

氢终端金刚石双向开关器件的制备与特性研究*

马源辰¹⁾²⁾ 岳心宇¹⁾ 任泽阳^{1)2†)} 许琦辉¹⁾ 张金凤^{1)2†)} 付裕¹⁾ 尹利君³⁾ 苏

凯¹⁾ 杨森⁴⁾ 郝跃¹⁾ 张进成¹⁾

1) (西安电子科技大学, 宽禁带半导体器件与集成技术全国重点实验室, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学芜湖研究院, 芜湖 241002)

3) (上海征世科技股份有限公司, 上海 201700)

4) (西安晟光硅研半导体科技有限公司, 西安 710000)

摘要

中文摘要部分. 双向开关器件在光伏、能源、电动汽车等领域应用广泛, 金刚石优异的物理特性有望满足开关器件对低导通电阻和高击穿电压的应用需求. 本研究率先采用(100)晶面的氢终端金刚石制备了耗尽型的共漏极反向串联单片集成结构双向开关 MOSFET 器件, 器件采用 100nm 厚度的 Al_2O_3 介质作为栅介质和钝化层. 器件开关比高达 10^9 , 阈值电压为 52.8V. 通过短接两个栅极, 器件为双向开关工作模式, 当偏置电压大于阈值电压时可实现双向电流流动, 在双向导通工作模式下分别实现了最大输出电流为 180.52mA/mm、170.90mA/mm, 导通电阻分别为 $0.20\text{k}\Omega\cdot\text{mm}$ 、 $0.23\text{k}\Omega\cdot\text{mm}$. 双向开关器件的栅漏击穿电压在两个栅电极分别与相邻源电极短路时分别为 -358V 和 366V, 击穿场强约为 0.22MV/cm , 本研究为氢终端金刚石功率器件提供了新的应用示范场景.

关键词: 金刚石, MOSFET, 双向开关

PACS: 81.05.ug

基金: 国家自然科学基金 (批准号: 62374122, 62127812, 62404172, 62421005)、合肥综合性国家科学中心、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: QTZX26106, XJSJ25014, XJSJ24054)、安徽省重点研究与开发计划项目 (批准号: 2023a05020006)、中国博士后科学基金 (批准号: 2024M762531, BX20240273) 以及小米青年学者基金资助的课题.

†通信作者. E-mail: zeyangren@xidian.edu.cn; jfzhang@xidian.edu.cn;

第一作者. E-mail: 1321114852@qq.com

1 引言

双向开关 (Bidirectional Switch) 是一种能够在两个方向上控制电流流动的电子器件, 广泛应用于交流电路、电源管理、电机驱动等领域, 能够实现电网系统中的高效能源管理和工业电机操作的精确性^[1-3]。传统的机械式双向开关存在寿命短、响应速度慢的问题。硅基双向可控开关虽然制备简单成本低, 但是无法主动关断, 且只能在低频情况下应用^[4]。通过传统分立器件串联方式实现的双向开关, 由于长的电流通道, 增大了总的阻抗和寄生参数, 降低了结构的可靠性。通过将两个 MOSFET 器件反向串联, 以共享源或漏的结构实现单片集成双向开关, 既可以降低导通电阻, 也可以保持较高的击穿电压。

金刚石是极具潜力的超宽禁带半导体材料, 具有超宽禁带宽度 (5.47 eV)、高载流子迁移率 (电子迁移率 $4500 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、空穴迁移率 $3800 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)、高热导率 (2200 W/mK)、高击穿场强 ($>10 \text{ MV cm}^{-1}$) 等优点^[5-8], 特别适用于高频、高功率以及各种极端环境应用的电子器件^[9-12]。法国国家科学研究院的研究者基于硼掺杂金刚石衬底制备了第一个单片双向金刚石功率场效应晶体管, 验证了金刚石开关器件在高温环境下应用的可靠性, 导通电阻 R_{on} 为 $159 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ (约 $0.88 \text{ k}\Omega \cdot \text{mm}$), 但器件栅极存在较大的漏电流^[13]。相比于硼掺杂, 氢终端金刚石具备更优异的电导特性, 且器件制备工艺简单。近年来采用 Al_2O_3 、 MoO_3 等介质钝化的方法也一定程度上解决了氢终端金刚石表面电导稳定性的问题^[14-15]。双向开关主要用作功率开关, 其击穿特性直接决定其应用范围、可靠性及设计裕度。金刚石优异的本征特性使其成为高压器件领域的研究热点。目前, 早稻田大学 Kawarada 团队基于黑色多晶金刚石制备了氢终端器件, 实现了 1.8 kV 的击穿电压, 部分器件的平均击穿场强高达 1.25 MV/cm 。西安电子科技大学付裕研制了硅与氢终端金刚石混合导电沟道的功率器件, 达到了 1376 V 的击穿电压和 1.2 MV/cm 的击

