

SIC MOSFET器件设计与可靠性研究

崔严匀 袁敏杰 王训辉 章安娜
无锡华润上华科技有限公司 江苏无锡 214061

摘要: 随着科技的发展,近年来,碳化硅电力电子技术已经发展成为一种更加高效、高频和高温的应用场景下硅技术的最有利替代者。相较于传统的硅IGBT,碳化硅无论是在材料性能方面还是在温度的适宜性方面,都有了较大的提高,同时也进一步提高了电子系统的效率和功率目的。就目前来看SIC MOSFET的应用范围也更加广泛,具体体现在电动汽车、混合电动汽车等大功率设备中。其中随着电动汽车的高速发展,如何提高汽车的持续续航里程能力成为电动汽车产业发展中亟待解决的问题。在此背景之下,对于SIC MOSFET的相关应用研究就变得十分重要。

关键词: SIC MOSFET; 器件设计; 可靠性; 材料; 特点; 应用

1 SIC材料的特点

随着绿色可持续发展理念的推行,低碳环保、新能源发电以及能源互联网的发展在我们的日常生活中扮演着越来越重要的角色。其中功率半导体器件的可靠性和相关指标成为研究的重点,这主要是因为器件在能够承受更高的工作电压。更高的电流承载能力、更高的工作频率和转换效率,并在在散热方面也有不俗的表现。就目前来看,对于SI的基本功率器件的研究已经到了瓶颈,这主要是由于对这一物质的开发已经到了SI材料的物理极限。宽禁带材料中的代表是SIC,被认为是一种能够取代和替代SI的材料之一,这一材料则成为近年研究的焦点。

| 材料 | Si | GaN | 4H-SiC |
|--------------------------------|------|------|--------|
| 禁带宽度(eV) | 1.12 | 3.39 | 3.26 |
| 击穿场强(MV/cm) | 0.3 | 2.8 | 3 |
| 迁移率(cm ² /v*s) | 1350 | 1250 | 800 |
| 热导率(W/cm*K) | 1.5 | 2 | 4.9 |
| 饱和电子漂移速率(10 ⁷ cm/s) | 1.5 | 2.4 | 2.2 |

图1 室温下三种半导体材料特性的对比

作者简介:

崔严匀,女,1984-,汉,江西南昌人,硕士,工程师,研究方向:半导体功率器件。

袁敏杰,男,1979-,汉,云南昆明人,学士,工程师,研究方向:半导体功率器件。

王训辉,男,1980-,汉,福建宁德人,学士,工程师,研究方向:半导体功率器件。

章安娜,女,1987-,汉,湖北襄阳人,学士,工程师,研究方向:半导体功率器件。

图1详细列举了相关材料的参数以及数据。SIC的结晶形式较为多样化,其中4H-SIC以其优质的性能受到功率器件领域的青睐,同时也是最常用材料之一。同样作为宽禁带半导体,4H-SIC这一材料的禁带宽度是SI材料的三倍,这就说明,即使是在高温的条件下,SIC材料中的本征载流子浓度也能够维持在一定的低水平上,因此4H-SIC这一器件能够更好的应对高温的工作情况。除此之外,4H-SIC材料的临界击穿电场是SI的10倍之多,导热系数是SI导热系数的三倍之多。相比较于SI基器件而言,4H-SIC这一器件在提高系统能量密度、降低开关过程中的能量损耗以及更耐高温方面都有不俗的表现。

2 SIC MOSFET 器件设计

2.1 SIC MOSFET 元胞设计

在上文中我们提到了关于器件的研究已经成为近年来可持续发展理念下的重点研究项目和研究内容,但就所有的研究方向而言,关于1200V中电流量级器件的可靠性问题的研究内容不多。因此本文将借助相关软件对SIC MOSFET的器件设计和可靠性进行研究。设计的指标参照1200V/41A器件,这一器件的具体参数如图2所示

| 参数 | 耐压(V) | 阈值电压(V) | 导通电阻(mΩ) | 漏源漏电流(μA) | 结壳热阻(K/W) |
|----|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|-----------|
| | V _{DS} 0V | V _{GS} 10V | V _{DS} 20V | I _{DS} 1200V | |
| | I _{DS} 100μA | I _{GS} 10mA | I _{DS} 20A | V _{DS} 0V | |
| | 1200 | 2.4 | 60 | 1 | 0.6 |

