DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.1 **中图分类号**：TN386 **文献标志码**：A

GaN/SiC Cascode 器件性能及其在 LLC 谐振变换器中的应用

周郁明(中国电源学会会员)，周伽慧，刘航志(中国电源学会会员)
(安徽工业大学安徽省电力电子与运动控制高校重点实验室，马鞍山 243002)

摘要：氮化镓/碳化硅级联 GaN/SiC Cascode(gallium nitride/silicon carbide Cascode)器件是 1 种利用低压 GaN 器件作辅助开关，将高压耗尽型碳化硅器件转变为增强型工作模式的组合结构。结合氮化镓高电子迁移率晶体管 GaN HEMT(gallium nitride high electron mobility transistor)开关速度快、栅极驱动简单和碳化硅结型场效应晶体管 SiC JFET(silicon carbide junction field-effect transistor)高耐压的特点，利用低压增强型 GaN HEMT 和高压耗尽型 SiC JFET 构建了常关型级联器件。详细分析了 GaN/SiC Cascode 器件的工作原理和开关过程，测试了 GaN/SiC Cascode 器件的静态特性，搭建了双脉冲测试平台，对比了 GaN/SiC Cascode 器件、Si/SiC Cascode 器件和 SiC JFET 3 种器件在不同电流等级下的开关损耗，结果表明，GaN/SiC Cascode 器件具有更低的关断损耗。将 3 种器件应用到零电压开通的 LLC 谐振变换器，测试了变换器的转换效率，结果表明，基于 GaN/SiC Cascode 器件的 LLC 谐振变换器具有更高的转换效率。

关键词：GaN/SiC Cascode 器件；开关损耗；双脉冲测试；LLC 谐振变换器；转换效率

Performance of GaN/SiC Cascode Device and Its Application in LLC Resonant Converter

ZHOU Yuming, *Member*, *CPSS*, ZHOU Jiahui, LIU Hangzhi, *Member*, *CPSS*
(Anhui University Key Laboratory of Power Electronics and Motion control, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: The gallium nitride/silicon carbide (GaN/SiC) Cascode device is a composite structure, which employs a low-voltage GaN device as an assistant switch to change the high-voltage depletion-mode SiC device into an enhancement-mode device. A normally-off GaN/SiC Cascode device was constructed by low-voltage enhancement-mode gallium nitride high electron mobility transistor (GaN HEMT) and high-voltage depletion-mode silicon carbide junction field-effect transistor (SiC JFET). The Cascode device combined the advantages of GaN HEMT such as high switching speed and simple gate-driving circuit and the high blocking voltage of SiC JFET. Both the operating principle and the switching process of GaN/SiC Cascode device were analyzed in detail, and its static characteristics were also tested. A double-pulse test platform was constructed, and the switching loss of the GaN/SiC Cascode device was compared with those of the Si/SiC Cascode device and SiC JFET at varying load current. Results show that the turn-off loss of GaN/SiC Cascode device was the lowest. In addition, the three devices were applied in an LLC resonant converter respectively, and the conversion efficiency of the converter was tested, indicating that the LLC resonant converter based on GaN/SiC Cascode device exhibited the highest conversion efficiency.

Keywords: Gallium nitride/silicon carbide (GaN/SiC) Cascode device; switching loss; double-pulse test; LLC resonant converter; conversion efficiency

收稿日期：2023-09-08；**修回日期**：2023-10-12；**录用日期**：2023-11-04；**网络首发日期**：2024-03-27
基金项目：安徽省自然科学基金资助项目(2008085ME157)
This work is supported by Anhui Provincial Natural Science Foundation under the grant 2008085ME157

与传统硅 Si(silicon)材料的功率半导体器件相比，1 种基于宽禁带半导体材料碳化硅 SiC(silicon carbide)的功率半导体器件具有更高的工作频率、更低的通态电阻、更高的击穿电压和更高的工作温度[1-2]，这些优异的特性使得它们能胜任高功率密

度、高效率的功率变换领域[3-6]。目前已经商业化的碳化硅功率半导体器件有肖特基势垒二极管 SBD(Schottky barrier diode)、结型场效应晶体管 JFET(junction field-effect transistor)、金属–氧化物–半导体场效应晶体管 MOSFET(metal-oxide-semi-conductor field-effect transistor)。相较于 SiC MOSFET，SiC JFET 由于无栅极氧化层，制造工艺更为简单并且具有更高的电子迁移率、更低的通态电阻和更小的结电容[7]。然而，出于对性能和成本的考虑，SiC JFET 经常被设计成耗尽型器件，这给习惯于应用增强型器件的电路设计人员带来诸多不便。实际应用中，耗尽型 SiC JFET 可以通过串联 1 只低压增强型器件来实现增强型工作模式，这一组合称为级联(Cascode)器件[8]。目前市场上在售的 SiC Cascode 器件主要由低压 Si MOSFET 与 SiC JFET 构成，这种器件无需负压驱动，仅需驱动 Si MOSFET 便可驱动整个 Cascode 器件。虽然 Si MOSFET 的成本较低，但由于 Si 材料的禁带宽度较窄且电子漂移速度较慢，这可能成为限制 Si/SiC Cascode 器件性能的瓶颈。