穿场强^[21-22]。因此，基于氢终端金刚石的双向开关器件有望提高输出电流、降低隔离漏电，同时实现低导通电阻与高击穿电压^[16-20]。

本研究基于(100)晶面的氢终端金刚石，使用 100nm ALD-氧化铝作为介质，首次实现了共漏极反向串联单片集成结构的耗尽型单片双向开关。对器件不同工作模式下的特性与击穿电压进行了系统测试分析，验证了氢终端金刚石电导在低导通电阻高击穿电压的单片双向开关中的应用潜力。其中器件开关比高达 10^9 ，阈值电压为 52.8V，体现了极高的界面质量与栅极控制能力。在双向导通工作模式下分别实现了最大输出电流为 180.52mA/mm、170.90mA/mm，导通电阻分别为 $0.20\text{k}\Omega \cdot \text{mm}$ 、 $0.23\text{k}\Omega \cdot \text{mm}$ 。双向开关器件的栅漏击穿电压在两个栅电极分别与相邻源电极短路时分别为-358V 和 366V，击穿场强约为 0.22MV/cm。

2 实验方法

本研究采用上海征世科技股份有限公司 CVD 生长的 $7\text{mm} \times 7\text{mm}$ (100) 晶面的单晶金刚石作为衬底，衬底厚度为 0.5mm。为了实现氢终端表面电导，将清洗干净的单晶金刚石放入 MPCVD 腔体中，采用氢等离子体处理 30min。处理过程中的氢气流量、压强、微波功率和温度分别为 600sccm，40mbar，1kW，650℃。随后采用电子束蒸发设备在金刚石样品表面沉积 100nm Au 金属层作为欧姆接触电极和氢终端表面的保护层。接着，利用光刻与 KI/I_2 溶液刻蚀定义器件有源区。采用 300℃的原子层沉积 (ALD) 工艺生长的 100nm 高质量氧化铝薄膜作为器件的栅介质和钝化层。采用 Al 作为栅极金属，通过光刻与剥离工艺完成器件制备。通过共聚焦显微镜观察器件结构，如图 1(a) 所示， $L_{G1}=1.842\mu\text{m}$ ， $L_{G2}=1.733\mu\text{m}$ ， $L_{G1S1}=4.98\mu\text{m}$ ， $L_{G2S2}=3.25\mu\text{m}$ ， $L_{G1G2}=4.99\mu\text{m}$ ， $L_{S1S2}=16.79\mu\text{m}$ ， $W_{G1}=W_{G2}=100\mu\text{m}$ 。

双向开关器件可通过调整电极连接方式与偏压大小控制器件工作模式。通过短接两个栅极，器件为双向开关工作模式，当偏置电压大于阈值电压时可实现

双向电流流动，而当偏置电压低于阈值电压时，器件处于关断模式。将其中一个栅极与源极短接，通过控制偏压，可实现电流仅在一个方向流动，器件为单向工作模式。图 1（b）为该器件工作模式示意图。双向开关器件电流双向导通的特性适用于交流电路，能大幅简化电路的结构并降低成本。同时其单向导通工作模式也能在特定工作需求下防止逆流保护后方器件。

本研究使用 KEYSIGHT B1500A 半导体参数分析仪对器件不同工作模式下的电学特性进行表征，所有测试均在室温下进行。实验通过验证器件的双向导通模式与两个栅单向工作模式证明该器件兼容交流、直流电路应用场景，且电流、导通电阻参数变化较小，具有较高的稳定性。

