

一种基于对称 PCB 结构的 GaN 器件高带宽电流检测方法

梅 杨, 付 强

(北京市电力节能关键技术协同创新中心, 北方工业大学, 北京 100144)

摘要: 针对氮化镓器件高频开关动作, 开关电流难以准确测量的难题, 提出了一种基于对称印制电路板结构的高带宽电流检测方法。该方法利用电流分流器原理检测氮化镓器件电流, 基于磁感应原理对印制电路板进行了优化设计, 通过控制电流在印制电路板上的流通过程, 使分流电阻的寄生电感部分被抵消, 并配合适当的补偿网络和前置放大器, 实现在宽频带测量范围内具有平整的幅频特性。同时, 本文提出的电流检测方法所需印制电路板结构紧凑, 较商用同轴分流器易于安装。搭建了一套适用于氮化镓器件的宽频带双脉冲测试电路, 将本文提出的电流检测方法 with 商用同轴分流器检测方法进行了对比测试。测试结果验证了所提出电流检测方法的有效性和准确性。

关键词: 氮化镓器件; 电流检测; 寄生电感; 双脉冲测试

DOI: 10.12067/ATEEE2102016

文章编号: 1003-3076(2021)08-0060-06

中图分类号: TM93

1 引言

作为电力电子变换器核心之一的功率半导体器件, 其每次更新换代都会使变换器性能得到提升。第三代宽禁带半导体器件以氮化镓 (Gallium nitride, GaN) 为代表, 与传统的 Si 器件相比更适合工作于高频、高温、高效率环境中, 可以极大地减小变换器中磁性元件尺寸, 提高功率密度^[1-3]。

由于快速 GaN 器件所产生的 du/dt 和 di/dt 通常是硅器件和碳化硅器件的数倍甚至数十倍, 电压电流的上升、下降时间更是低至数 ns 的量级。如何准确、快速地获得高频工作下的 GaN 器件开关电流就变得相当困难。此外, 由于 GaN 器件具有极高的开关速度和较小的栅极电压安全裕度, 因此对寄生电感非常敏感^[4]。而使用传统的分流器测量装置时, 引线部分会给主电路增加额外的寄生电感, 寄生电感过大会严重影响开关过程, 测量结果可能无法准确反映开关特性。随着技术的成熟, GaN 器件的开关速度将变得越来越快, 体积将变得越来越小, 这对开关电流的测量提出了更大的挑战。迄今为止, 缺少一种有效的方法来测量快速 GaN 器件的开关电流^[5-7]。

本文提出了一种基于对称印制电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 结构的 GaN 器件高带宽电流检测方法。此方法利用分流器原理获得器件电流, 不同于文献[8]直接利用同轴分流器测量电流, 而是利用磁感应原理设计出的低寄生电感的电流测量方法测量电流。所提出的方法由于其尺寸小和寄生参数小而具有高带宽, 保证了对主电路的影响较小, 并可获得较为平稳的开关电流。依照所提方法搭建了一套基于 GaN 器件的双脉冲测试电路, 与商用同轴分流器进行了对比测试。测试结果验证了所提电流检测方法的有效性。

2 现有的电流检测方法

目前常见的功率半导体电流检测方法有三种: 罗氏线圈、有源电流互感器和电流分流器。本节总结了它们在电流检测方面的优势和局限性。

罗氏线圈^[9,10]利用电磁感应原理测量功率半导体器件电流。它主要由一个拾波线圈和一个积分器组成。线圈具有圆形螺旋结构, 具有良好的抗外部磁干扰能力。罗氏线圈的另一个优点是不存在饱和问题, 因此可以测量非常大的电流。这种方法的缺点在于被测导体和线圈之间的互感很小, 需要提高

收稿日期: 2021-02-24

基金项目: 北京市自然科学基金项目(3192012)、国家自然科学基金项目(51477003)