另一种基于宽禁带半导体材料氮化镓 GaN (gallium nitride)的功率半导体器件，由于具有电子迁移率高、开关速度快等优点，已经大规模应用于中小功率场合，如基于氮化镓高电子迁移率晶体管 GaN HEMT(gallium nitride high electron mobility transistor)的充电器，具有功率密度大、充电速度快等优点[9-12]。GaN HEMT 通常为横向器件，击穿电压较低，但是由于其结构和材料的特殊性，以及更小的尺寸，这使得 GaN HEMT 的极间电容更小，因而 GaN HEMT 的工作频率更高。在 Cascode 器件结构中，用 GaN HEMT 取代 Si MOSFET，构成 GaN/SiC Cascode 器件，可以发挥 2 种宽禁带半导体器件的优势，使得 Cascode 器件的工作频率更高、损耗更低。

最早的 GaN/SiC Cascode 器件由斯坦福大学的 Xu 等于 2020 年提出[13]，该器件由 100 V 的增强型氮化镓场效应管 GaN FET(gallium nitride field-effect transistor)和 1 200 V 的耗尽型 SiC JFET 构成，充分发挥了 GaN FET 的低极间电容、易于驱动及 SiC JFET 低通态电阻的优点，在开关频率为 13 MHz、额定功率为 700 W 的 E 类逆变器中应用，逆变器的工作效率达到了 91.1%。香港科技大学的 Zhong 等利用 40 V 的增强型 GaN FET 和 650 V 的耗尽型 SiC JFET 构成了 GaN/SiC Cascode 器件[14]，这个由全宽禁带半导体功率器件构成的 Cascode 器件在阈值电压热稳定性、通态电阻退化、反向传导能力等方面表现出优异的特性；Wang 等利用双脉冲电路对比了相同电压等级的Si/SiC Cascode器件、沟槽栅 SiC MOSFET 和平面栅 SiC MOSFET 的开关特性[15]，结果表明，由于 GaN 器件具有极低的栅极电荷，因此 GaN/SiC Cascode 器件的驱动电压是 Si MOSFET 和 SiC MOSFET 的 40%~60%，开关损耗也是这 4 种功率器件中最低的。

GaN 和 SiC 是 2 种不同性质的材料，目前的半导体技术还不能将 GaN 器件和 SiC 器件集成在同一个衬底上制成三端器件，因而现有的 GaN/SiC Cascode 器件均是由分立封装的 GaN HEMT 和 SiC JFET 构成。本文利用表面贴装的 GaN HEMT 和 TO-247 封装的 SiC JFET 构成 GaN/SiC Cascode 器件，详细分析了 GaN/SiC Cascode 器件的工作原理，测试了 GaN/SiC Cascode 器件的静态特性和开关特性，并将 GaN/SiC Cascode 器件应用到 LLC 谐振变换器电路，测试了变换器的转换效率，证实了 GaN/SiC Cascode 器件优异的开关特性。

1 GaN/SiC Cascode 器件工作原理与静态特性

1.1 Cascode 器件结构

GaN/SiC Cascode 器件是将高压耗尽型 SiC JFET 与低压增强型 GaN HEMT 串联，即 JFET 的源极与 GaN HEMT 的漏极相连、JFET 的栅极与 GaN HEMT 的源极相连，组成三端的共源共栅结构。整个器件的栅极(G)为 GaN HEMT 的栅极、漏极(D)为 SiC JFET 的漏极、源极(S)为 GaN HEMT 的源极，具体结构如图 1 所示。从图 1 可以看出，

SiC JFET 的栅源极电压($V_{GS,J}$)与 GaN HEMT 的漏源极电压($V_{DS,G}$)绝对值相等，互为负值，因而 SiC JFET 的开通和关断由 GaN HEMT 的漏源极电压控制，在电路中应用时，仅需控制 GaN HEMT 的通断就可以达到控制 SiC JFET 通断的目的。

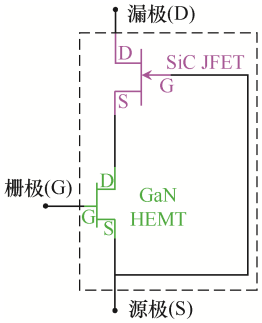


图 1　GaN/SiC Cascode 器件结构

Fig. 1 Structure of GaN/SiC Cascode device

1.2　工作原理

当 GaN HEMT 栅极电压为 0，GaN HEMT 处于未导通状态时，电路的直流电压通过耗尽型 SiC JFET 加载到 GaN HEMT 的漏源极两端，同时 SiC JFET 栅极承受相应的负电压，SiC JFET 也进入关断状态，这时 GaN HEMT 漏源极两端承受的电压一直是 SiC JFET 阈值电压($V_{TH,J}$)的负值，其余的直流电压由 SiC JFET 承受。

GaN/SiC Cascode 器件的开关过程可以分为 4 个阶段，具体过程可以由图 2 所示的波形以及图 3 所示开关过程等效电容的充放电来说明。

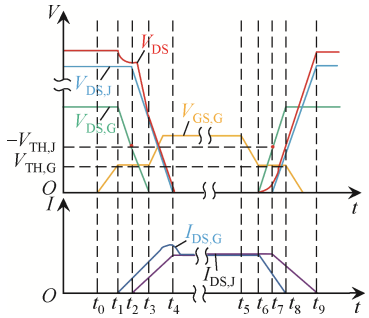


图 2　GaN/SiC Cascode 器件开关过程波形

Fig. 2 Waveforms of GaN/SiC Cascode device in switching process

1.2.1　开通阶段(t_0~t_4)