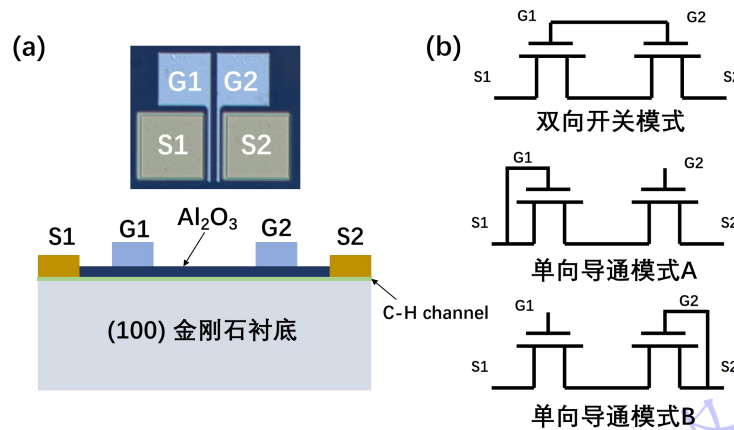


图 1 （a）器件结构示意图（b）器件工作模式示意图

Fig.1. (a)Schematic of Device Structure; (b)Schematic diagram of device operation mode

3 结果与讨论

首先对器件双向导通工作模式下的特性进行了测试，将器件两个栅极短接，当栅压大于阈值电压时，器件处于双向开关工作模式。双向导通工作模式下的转移特性曲线（ $V_{S1-S2} = -20V$ ）和双向输出特性曲线如图 2 和图 3 所示。通过对图 2 双向导通模式的转移特性曲线拟合得到器件阈值电压为 52.8V，该器件为耗尽型

器件。器件的开关比高达 10^9 ，器件具有优异的栅调控特性。关态下器件的低漏电流一方面得益于优秀的隔离工艺，另一方面说明本研究采用的单晶金刚石本征载流子浓度极低。低漏电能降低双向开关器件的静态损耗，提高器件的可靠性。

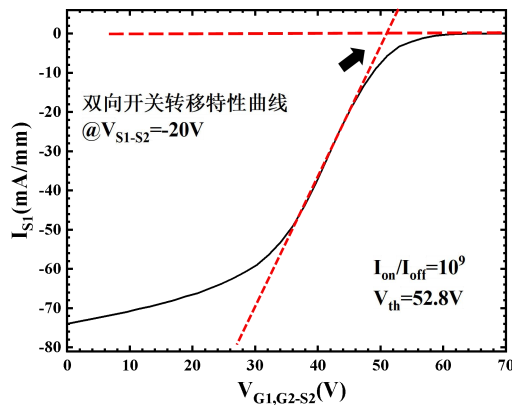


图 2 器件双向开关模式转移特性曲线

Fig.2. bidirectional switch mode transfer characteristic curve of the device

器件双向开关模式的输出特性曲线如图 3 所示，栅压测试范围为 $60\text{V} \sim -20\text{V}$ ，步长为 10V 。漏压测试范围为 -40V 到 40V ，第一、第三象限器件最大电流密度分别为 180.52mA/mm 、 170.90mA/mm ，对应的器件导通电阻分别为 $0.20\text{k}\Omega \cdot \text{mm}$ 、 $0.23\text{k}\Omega \cdot \text{mm}$ 。分析认为，在不同方向器件最大漏电流密度与导通电阻存在一定差异，这可能是由于器件制备过程中的光刻工艺微小对准偏差导致器件尺寸差异，如图 4 为器件制备的实际尺寸数据图，两个栅长与栅源间距均存在误差，由此导致了导通电阻与最大电流密度的差异。