作者简介: 梅 杨 (1981-), 女, 湖北籍, 教授, 博士, 研究方向为电力电子与电力传动;

付 强 (1996-), 男, 陕西籍, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

线圈匝数来提高灵敏度,这会导致线圈电感和寄生电容较大,从而限制带宽。

有源电流互感器通过直接测量磁场,再利用电与磁之间的关系推算电流^[11,12]。这种方法不用设计额外的测量电路。但是直接测量磁场抗扰性差,带宽受限,在实际的电路设计中很难应用。另外,插入阻抗随频率的增加而增加,过大的插入阻抗会影响被测电路的正常工作。

电流分流器^[13]利用分流电阻将采样电压信号等比转换为电流信号。同轴分流器便是利用分流器方法测量电流的典型。其内部使用高电阻率和非常细的导体来减轻邻近效应和趋肤效应,因此电阻在非常高的频率下几乎保持不变。另一方面,同轴结构在薄导体内部产生没有磁场的空间,因此,如果从细导体内部获取电压信号,则可以有效地减小电阻器的等效串联电感。所以,同轴分流器具有非常高的带宽,被广泛用于测量开关电源的电流。但是,商用同轴电流分流器的尺寸较大,如图 1 所示,并且会在电路中引入额外的寄生电感,这对于快速 GaN 器件是不可接受的。

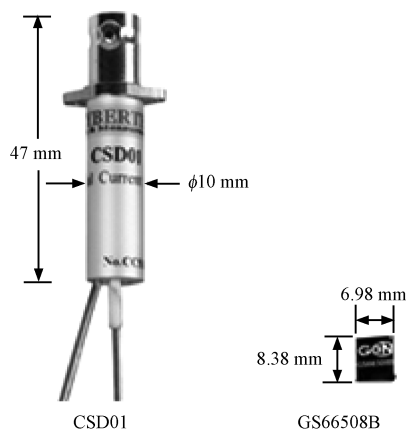


图 1 同轴分流器与 GaN 尺寸对比图

Fig.1 Coaxial shunt and GaN size comparison chart

上述三种方式中,利用罗氏线圈和有源电流互感器方法测量带宽太低,无法满足快速 GaN 器件的要求。同轴分流器具有最高带宽,因此在开关电流测量中使用最广泛,但是在应用此方法时必须要考虑寄生电感的问题。

3 适用于 GaN 器件的高带宽电流检测方法

双脉冲测试^[14]是广泛应用于 MOSFET 和 IGBT 等功率开关元件特性评估的一种测试方法。传统的双脉冲测试电路如图 2 所示。用高压隔离探头测量

漏-源级电压 U_{DS} 及栅-源级电压 U_{GS} 的电压大小,用罗氏线圈测量源极电流 I_S 的大小。

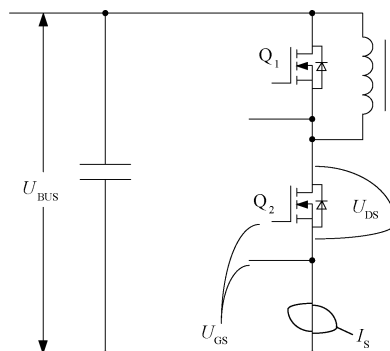


图 2 双脉冲测试电路

Fig.2 Double pulse test circuit

由于在传统的双脉冲测试中需要用罗氏线圈来测量开关器件的电流,本文考虑到罗氏线圈的引入会对主电路造成额外的电感及寄生电容,从而限制带宽,无法满足快速 GaN 器件的要求。提出一种新颖的适用于 GaN 器件的高带宽电流检测方法,改进的双脉冲测试电路如图 3 所示,仅需要在传统的双脉冲测试电路中串联采样电阻。