(1) t_0~t_2：t_0 时刻，GaN/SiC Cascode 器件导通开始，GaN HEMT 的栅极驱动电压 $V_{GS,G}$ 加载，开始给 GaN HEMT 栅极和源极之间电容 $C_{GS,G}$ 充电，在 t_1 时刻达到 GaN HEMT 的阈值电压 $V_{TH,G}$，GaN HEMT 的漏源极电压 $V_{DS,G}$ 开始下降，GaN HEMT 的栅极、漏极和源极之间的电容 $C_{GD,G}$ 和 $C_{DS,G}$ 开始通过器件沟道进行放电，流过 GaN HEMT 的电流 $I_{DS,G}$ 开始增大，电流路径如图 3(a)所示。

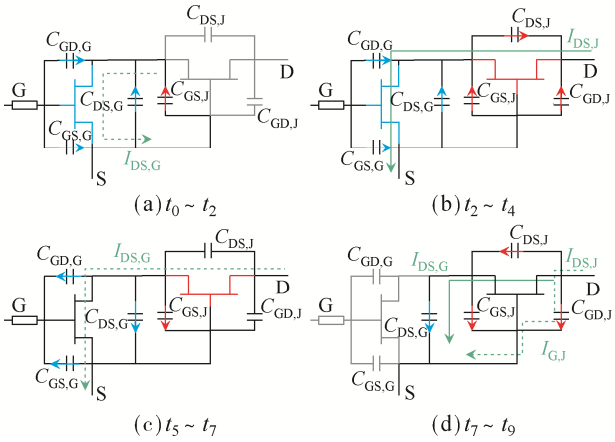


图 3　GaN/SiC Cascode 器件开关过程中等效电容的充放电路径

Fig. 3 Charging and discharging of equivalent capacitor of GaN/SiC Cascode device in switching process

(2) t_2~t_4：t_2 时刻，GaN FET 的漏源极电压 $V_{DS,G}$ 下降到 SiC JFET 阈值电压 $V_{TH,J}$ 的负值，SiC JFET 栅极和源极之间电容 $C_{GD,J}$、漏极和源极之间电容 $C_{DS,J}$ 开始放电，SiC JFET 漏源极电压 $V_{DS,J}$ 开始下降，流过 SiC JFET 的电流 $I_{DS,J}$ 逐渐增大，直到 t_4 时刻，GaN/SiC Cascode 器件完全开通，电流路径如图 3(b)所示。

1.2.2　关断阶段(t_5~t_9)

(1) t_5~t_7：t_5 时刻，GaN/SiC Cascode 器件关断开始，电容 $C_{GS,G}$ 开始放电，GaN HEMT 栅极电压 $V_{GS,G}$ 开始下降，t_6 时刻达到 GaN HEMT 阈值电压 $V_{TH,G}$ 时，$C_{DS,G}$ 和 $C_{GD,G}$ 开始充电，$V_{DS,G}$ 开始上升，GaN HEMT 逐渐关断，电流路径如图 3(c)所示。

(2) t_7~t_9：t_7 时刻，GaN HEMT 的漏源极电压 $V_{DS,G}$ 上升到 SiC JFET 阈值电压 $V_{TH,J}$ 的负值，电容 $C_{GD,J}$ 和 $C_{DS,J}$ 开始充电，$V_{DS,J}$ 开始上升；t_8 时刻，

GaN HEMT 完全关断，但此时 SiC JFET 还未完全关断，其电流 $I_{DS,J}$ 将会从栅极流过；直到 t_9 时刻，SiC JFET 关断，整个 GaN/SiC Cascode 器件完全关断，电流路径如图 3(d)所示。

1.3 器件静态特性

本文的 GaN/SiC Cascode 器件由 2 只分立器件构成，相比于集成式 Cascode 器件，分立式 Cascode 器件具有灵活性高、适应性强等优点，可以根据具体应用需要选择不同的器件搭配组成 Cascode 结构，便于研究不同 Cascode 器件的内部机理。但分立结构的 Cascode 器件的部分静态特性无法通过数据手册直接得到，将分立的 GaN HEMT 和 SiC JFET 按照图 1 所示的结构，在印刷电路板上布局好后，引出 Cascode 器件的 3 个电极分别插入静态参数测试仪的插槽，即可测试整个 Cascode 器件的静态参数。由于 TO-247 封装的电极引脚与测试仪之间的接触电阻会使测得的器件导通电阻偏大，故本文未加入器件导通电阻的对比曲线。测试平台如图 4 所示。

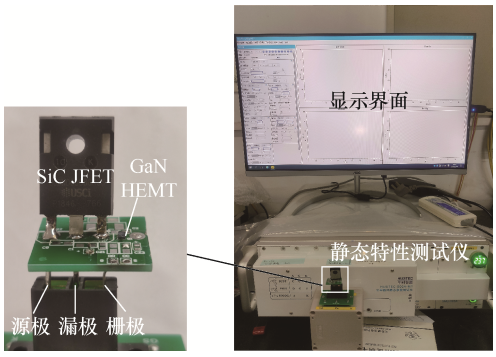


图 4 静态特性测试平台

Fig. 4 Test platform for static characteristics

GaN/SiC Cascode 器件中 GaN HEMT 为辅助开关，主要性能由 SiC JFET 决定，为了评估 SiC JFET 串联 GaN HEMT 后的性能，本文除了测试 GaN/SiC Cascode 器件，还同时测试了 Si/SiC Cascode 器件、构成 GaN/SiC Cascode 器件的 SiC JFET，所测试器件的型号、封装形式和参数见表 1，参数包括器件的额定电压 V_{DS}、额定电流 I_{DS}、阈值电压 V_{TH}，以及极间电容 C_{iss}、C_{oss} 和 C_{rss}。从表 1 中可以看出，