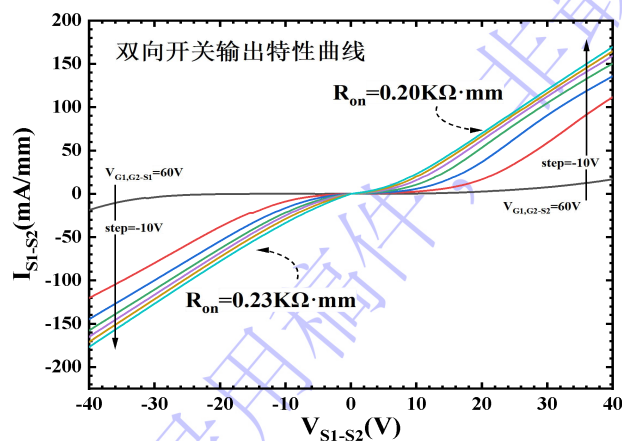


图 3 器件双向开关模式输出特性曲线

Fig.3. Output characteristic curve of the device's bidirectional switch mode

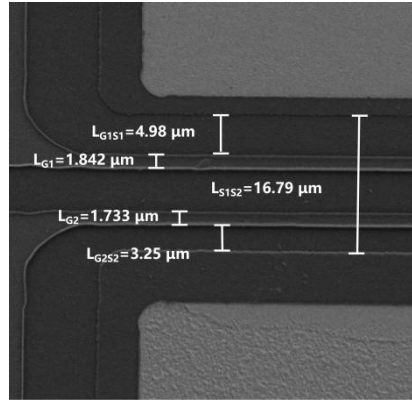


图 4 器件尺寸数据图

Fig.4.Device dimension data diagram

当其中一个栅极短路到临近的欧姆触电极时，通过电压调控可以实现仅允许电流在一个方向上流动，阻止电流在相反方向上流动。在此工作模式时，器件在两个单向导通方向实现了 175.64mA/mm 和 -205.036mA/mm 最大电流密度，导通电阻分别为 $0.28\text{k}\Omega \cdot \text{mm}$ 、 $0.27\text{k}\Omega \cdot \text{mm}$ （图 5），相比已报道的硼掺杂双向开关器件[13]，氢终端金刚石低方阻电导和容易制备良好欧姆接触的特点，有效降低了器件的导通电阻。

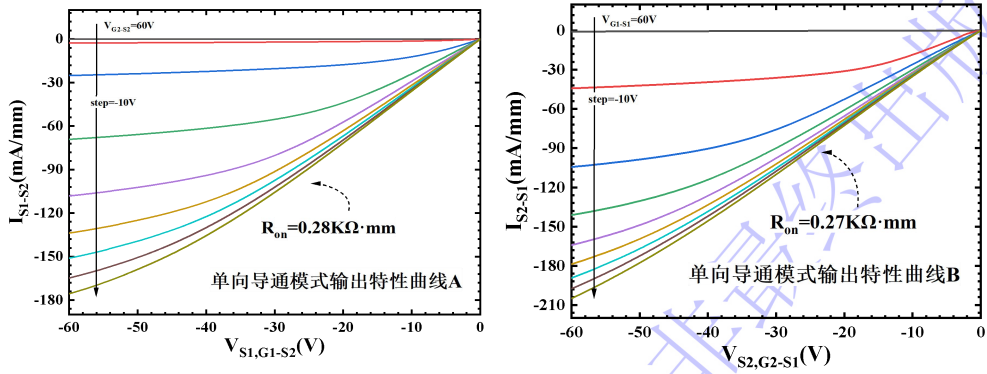


图 5 器件单向导通模式输出特性曲线

Fig.5. output characteristic curves of the device in the unidirectional conduction mode

在实际功率开关过程中，器件的击穿特性对应工作的可靠性至关重要。因此，我们进一步测试了双向开关器件的栅漏击穿特性，测试结果如图 6 所示。测试结果显示，当 G_1 和 G_2 单独偏置于关态时的击穿电压值分别为 -358V 和 366V。器件栅

漏间距为 $16\ \mu\text{m}$ ，对应的击穿场强约为 $0.22\text{MV}/\text{cm}$ ，该结果较低，这是因为 Au 和氢终端存在粘附性较差的问题[23]，所以在击穿特性的测试中，当所施加电压达到一定程度时，会出现欧姆电极金属崩飞的情况，影响器件击穿特性。基于该点，后续研究中，将采用 Ti/Au 电极提高粘附性。且本研究为验证性工作，并未预先设计高耐压结构。在未来的研究中，通过改进器件结构，优化氧化铝介质质量，提高栅漏间距，进一步提升器件击穿电压，有望实现超过 $3\text{MV}/\text{cm}$ 的击穿场强[22]，满足功率电子器件应用的需求。