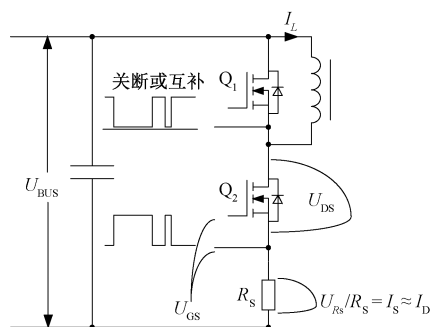


图 3 改进的双脉冲测试电路

Fig.3 Improved double pulse test circuit

改进的双脉冲测试电路工作原理如下: Q_1 可以关断也可以施加与 Q_2 互补的开关信号。 Q_2 是被测设备。在开关过程中,电感电流 I_L 几乎保持恒定,可以等效于恒定电流源。漏极电流 I_D 流经包含输入电容器、上部器件 Q_1 和下部器件 Q_2 的电流回路。只需通过低压高带宽电压探头测量串联采样电阻的电压即可通过计算获得待测 GaN 器件上的源极电流 I_S 。

对于一个理想的电阻来说欧姆定律在任意频率下均成立,然而实际存在的电阻器却并非理想电阻,它们不可避免地存在寄生电感和寄生电容。一般来说,尺寸较小的贴片金属膜电阻体本身的寄生电容非常小,由 RC 时间常数的公式 $\tau=RC$ 可知,在 R 和

C 都非常小的情况下,寄生电容带来的影响可以忽略。相对地,根据电感和电阻的时间常数 $\tau=L/R$ 可以得到,对于阻值较小的电阻来说,寄生电感^[15,16]带来的影响比较大。

就一个尺寸确定的电阻而言,降低其自身的电感是非常困难的,因此,拟借鉴同轴分流器的结构和原理,通过利用电流路径的互感关系抵消寄生电感上的电压,使得检测电路收到的电压幅值几乎全部是由电阻分量产生的,从而实现降低检测电阻的寄生电感的目的。

如图4(a)所示的采样环节等效电路模型,该电路的输出电压 u_o 满足以下关系:

$$u_o = L_2 \frac{di_i}{dt} - M \frac{di_i}{dt} + R_S i_i \quad (1)$$

式中, L_2 为寄生电感; M 为线路互感; R_S 为采样电阻。

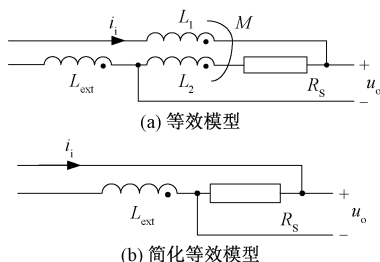


图4 采样环节等效电路模型

Fig.4 Sampling link equivalent circuit model

此结构基本保证了寄生电感 L_1 、 L_2 和它们之间的互感 M 之间满足:

$$L_1 = L_2 = M \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得到:

$$u_o = R_S i_i \quad (3)$$

即可证明所设计的采样环节输出电压只与测量电阻的阻值有关,其寄生电感得到了抵消。但是考虑到所设计的采样电路引线部分仍具有较高的寄生电感 L_{ext} ,为了避免其对主电路产生影响,也需要将引线部分的寄生电感 L_{ext} 进行消除。采样环节简化等效电路如图4(b)所示。

上述讨论了拟用的采样电路,并对其进行了详细的分析后可以知道,所设计采样电路利用磁感应原理将寄生电感抵消,但是在实际电路中由于引线部分仍具有较高的寄生电感 L_{ext} ,会对主电路造成影响,考虑到快速 GaN 器件对寄生电感非常敏感的特性,为了获得更为准确的开关电流,提出一种基于对称 PCB 结构的 GaN 器件高带宽电流检测方法,具

体实现如下:

常规四层 PCB 电路板结构图如图5所示,顶层和第一内层、底层和第二内层的间距非常小,利用四层板的层叠结构特点,同时,选择电阻体位于底面的贴片电阻,保证贴片电阻的电阻体和 PCB 紧贴。