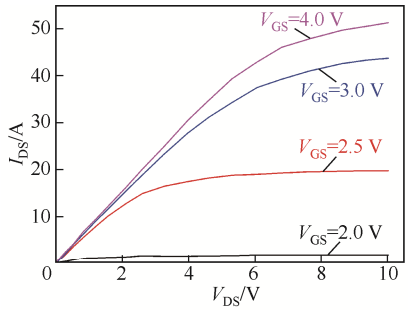
表 1 器件参数

Tab. 1 Parameters of devices

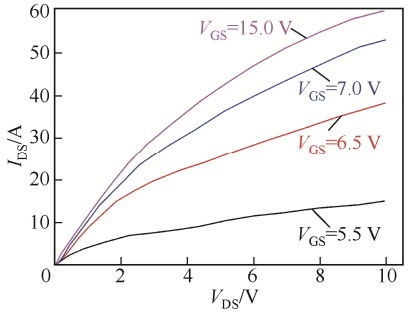
类型	GaN/SiC Cascode	Si/SiC Cascode	SiC JFET
型号	EPC2055/UJ3N065080K3S	UJ3C065080K3S	UJ3N065080K3S
封装	Die/TO-247	TO-247	TO-247
V_{DS}/V	40/650	650	650
I_{DS}/A	29/32	31	32
V_{TH}/V	1.5	5.2	−11.5
C_{iss}/pF	841	1 500	650
C_{oss}/pF	82	104	80
C_{rss}/pF	3.0	2.6	53.0

与 SiC JFET 相比，Cascode 器件具有更低的阈值电压和转移电容，此外，Cascode 结构中的 SiC JFET 无栅极附加电阻，大大减小了其密勒效应对开关速度的影响，这就使 GaN/SiC Cascode 器件的栅极驱动变得简单，开关速度更快。同时，与 Si/SiC Cascode 器件 5.2 V 的阈值电压相比，GaN/SiC Cascode 器件的栅极阈值电压仅为 1.5 V，并具有更小的 C_{iss} 和 C_{oss}，所需的驱动电压更低。

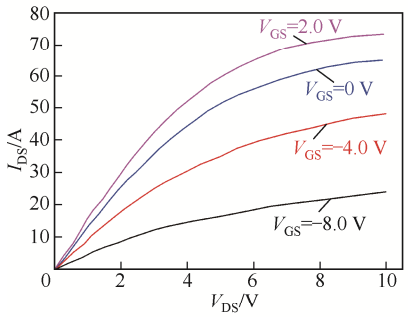
3 种器件在室温下的静态特性如图 5 所示，其中图 5(a)、(b)、(c)为 3 种器件的输出特性，图 5(d)、(e)、(f)为 3 种器件的转移特性。从图中可以看出，由 2 种不同封装形式构成的 GaN/SiC Cascode 器件与 TO-247 封装的 Si/SiC Cascode 器件、SiC JFET 具有相似的静态特性，其输出特性也可分为线性区和恒流区；同时，可以看出，在相同的漏源极电压下，2 种 Cascode 器件在导通状态下的饱和电流小于单管 SiC JFET。转移特性显示 GaN/SiC Cascode 器件的阈值电压为 1.5 V，相比于 SiC JFET 的−11.5 V 的阈值电压，低压器件的存在使 Cascode JFET 的阈值电压变为正值。



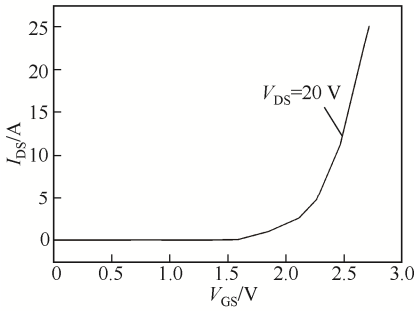
(a) GaN/SiC Cascode器件输出特性



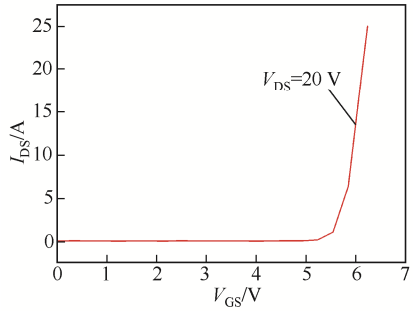
(b) Si/SiC Cascode器件输出特性



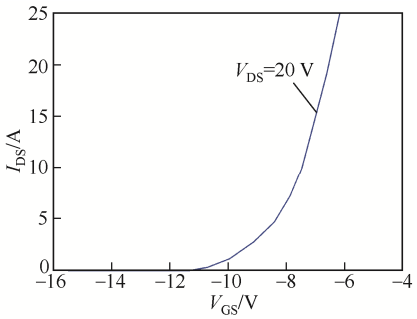
(c) SiC JFET输出特性



(d) GaN/SiC Cascode器件转移特性



(e) Si/SiC Cascode器件转移特性



(f) SiC JFET转移特性

图 5　静态特性

Fig. 5 Static characteristics

3 种器件的击穿特性如图 6 所示，由图可见，SiC JFET 串联低压 GaN 器件后正向击穿电压得到了提高，由原来的 720 V 提升至 780 V 左右，几乎是 2 个器件击穿电压之和。