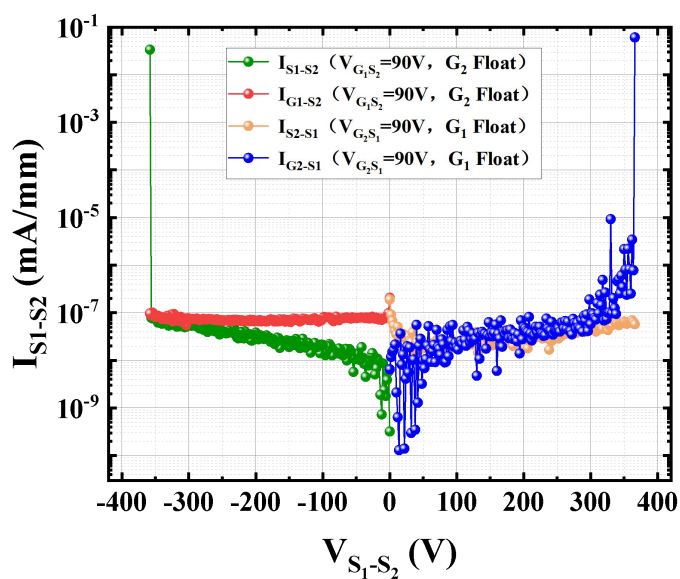


图 6 器件栅极击穿电压特性曲线

Fig.6. Characteristics curve of device gate breakdown voltage

4 结 论

本研究基于 (100) 晶面的氢终端金刚石制备了双栅深耗尽型双向开关器件。器件采用 300°C ALD 生长的 100nm 厚度 Al_2O_3 作为栅介质和钝化层。通过控制两个栅电极偏置情况，测试了器件单向导通与双向开关特性。器件双向开关工作模式下，实现了高达 10^9 的开关比，阈值电压为 52.8V 。器件在第一、第三象限最大电流密度分别为 $180.52\text{mA}/\text{mm}$ 、 $170.90\text{mA}/\text{mm}$ ，导通电阻分别为 $0.20\text{k}\Omega \cdot \text{mm}$ 、

0.23k $\Omega \cdot \text{mm}$ 。器件的双向栅漏击穿电压分别为-358V 和 366V。相比于硼掺杂器件，氢终端金刚石器件制备工艺简单，更易实现低的导通电阻和高的击穿电压，在功率开关器件中有着重要的应用潜力，后续我们也将持续优化器件特性，验证氢终端金刚石器件在功率开关中的应用潜力。

参考文献

- [1] Chettri D, Mainali G, Salcedo J. H, Kumar M, Khandelwal V, Yuvaraja S, Li X 2024 *Applied Physics Letters* **125** 202104
- [2] Sharma P, Lodha S 2024 *Applied Physics Letters* **125** 253502
- [3] Morita T, Yanagihara M, Ishida H, Hikita M, Kaibara K, Matsuo H, Uemoto Y, Ueda T, Tanaka T, Ueda D 2007 *IEEE International Electron Devices Meeting* Washington, D.C December 10-12, 2007 p865
- [4] B W Williams 1978 *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* **125** 5
- [5] D Araujo, M Suzuki, F Lloret, G Alba, P Villar 2021 *Processing and Devices, Materials* **14** 22
- [6] Jialin Y, Kewei L, Xing C, Dezhen S 2022 *Progress in Quantum Electronics* **83** 100397
- [7] Chaoqun D, Jyh-Pin C, Bing D, Chang-Ti C, Yang Y, Rong F, Weitong L, Fanling M, Alice H, Jiaqi Z, Jiecai H, Andrew M M, Ju L, Yang L 2021 *Science* **371** 625476
- [8] Jan I, Johan H, Erik J, Tobias W, Daniel J T, Andrew J W, Steven E C, Geoffrey A S 2002 *Science* **297** 55871670
- [9] Yuya K, Takuya K, Hidetoshi T, Tetsuya Y, Dechen X, Masanobu S 2017 *IEEE Electron Device Letters* **38** 3363

- [10] Yu X, Zhou J, Qi C, Cao Z, Kong Y, Chen T 2018 *IEEE Electron Device Letters* **39** 1373
- [11] K Ueda, M Kasu, Y Yamauchi, T Makimoto, M Schwitters, D J Twitchen 2006 *IEEE Electron Device Letters* **27** 7570
- [12] Cui Y, Chuangjie Z, Jianchao G, Zezhao H, Mengyu M, Hao Y, Xubo S, Aimin B, Zhihong F 2022 *Functional Diamond* **2** 164
- [13] C'edric M, Julien P, Aur'elien Mar'e, Nicolas R 2020 *Diamond and Related Materials* **111** 108185
- [14] Ren Z Y, Ma Y C, Yang S Q, Yu X X, Zhang J F, Su K, Zhang J C, Wang H X, Hao Y 2023 *Results in Physics* **49** 106517
- [15] Ren Z Y, Zhang J F, Zhang J C, Zhang C F, Xu S R, Li Y, Hao Y 2017 *IEEE Electron Device Letters* **38** 6786
- [16] Hiroshi K 1996 *Surface Science Reports* **26** 7205
- [17] Liu J W, Liao M Y, M Imura, E Watanabe, H Oosato, Y Koide 2014 *Applied Physics Letters* **105** 082110
- [18] Liu J W, H Ohsato, Liao M Y, M Imura, E Watanabe, Y Koide 2017 *IEEE Electron Device Letters* **38** 7922
- [19] Su K, Ren Z Y, Zhang J F, Liu L, Hao Y 2020 *Applied Physics Letters* **116** 092104
- [20] Su K, Zhang J C, Wang H X, He Q, Ren Z Y, Zhang Y C, Zhang J F, Liu L Y, Ouyang X P, Bao W M, Hao Y 2022 *IEEE Electron Device Letters* **43** 3454
- [21] M Syamsul, Y Kitabayashi, D Matsumura, T Saito, Y Shintani, H Kwarada 2016 *Applied Physics Letters* **109** 203504