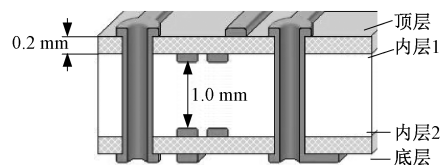


图5 常规四层 PCB 结构图

Fig.5 Conventional four-layer PCB structure diagram

为了尽可能减小回路的寄生电感,需要电流尽可能对称分布,因此需要将贴片采样电阻分别置于 PCB 的顶层和底层,采样电阻的摆放位置的剖面图如图6所示。

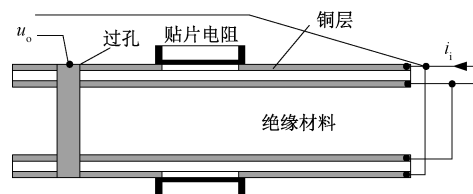


图6 低寄生电感布局设计

Fig.6 Low parasitic inductance layout design

图6中,采样电阻分别安装在 PCB 的正面和反面,器件的动态电流沿顶层和底层经过采样电阻流到左侧,经过过孔从内电层返回,由于在整个区域内的电流总和为零,该区域内的总的磁通变化量并不会体现在 PCB 的外部,从而保证了该部分整体对外几乎呈现纯电阻的特性,达到了低寄生电感的目的。

4 基于 GaN 器件的双脉冲实验测试

为了验证所提电流检测方法的有效性,基于 GaN Systems 公司的 GS66508B 搭建了所设计的双脉冲测试电路,测试电路拓扑如图3所示。实验条件见表1。

表1 实验条件

Tab.1 Experimental conditions

参数	数值
测试用电感 $L/\mu\text{H}$	55
测试母线电压 U_{BUS}/V	80
测试驱动电压 U_{G}/V	+5/-2.5

通过对电路中的开关器件施加相应的开关信号来检测 Q_2 的开关电流。分别使用以下方案进行

GaN 器件的源极电流测试:

(1)方案一:利用 CSD01 同轴分流器进行电流检测。

(2)方案二:传统串入电阻检测方法,即使用普通贴片采样电阻,未按照低寄生电感的布局进行设计。

(3)方案三:利用本文所提出的基于对称 PCB 结构的高带宽 GaN 器件电流检测方法。

另外,本文为了尽可能准确地测量得到采样电阻上的电压,保证测量信号的有效带宽,在示波器采集电压信号的环节没有设置任何信号隔离措施。但是,为了安全起见,在所设计的电流检测方法的验证实验中,对所有电源和控制信号均做了隔离。