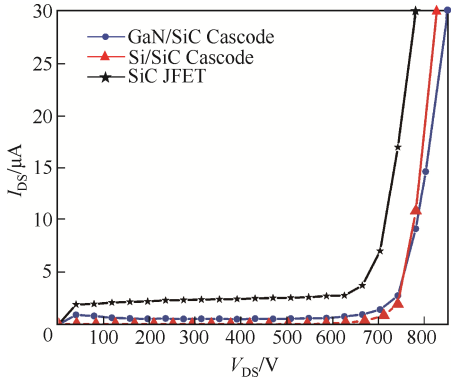


图 6　3 种器件的击穿特性

Fig. 6 Break-down characteristic of three devices

2　动态特性测试

利用双脉冲电路测试了 GaN/SiC Cascode 器件的动态特性，电路原理如图 7 所示，包括直流电源

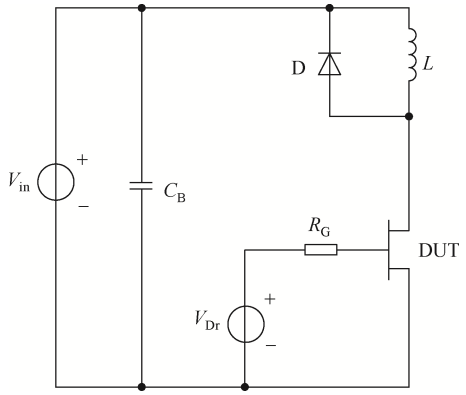
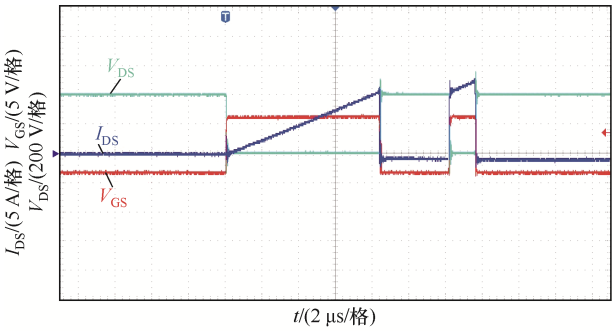


图 7　双脉冲测试电路原理

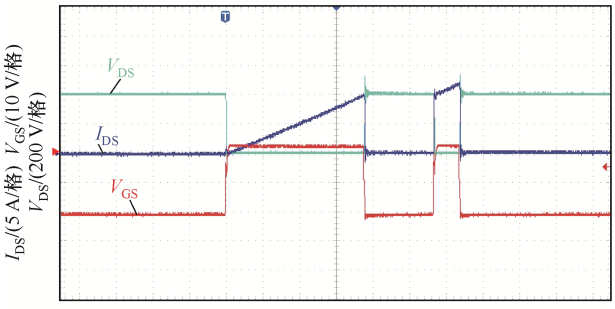
Fig. 7 Schematic of circuit in double-pulse test

V_{in}、储能电容 C_B、电感 L、二极管 D、驱动电源 V_{Dr}、栅极电阻 R_G 及待测器件 DUT(device under test)。本文除了测试 GaN/SiC Cascode 器件的动态特性,还测试了表 1 中的 Si/SiC Cascode 器件和 SiC JFET 的动态特性。

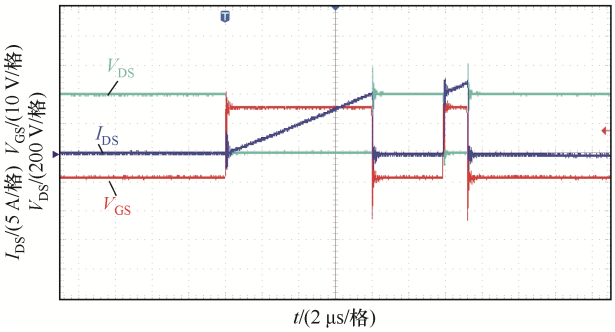
图 8 给出了 3 种器件的双脉冲波形，其中 V_{in}=400 V,漏极电流为 10 A,L_D=300 μH,R_G=10 Ω,D 为 SiC SBD。从图 8 可以看出，与 TO-247 封装的 Si/SiC Cascode 器件、SiC JFET 相比，由 2 只分立器件构成的 GaN/SiC Cascode 器件的开通和关断过程并未出现明显的过电压尖峰和振荡。