图2 1200V41A器件的基本参数

通过对外延层参数、pwell区掺杂分布以及沟道长度等内容的仿真,来得出其中比较关键的参数,从而为后续的研究提供相应的数据支持。其中仿真结构如图3所示。

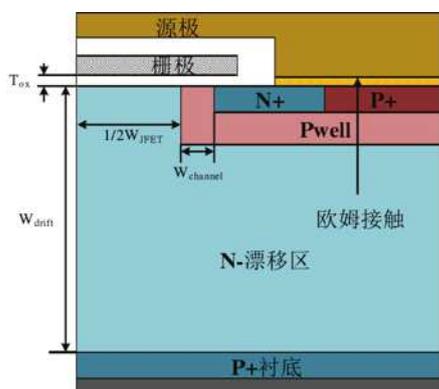


图3 SiC VDMOS元胞结构简图

在上文的分析中，我们了解了器件的导通电阻以及反向耐压能力都和器件的外延层的浓度和厚度密切相关，同时也会对器件的电容特性产生一定的影响。因此我们对器件的总体性能优化离不开对外延相关参数的确定。通过固定的理论公式对器件外延层的数值进行估算。

$$W_D = 2.62 \times 10^{-3} \cdot BV^{1.12} (\mu m)$$

$$N_D = 1.10 \times 10^{20} \cdot BV^{-1.27} (cm^{-3})$$

本文对元胞器件的目标耐压设置为1200V，将终端效率考虑进去后还需要保留有足够的裕度。因此在设置相关数值时将耐压指标设置为2000V。将这些数值带入到具体公式之中后，我们可以得出元胞外延层的理论浓度和厚度，并通过相应的数据计算软件来所得出的数据进行优化，并将外延层的参数确定下来。

2.2 终端设计

终端结构的设计目的是为了保护器件的主要结构区域。终端设计不仅能够减小切割晶圆片所带来的晶格损伤，同时还能够有效削弱元胞边缘的电厂集中。目前比较常用的终端结构有场板和场限环结构，其中场板结构相较而言在操作上较为简单，但是终端效率低，而与之相反的场限环结构则是和主结构相同，不需要额外的制作工艺，并对离子所注入的剂量不敏感并且效率较高。因此在主流设计方案中，更倾向于选择场限环结构。而场限环结构在运作方式上主要是通过改变元胞表面的电场分布来减少出现电场集中的问题，从而实现器件击穿电压的目的。

3 SIC MOSFET 可靠性与测试平台

3.1 可靠性原理

在所有的电力电子应用汇总，功率器件主要应用于导通和截止状态之间的切换。因此在使用过程中，为了能够获得最佳的使用效率，就需要降低开关的损耗程度，减少在开关过程中产生的缓冲。我们借助图4来说明这

种情况。

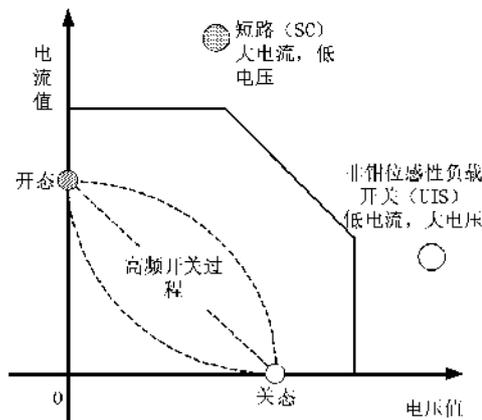


图4 功率器件开关过程安全工作区

图4重点强调了基于安全工作期的功率器件工作条件示意图，并在导通和截止之间的切换方式和切换状态，都是需要遵循不同的轨迹进行的，目的就是为能够根据需求来调整开关。

在越来越多的实际应用中，对于器件的性能要求也在不断提高，器件的使用不仅仅是在安全区内的工作，同时也需要承受更多的其他瞬时情况。例如负载情况、短路等意外情况下，器件会受到越来越多的固态状态电流的调节和限制。

3.1.1 短路开关故障

短路开关故障的因素有有很多中，比较常见的有人为因素和电路老化因素，但无论是什么因素，都会出现相同的故障模式。即当短路发生后，整个电路都会在短时间内通过较大的短路电流，导致整个电路都会处于一种大功率下的工作状态之中，这也增加了开关在短路状态下失效几率，因此器件能够在发生短路时不失效成为辨别开关器件的重要指标。

3.1.2 非钳位感性负载开关UIS故障

SIC MOSFET应用于打击驱动和逆变器系统中时，感性负载将会与SIC MOSFET的漏端连接起来。同时当感性负载的两端并没有持续并联到续流二极管时，器件就会在断开之后将负载中的电流管道漏端之中，导致器件在短时间内进入雪崩击穿的状态之中。在这一过程中，非钳位感性负载开关将会不断的受到感性负载所带来的冲击，导致器件无法工作甚至是失效。