为了体现出传统方法的引线部分寄生电感的影响,选择器件关断时的波形进行分析。测试结果如图 7 所示。

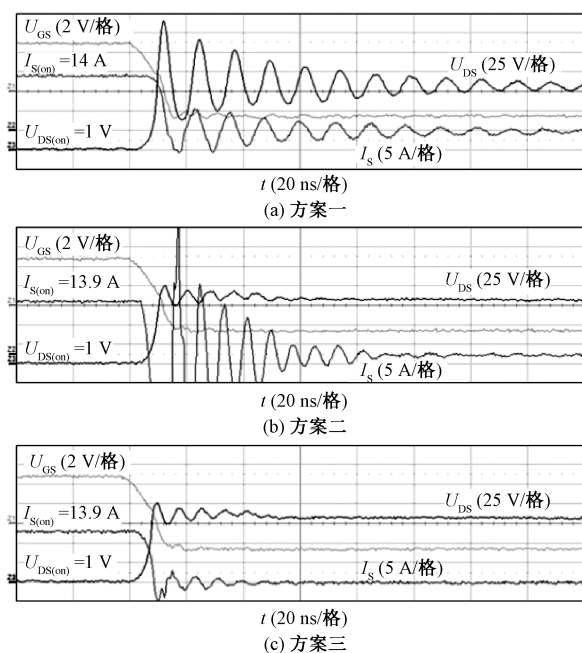


图 7 三种电流检测方案测试图

Fig.7 Test chart of three current detection schemes

对实验波形的对比分析结果见表 2。如图 7(a)所示,采用方案一,利用同轴分流器检测器件关断过程电流,其电流下降时间为 5 ns,电流在此过程中下降了大约 20 A。母线电压过冲为 80 V。计算可得电流变化率为 4 A/ns,寄生电感大小为 20 nH。如图 7(b)所示,采用方案二,利用传统的串入电阻方法检测电流,显然电流振荡幅度大,已超过目前显示的量程,寄生电感远大于方案一。如图 7(c)所示,采用方案三,利用本文提出的基于对称 PCB

结构的高带宽 GaN 器件电流检测方法检测器件电流,从电流实验波形可以计算得到回路寄生电感约为 5 nH。根据双脉冲测试的基本原理,如果检测方案中引入的回路寄生电感越小,则测量准确度越高。因此,采用本文所提出的方案三,其测量准确度明显高于方案一和方案二。

表 2 不同方案对比分析结果

Tab.2 Comparative analysis results of different schemes			
参数	方案一	方案二	方案三
电压过冲/V	80(约合 100%)	20(约合 25%)	20(约合 25%)
电流振荡/A	11	>60	8
回路寄生电感/nH	20	—	5
测量准确度	较低	很低	较高

由上述实验结果可得,使用同轴分流器测量开关电流虽然电流测试精度较高,带宽较高,但是给主电路带来了很大的回路电感,对主电路负面影响较大。其中,使用同轴分流器做电流采样时的主电路寄生电感值约 20 nH;使用传统串入电阻检测方法的电流波形振荡非常大,测量结果不准确,这里不再对其寄生电感进行计算。而使用本文所提的电流检测方法测得寄生电感值约 5 nH,对主电路负面影响较小。由此可以证明使用经过本文所提出的电流检测方案对主电路的影响明显小于使用同轴分流器的方案,并且测试电流振荡较小,较为准确。

5 结论

本文提出了一种基于对称 PCB 结构的 GaN 器件高带宽电流检测方法。利用电流分流器原理检测 GaN 器件电流,基于磁感应原理对 PCB 进行了优化设计,通过控制电流在 PCB 上的流电路径,使分流电阻的寄生电感部分被抵消,并配合适当的补偿网络和前置放大器,实现了在宽频带测量范围内具有平整的幅频特性。实验测试结果表明:

(1)本文所提方法显著降低了电流检测回路的寄生电感大小,从而保证了在高频工作条件下 GaN 器件电流检测的快速性和准确性。

(2)通过与商用分流器的比较证明,基于本文方法的检测电路结构紧凑,易于实现,适用于各类 GaN 电力电子变换器,具有很广阔的应用前景。

参考文献 (References):