(a) GaN/SiC Cascode



(b) SiC JFET

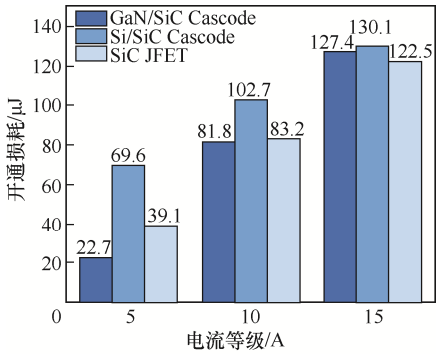


(c) Si/SiC Cascode

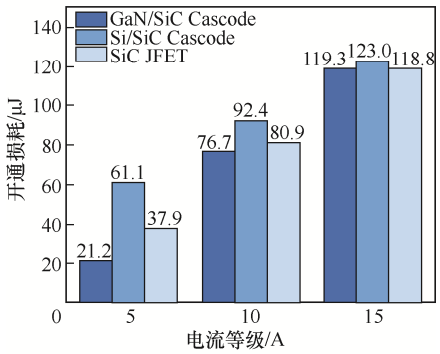
图 8 400 V/10 A 时的双脉冲测试波形

Fig. 8 Waveforms in double-pulse test under 400 V/10 A

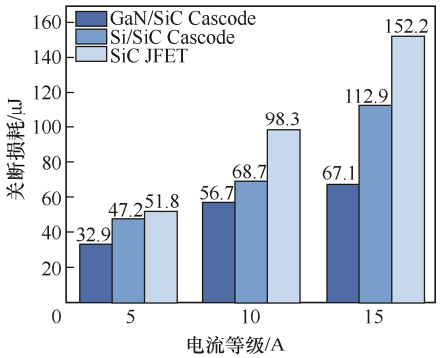
器件的开关损耗是衡量器件性能的重要参数，由双脉冲测试到电压和电流波形可以计算出器件开通和关断过程的损耗。图 9 给出了 3 种器件在直



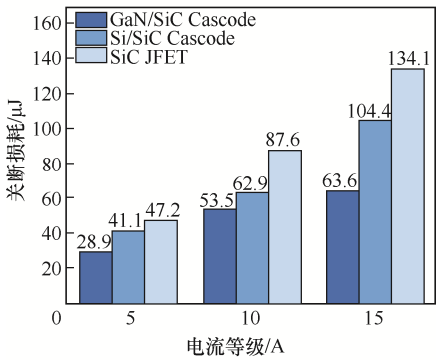
(a) 25 ℃开通损耗对比



(b) 100 ℃开通损耗对比



(c) 25 ℃关断损耗对比



(d) 100 ℃关断损耗对比

图 9 3 种器件的开通损耗和关断损耗对比

Fig. 9 Comparison of turn-on and turn-off losses among three devices

流电压为 400 V，漏极电流分别为 5、10 和 15 A，温度为 25 和 100 ℃条件下的开关损耗对比，其中图 9(a)和(b)分别为 25 ℃和 100 ℃时的开通损耗，图 9(c)和(d)分别为 25 ℃和 100 ℃时的关断损耗。从图 9 中可以看出，3 种器件的开通损耗和关断损耗受温度的影响均比较小，但是受器件通过电流的影响较大。相对于开通损耗而言，3 种器件中，GaN/SiC Cascode 器件的关断损耗受电流的影响最小，这种特性使得 GaN/SiC Cascode 器件适合于软开关电路，当器件实现零电压开通(zero voltage switching)时，器件的开通损耗为 0，总损耗仅取决于关断损耗，这时 GaN/SiC Cascode 器件较低的关断损耗使得电路的损耗降为最低。

3　GaN/SiC Cascode 器件在 LLC 电路中的应用

在 LLC 谐振变换器中验证了 GaN/SiC Cascode 器件的开关特性。LLC 谐振变换器的电路结构如图 10 所示，主要由开关网络、谐振网络、变压器和整流网络构成，其中谐振电容 C_r、谐振电感 L_r 和励磁电感 L_m 共同构成了谐振网络。通过谐振网络的谐振使变压器一次侧开关器件的两端电压在驱动信号到来之前降为零，实现零电压开通；使变压器二次侧开关器件的电流在驱动信号到来之前降为 0，实现零电流关断 ZCS(zero current switching)。相对于传统的硬开关模式，开关器件处于 ZVS 开通和 ZCS 关断的这种模式称为软开关，能有效降低变换器的损耗。

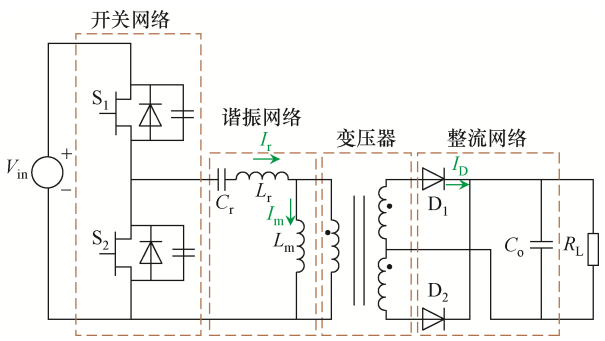


图 10　LLC 谐振变换器原理

Fig. 10 Schematic of LLC resonant converter

表 2 给出了图 10 所示的 LLC 谐振变换器的关键参数，其中 f_r、C_r、L_r、L_m 根据文献[16]的方法计算得到，T_{dead} 根据器件的开关频率和极间电容计算得到，二次侧整流管采用了型号为 C3D10060A 的 SiC Schottky Diode，额定电压为 600 V，常温下的正向额定电流为 30 A。LLC 谐振变换器实验平台如图 11 所示，由直流电源、示波器、直流电子负载、实验电路板、功率分析仪等构成。

表 2　LLC 谐振变换器参数与取值

Tab. 2 Parameters and values of LLC resonant converter

参数	数值
输入电压 V_{in}/V	380
输出电压 V_o/V	24
负载电阻 R_{load}/Ω	2.4
输出功率 P_o/W	240
谐振频率 f_r/kHz	100
谐振电感 L_r/μH	75.4
谐振电容 C_r/nF	33
励磁电感 L_m/μH	300
死区时间 T_{dead}/ns	300

