and Its Impact on Circuit Operation [C]//2017 IEEE International Integrated Reliability Workshop, South Lake Tahoe, CA, USA,2017:1-5.
- [9] European Center for Power Electronics. AQG 324 Qualification of Power Modules for Use in Power Electronics Converter Units (PCUs) in Motor Vehicles [S]. Nuremberg, Germany:ECPE Working Group,2018.
- [10] Lelis A J,Green R,Habersat D B,et al. Basic Mechanisms of Threshold-Voltage Instability and Implications for Reliability Testing of SiC MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices,2015,62(2):316-323.
- [11] Mahapatra S,Parihar N. A Review of NBTI Mechanisms and Models [J]. Microelectronics Reliability, 2018, 81(1):127-135.
- [12] Keita T,Takahisa O,Takuma K,et al. Estimation of Threshold Voltage in SiC Short-Channel MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices,2018,65(7):3077-3080.
- [13] Aichinger T,Rescher G,Pobegen G. Threshold Voltage Peculiarities and Bias Temperature Instabilities of SiC MOSFETs[J]. Microelectronics Reliability,2018,80:68-78.
- [14] 陈杰,邓二平,赵子轩,等. 不同老化试验方法下 SiC MOSFET 失效机理分析[J]. 电工技术学报,2020,35(24):5105-5114.
- [15] Ortiz-Conde A,Garcia F J,Sanchez. A Review of Recent

MOSFET Threshold Voltage Extraction Methods[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(4): 583-596.

[16] Zeng G, Cao H, Chen W, et al. Difference in Device Tem-

perature Determination Using Pn-Junction Forward Voltage and Gate Threshold Voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2781-2793.



王臻卓(1985—),女,河南南阳人,汉族,硕士,副教授,就职于河南工业职业技术学院机电自动化学院,从事电力电子技术研究,wzzdsp@163.com;



任婷婷(1982—),女,山西吕梁人,汉族,硕士,讲师,就职于山西大学电力与建筑学院,从事电力系统运行与控制研究。