[1] Garcia-Rodriguez L, Williams E, Balda J C, et al. Dual-

- stage microinverter design with a GaN-based interleaved flyback converter stage [A]. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. Denver, CO, 2013. 4496-4502.
- [2] Zhang W, Wang F, Costinett D J, et al. Investigation of Gallium Nitride devices in high-frequency LLC resonant converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (1): 571-583.
- [3] 李媛, 马红波, 柯玉连 (Li Yuan, Ma Hongbo, Ke Yulian). 基于 GaN HEMT 的高效率、高功率密度 LLC 谐振变换器的设计 (Design of high efficiency and high power density GaN-based LLC converter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (10): 58-64, 88.
- [4] Wang K, Yang X, Wang Land, et al. Instability analysis and oscillation suppression of enhancement-mode GaN devices in half-bridge circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (2): 1585-1596.
- [5] Lautner J, Piepenbreier B. Analysis of GaN HEMT switching behavior [A]. 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia [C]. Seoul, 2015. 567-574.
- [6] 彭子和, 秦海鸿, 张英, 等 (Peng Zihe, Qin Haihong, Zhang Ying, et al.). 高压 eGaN HEMT 开关行为及其影响因素研究 (Analysis of switching behavior and influence factor of high voltage eGaN HEMT) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (4): 17-26.
- [7] 魏小富, 陈神炀, 朱宏铿, 等 (Wei Xiaofu, Chen Shenyang, Zhu Hongkeng, et al.). 基于 GaN 器件的高功率密度 LLC 谐振变换器的研究 (Research on high power density LLC resonant converter based on GaN device) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (8): 63-70.
- [8] 罗欣儿, 张雅静, 童亦斌, 等 (Luo Xiner, Zhang Yajing, Tong Yibin, et al.). 基于桥式电路的氮化镓开关损耗测试 (Test of Gallium nitride switching loss based on bridge circuit) [J]. 电源学报 (Journal of Power Supply), 2020, 18 (4): 24-27.
- [9] Wang J, Shen Z, Burgos R, et al. Design of a high-bandwidth Rogowski current sensor for gate-drive shortcircuit protection of 1.7 kV SiC MOSFET power modules [A]. 2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications [C]. Blacksburg, 2015. 104-107.
- [10] Ziegler S, Woodward R C, Iu H H C, et al. Current sensing techniques: A review [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9 (4): 354-376.
- [11] Poulichet P, Costa F, Laboure E. A new high-current large-bandwidth dc active current probe for power electronics measurements [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52 (1): 243-254.
- [12] 黄汉华, 沈凉平, 李宣成 (Huang Hanhua, Shen Lianping, Li Xuancheng). 基于霍尔效应的直流电流检测实验研究 (Research on AC and DC current detection circuit based on hall effect) [J]. 信息通信 (Information & Communications), 2016, (3): 58-59.
- [13] Wang K, Yang X, Li H, et al. A high-bandwidth integrated current measurement for detecting switching current of fast GaN devices [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (7): 6199-6210.
- [14] 常焱, 周宇, 罗皓泽, 等 (Chang Yao, Zhou Yu, Luo Haoze, et al.). 压接式 IGBT 模块的开关特性测试与分析 (Test and analysis of switching performance for press-pack IGBT modules) [J]. 电源学报 (Journal of Power Supply), 2017, 15 (6): 179-186.
- [15] 张雅静, 郑琼林, 李艳 (Zhang Yajing, Zheng Qionglin, Li Yan). 考虑寄生参数的高压 GaN 高电子迁移率晶体管的逆变器动态过程分析 (Dynamic analysis of inverter based on high voltage GaN high electron mobility transistor) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (12): 126-134.
- [16] Wang K, Yang X, Wang L, et al. Instability analysis and oscillation suppression of enhancement-mode GaN devices in half-bridge circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (2): 1585-1596.

A high bandwidth current measurement method for GaN devices based on symmetrical PCB structure

MEI Yang, FU Qiang

(Collaborative Innovation Center of Key Power Energy-Saving Technologies in Beijing,
North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: For the GaN device high-frequency switching action, the current is difficult to be measured accurately, and a high-bandwidth current detection method based on symmetric PCB structure is proposed. The method uses the current shunt principle to detect GaN device current, optimizes the design of the printed circuit board based on the magnetic induction principle, makes the parasitic inductance of the shunt resistor partially canceled by controlling the current flow path on the PCB board, and cooperates with appropriate compensation networks and preamplifiers to achieve a flat amplitude and frequency characteristic in the wide bandwidth measurement range. At the same time, the proposed current detection method requires a compact PCB board, which is easier to install than the commercial coaxial shunt. A wide-band double-pulse test circuit for GaN devices is built, and the current detection method proposed in this paper is compared with the commercial coaxial shunt detection method. The test results verify the effectiveness and accuracy of the proposed current detection method.

Key words: GaN device; current measurement; parasitic inductance; double pulse test