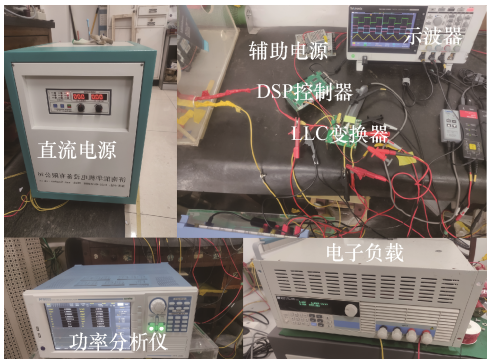
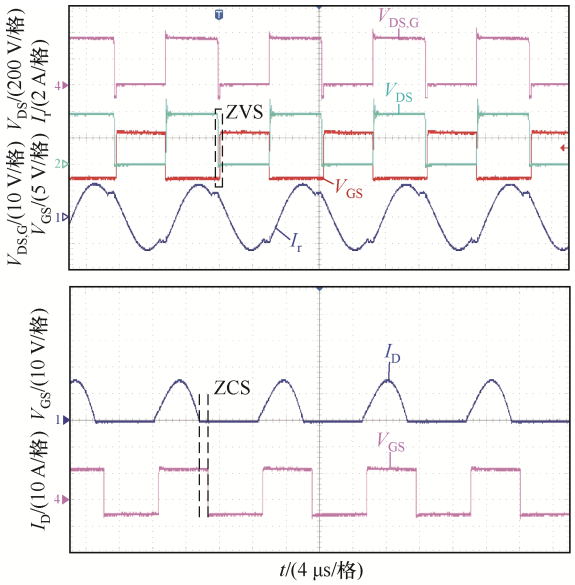


图 11　LLC 谐振变换器实验平台

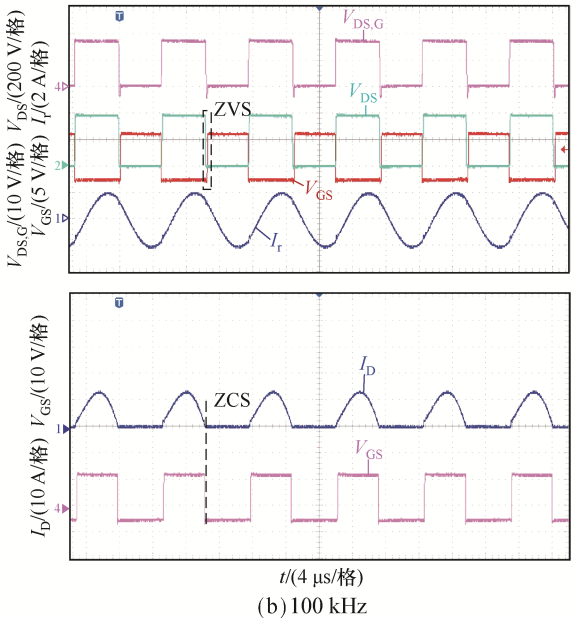
Fig. 11 Experimental platform of LLC resonant converter

图 12 为基于 GaN/SiC Cascode 器件的谐振变换器在开关频率分别为 80 kHz 和 100 kHz 的实验波形。从图 12 中可以看出，当器件的开关频率为 80 kHz 时，谐振电流 I_r 的波形出现了 1 段平台区域，在此区域内，谐振电流和励磁电流相等。随着器件开关频率上升为 100 kHz，平台区域逐渐消失，谐振电流的波形近似正弦波。在此频率范围内，一次侧开关网络的功率器件的漏源两端电压 V_{DS} 在栅极

电压 V_{GS} 到来之前降为 0，实现 ZVS 开通；二次侧整流二极管的电流 I_D 在一次侧器件栅极电压降为 0 之前，实现 ZCS 关断，此时电路处于临界状态，变换器效率达到最高。



(a) 80 kHz



(b) 100 kHz

图 12 不同开关频率下的 LLC 谐振变换器实验波形

Fig. 12 Experimental waveforms of LLC resonant converter at different switching frequencies

基于表 1 所示 3 种器件的谐振变换器在不同输出功率下的转换效率如图 13 所示。从图 13 中可以看出，变换器的转换效率随着输出功率的增大呈先增大后减小的趋势，这是由电路开关频率的变化导致的，当开关频率 f_s 刚好等于谐振频率 f_r 时，谐振电容 C_r、谐振电感 L_r 与变压器一次侧励磁电感 L_m 所构成的谐振腔阻抗达到最小，此时电路转换效率达到最高；同时可以看到，基于 GaN/SiC Cascode 器件的变换器的转换效率始终高于基于其他 2 种器件变换器的转换效率，最高达到了 96.7%。

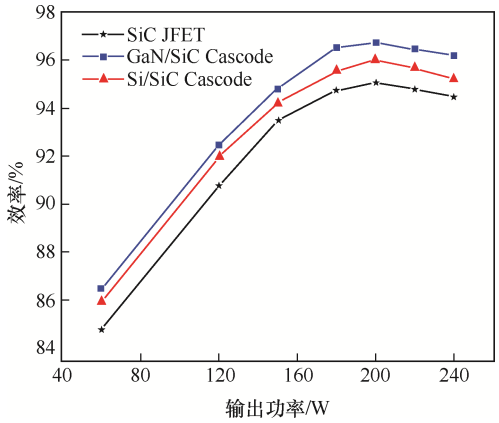


图 13 不同输出功率下的 LLC 谐振变换器转换效率对比

Fig. 13 Comparison of conversion efficiency among LLC resonant converters at different values of output power

4 结语

利用 40 V 的 GaN HEMT 和 650 V 的 SiC JFET 构建了全宽禁带的 Cascode 器件，该器件结合了 GaN 器件与 SiC 器件的优点，相比于 Si/SiC Cascode 器件和 SiC JFET，有着更简单的栅极驱动、更低的开关损耗。详细分析了 GaN/SiC Cascode 器件的开通与关断过程，测试了器件的静态特性和开关特性，结果表明，GaN/SiC Cascode 器件具有更小的极间电容和更低的开关损耗，基于 GaN/SiC Cascode 器件的 LLC 谐振变换器也具有更高的转换效率。

参考文献：

[1] 陈之勃, 陈永真. 碳化硅 MOSFET 与硅 MOSFET 的应用对比分析[J]. 电源学报, 2018, 16(1): 95-98.
Chen Zhibo, Chen Yongzhen. Comparative analysis of applications for SiC MOSFET and silicon MOSFET [J].