3.2 可靠性测试

3.2.1 短路测试平台

在PCB的设计之中，由于短路测试在测试中所使用的是20A以上的器件，这也对PCB板的承受能力提出了更高的要求。如果在测试过程中仍然使用常规的铜线来

作为导线,就会导致PCB板烧毁。因此为了能够实现实验效果的最大化,通过更大的电流,我们采用阻焊层开窗人工加锡的方法来是PCB能够符合实验的要求。

首先测试的平台我们选择62EM1型号驱动,这一驱动的基本特点在于能够通过比较大的电流,并且所能承受的电压较大,开关频率能够达到200kHz。除此之外,驱动自身携带的栅电阻有 1.1Ω ,因此为了能够减少阻力过小而导致驱动发生剧烈震动这一问题,就需要充分结合和考虑电路的寄生参数。

其次在实验过程中,我们选择将两个较大的电阻并联,并选择直流母排电容与多个电解电容并联,使各个电容能够通过铜板相互连接在一起。但由于短路时间较短,在实验中我们只需要选择两个电容来并联。测试平台的泄放回路是由空气开关和功率电阻来共同实现的。因此在实现过程中,我们只需要将电流测试使用串联高精度分流电阻SDN-414-01的方式,通过测量分流电阻的两端电压值来判断当前电流的大小。

最后则是在测量设备的选择中,在评估SiC MOSFET短路能量中,必须要保证测量的可行性和测量的精确度,其中测量信号的最大等效带宽是一个非常重要的参考数值,带宽的计算公式如下:

$$BW = \frac{0.35}{tr}$$

在这一公式中, tr 代表被测信号的最快上升和下降的时间。这主要是由于SiC MOSFET器件具有比较高的开关速度,通常电流和电压的上升时间都是具有一定范围的。但在短路试验中,可能会出现高于开关频率的信号,因此为了能够尽可能的多捕捉到短路信号动态,就需要在选择相应测量设备时留出足够的余量,从而保证测试的科学性和准确性。

3.2.2 UIS测试平台

UIS同样作为器件测试平台,相较于短路测试中存在比较明显的差异:

一是UIS在测试过程中,负载使用的是电感负载,UIS平台中的电感负载是空心电感线圈,以此来避免在实验过程中可能出现的磁饱和现象。

二是UIS在测试中所需要的母排电容量要远远大于

电路测试中的电容量。尤其是在进行重复实验时,仍然需要保持母线电压处于起初的设定值之中。

三是测量设备的选择存在一定的差异。由于UIS在测试过程中,可能会进入雪崩状态,产生漏电的问题。因此在器件的使用中我,我们不再使用短路测试中的常规电压探头,而是选择适合UIS测试的电压探头。以此来保证实验的正常进行,保证实验结构的科学性、合理性以及准确性。

4 结论

近年来,对于SiC电子电力技术的高速发展,这一技术的使用效率也在不断提高。尤其是在高频和高温的场景下,SiC技术的能够完美的解决这以问题。除此之外,SiC MOSFET由于受到较高的开关速度。较低的开关损耗以及高击穿电场和耐高温等优异性能的影响,正在逐步替代碳化硅在电力电子技术中的应用,同时也成为厂商竞争的重要器件之一。

参考文献:

- [1]黄宇.1.2kV SiC MOSFET 器件设计及可靠性研究[D].东南大学,2015.
- [2]郭元旭.高压4H-SiC MOSFET 器件设计与可靠性研究[D].电子科技大学,2018.
- [3]陈喜明.高压场控型碳化硅功率晶体管的设计与制造[D].电子科技大学,2021.
- [4]曹蕾.碳化硅功率MOSFET 器件短路特性研究[D].浙江大学,2020.
- [5]包梦恬.碳化硅LDMOS 器件高压新结构研究[D].哈尔滨工程大学,2019.
- [6]李焕.基于SiC MOSFET的浪涌可靠性研究[D].浙江大学,2020.
- [7]赵云龙.4H-SiC MOS 器件栅氧界面特性研究[D].西安电子科技大学,2020.
- [8]王延浩.温湿度环境下功率器件耐压可靠性研究[D].华北电力大学(北京),2021.
- [9]杨啸.SiC 功率MOSFET 器件短路及UIS特性分析[D].电子科技大学,2021.
- [10]何艳静.高性能4H-SiC 功率VDMOSFET 器件设计及关键工艺研究[D].西安电子科技大学,2018.