- [22] Fu Y, Ren Z Y, Su K, Zhang J F, Liu R W, Li Y J, Zhu L L, Meng J T, Qian P, Wang D, Hao Y, Kawarada H, Zhang J C 2025 *IEEE Electron Device Letters* **46** 3330
- [23] Hui J L, Lisa Y S P, Michael D W, John S F, Richard B J 2000 *Diamond and Related Materials* **9** 975

录用稿件，非最终出版稿

Study on the Fabrication and Characteristics of H-Terminated Diamond Bidirectional Switch Devices*

Yuanchen Ma¹⁾²⁾ Xinyu Yue¹⁾ Zeyang Ren^{1)2†)} Qihui Xu¹⁾ Jinfeng Zhang^{1)2†)} Yu Fu¹⁾ Lijun Yin³⁾ Kai

Su¹⁾ Sen Yang⁴⁾ Yue Hao¹⁾ Jincheng Zhang¹⁾

1) (State Key Laboratory of Wide Bandgap Semiconductor Devices and Integrated Technology,

Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (Xidian-Wuhu Research Institute, Wuhu 241002, China)

3) (Shanghai Zhengshi Technology Co., Ltd, Shanghai 201700, China)

4) (Xi'an LaSic Semiconductor Technology Co., Ltd, Xi'an 710000, China)

Abstract

Bidirectional switching devices are widely employed in photovoltaic, energy, and electric vehicle applications. The superior physical properties of diamond are expected to fulfill the requirements of switching devices for low on-resistance and high breakdown voltage. In this study, for the first time, a depletion-mode bidirectional switching MOSFET device with a common-drain anti-series monolithically integrated structure was fabricated using hydrogen-terminated diamond with a (100) crystal orientation. The device utilizes a 100nm Al₂O₃ layer as both the gate dielectric and the passivation layer. The device exhibits an on/off ratio of 10⁹, a threshold voltage of 52.8 V, excellent gate control capability, and ultra-low gate leakage current. By short-circuiting the two gate electrodes, the device operates in a bidirectional switching mode, enabling bidirectional current flow when the applied bias voltage exceeds the threshold voltage. In the bidirectional conduction mode, the maximum

output currents are 180.52 mA/mm and 170.90 mA/mm, and the corresponding on-resistances are 0.20 k Ω ·mm and 0.23 k Ω ·mm, respectively, satisfying the demand for low on-resistance in switching devices. When one of the gate electrodes is shorted to the adjacent ohmic contact electrode, voltage regulation allows current flow in only one direction while blocking current in the opposite direction. The gate-drain breakdown voltages of the bidirectional switch device are measured as -358 V and 366 V when the two gate electrodes are individually shorted to their respective neighboring source electrodes, with a breakdown electric field of approximately 0.22 MV/cm. With further optimization of the device structure and improvement of the gate dielectric quality, this device shows considerable potential for high-voltage applications. This work provides a new application demonstration scenario for hydrogen-terminated diamond power devices.

Keywords: Diamond, MOSFET, Bidirectional switch

* Project supported by the National Natural Science Foundation (Grant No.62374122, 62127812, 62404172, 62421005), in part by the Hefei Comprehensive National Science Center, in part by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No.QTZX26106, XJSJ25014, XJSJ24054), in part by the Key Research and Development Program of Anhui Province under Grant No.2023a05020006, in part by the China Postdoctoral Science Foundation(Grant No.2024M762531, BX20240273) and Xiaomi Young Scholar Funding.

† Corresponding author.E-mail:zeyangren@xidian.edu.cn; jfzhang@xidian.edu.cn
The first author.E-mail:1321114852@qq.com