Journal of Power Supply, 2018, 16(1): 95-98. (in Chinese)

[2] 任鹏, 涂春鸣, 侯玉超, 等. 基于 Si 和 SiC 器件的混合型级联多电平变换器及其调控优化方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 5017-5028.
Ren Peng, Tu Chunming, Hou Yuchao, et al. Research on a hybrid cascaded multilevel converter based on Si and SiC device and its control optimization method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 5017-5028. (in Chinese)

[3] 刘昌赫, 王学远. 采用 SiC MOSFET 与 Si MOSFET 的双有源桥效率仿真分析对比[J]. 电源学报, 2020, 18(4): 109-115.
Liu Changhe, Wang Xueyuan. Simulation analysis and comparison of dual active bridge efficiency based on SiC and Si MOSFET [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(4): 109-115. (in Chinese)

[4] 严阳, 吴新科, 盛况. 基于碳化硅 MOSFET 的 99.2%高效率功率因数校正器[J]. 电源学报, 2016, 14(4): 73-81.
Yan Yang, Wu Xinke, Sheng Kuang. 99.2% efficiency ZVS single-phase PFC rectifier with SiC MOSFET [J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(4): 73-81. (in Chinese)

[5] 马荣耀, 唐开锋, 潘效飞, 等. 车用碳化硅功率模块的电热性能优化与评估[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 78-86.
Ma Rongyao, Tang Kaifeng, Pan Xiaofei, et al. Electro-thermal performance optimization and evaluation of automotive SiC power module [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 78-86. (in Chinese)

[6] 陈润田, 李楚杉, 姚文熙, 等. 基于等效励磁电感的 SiC 串联器件型中压双有源桥变换器的软开关技术[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3732-3745.
Chen Runtian, Li Chushan, Yao Wenxi, et al. Soft-switching technique for medium voltage dual active bridge converter with series-connected SiC devices based on equivalent magnetizing inductance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3732-3745. (in Chinese)

[7] Kong Moufu, Guo Jiaxin, Gao Jiacheng, et al. A high-performance 4H-SiC JFET with reverse recovery capability and low switching loss [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(10): 5022-5028.

[8] Aggeler D, Canales F, Biela J, et al. dv/d*t*-control methods for the SiC JFET/Si MOSFET cascode [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8): 4074-4082.

[9] Elrajoubi A M, Ang S S, George K. Design and analysis of a new GaN-based AC/DC converter for battery charging application [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 4044-4052.

[10] 肖龙, 陈冬冬. 基于建模数据和最优化算法的 GaN HEMT 精确电热行为建模方法[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 153-162.
Xiao Long, Chen Dongdong. Modeling method for accurate electrothermal behavior of GaN HEMT based on modeling data and optimization algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 153-162. (in Chinese)

[11] 佟强, 刘贺, 曲璐. 基于氮化镓的反激同步整流 DC/DC 变换器设计[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 81-89.
Tong Qiang, Liu He, Qu Lu. Design of synchronous rectifier flyback DC/DC converter based on GaN [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 81-89. (in Chinese)

[12] 樊靖轩, 施佳楠, 徐子梁, 等. 基于 GaN 的开关线性复合高速随动脉冲负载直流变换器[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1818-1829.
Fan Jingxuan, Shi Jianan, Xu Ziliang, et al. High speed switching-linear hybrid followed-up pulse load DC converter based on GaN device [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1818-1829. (in Chinese)

[13] Xu Jiale, Gu Lei, Ye Zhechi, et al. Cascode GaN/SiC: A wide-bandgap heterogenous power device for high-frequency applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6340-6349.

[14] Zhong Kailun, Wang Yuru, Lü Gang, et al. 650-V normally-off GaN/SiC cascode device for power switching applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 8997-9006.

[15] Wang Yuru, Lü Gang, Wei Jin, et al. Characterization of static and dynamic behavior of 1 200 V normally off

GaN/SiC cascode devices [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10284-10294.

[16] 杨玉岗, 孙彬彬, 闫孝姮. 考虑寄生电容的半桥 LLC 谐振变换器参数优化设计[J]. 电源学报, 2019, 17(2): 57-62.
Yang Yugang, Sun Binbin, Yan Xiaoheng. Optimal design of half-bridge LLC resonant converter considering parasitic capacitance [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(2): 57-62. (in Chinese)



周郁明

作者简介：

周郁明(1971—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：新型电力电子器件及其应用。E-mail：ymzhou@ahut.edu.cn。

周伽慧(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子可靠性。E-mail：zhoujh7550@ah.sgcc.com.cn。

刘航志(1992—)，男，中国电源学会会员，博士，讲师。研究方向：新型电力电子器件及其应用。E-mail：hangzhi_liu@ahut.edu.cn。

(责任编辑：耿越)



公益广告来源：央视网