

金刚石SBD及RF-DC电路应用研究*

马源辰^{1,2} 任泽阳^{1,2**} 李逸江^{1,2} 张金凤¹ 许琦辉¹ 苏凯¹ 张进成¹ 郝跃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, 安徽, 芜湖, 241002)

2024-11-06 收稿, 2024-11-21 收改稿

摘要: 采用微波等离子体化学气相沉积设备对单晶金刚石衬底进行氢等离子体处理, 形成氢终端金刚石表面空穴电导, 制备氢终端肖特基二极管。二极管采用金作为阴极金属, 铝作为肖特基金属。接着通过金线键合技术制备了RF-DC电路。二极管表现出良好的整流特性, 在正向电压为 -5 V 时, 电流大小为 1.13 mA 。RF-DC电路采用了双金刚石肖特基二极管, 确保信号输入的全周期都能保持工作。在 10 MHz 频段下, 成功将射频电压信号由 7 V 的交流电转变成平均电压为 1.97 V 的直流电, 转换效率为 13.3% , 与仿真结果一致。实验结果表明了金刚石肖特基二极管应用于RF-DC电路的可行性。

关键词: 氢终端金刚石; 肖特基二极管(SBD); RF-DC电路; 整流特性

中图分类号: TN304.18; TN311.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3819(2024)06-0547-05

Research on Application of Diamond SBD and RF-DC Circuits

MA Yuanchen^{1,2} REN Zeyang^{1,2} LI Yijiang^{1,2} ZHANG Jinfeng¹ XU Qihui¹ SU Kai¹ZHANG Jincheng¹ HAO Yue¹⁽¹⁾ State Key Discipline Laboratory of Wide Band Gap Semiconductor Technology, Xidian University,Xi'an, 710071, CHN) ⁽²⁾ Xidian-Wuhu Research Institute, Wuhu, Anhui, 241002, CHN)

Abstract: The single crystal diamond substrate was treated with hydrogen plasma by microwave plasma chemical vapor deposition (MPCVD) equipment, and the hole conductance on the surface of hydrogen-terminated diamond was formed to prepare hydrogen-terminated Schottky diodes. The diode used gold as the cathode metal and aluminum as the Schott group. Then the RF-DC circuit was prepared by gold wire bonding technique. The diode shows good rectification characteristics, with a current size of 1.13 mA at a forward voltage of -5 V . The RF-DC circuit uses a double diamond Schottky diode to ensure that the signal input can be maintained throughout the cycle. In the 10 MHz frequency band, the radio frequency voltage signal is successfully converted from 7 V AC to 1.97 V DC , and the conversion efficiency is 13.3% , which is consistent with the simulated results. The experimental results show that diamond Schottky diode is feasible for RF-DC circuit.

Key words: H-terminated diamond; Schottky barrier diodes (SBD); RF-DC circuits; rectification characteristic

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3608601); 国家自然科学基金面上项目(62374122); 国家自然科学基金重大仪器项目(62127812)

** 联系作者: E-mail: zeyangren@xidian.edu.cn

引言

金刚石凭借其卓越的高载流子迁移率、高电场击穿强度和高热导率等特性^[1-3],在高温、高压、高频、高功率电子器件应用领域极具优势。然而,金刚石的半导体掺杂过程遇到了显著挑战,常用的掺杂剂普遍存在较高的激活能,在室温条件下的激活率低,尤其是n型半导体掺杂更是世界性物理难题,这导致金刚石电子器件一直发展缓慢^[4-5]。研究发现,将金刚石在氢等离子体中处理形成氢终端金刚石,并暴露在空气中以后,能在表面形成方阻较低的二维空穴气(Two-dimensional hole gas)电导。在体掺杂尚无法实现突破的情况下,氢终端金刚石成为金刚石电子器件研究的主流。当前,采用氢终端金刚石已经实现了高性能金属-半导体场效应晶体管(Metal-semiconductor field-effect transistor, MESFET)^[6-7]、金属-绝缘体-半导体场效应晶体管(Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)^[8-9],以及金刚石肖特基二极管(Schottky barrier diode, SBD)^[10-14]等电子器件。其中,肖特基二极管具有电子器件中最简单的器件结构,氢终端金刚石具有负的电子亲和能,很容易与金电极形成欧姆接触,与铝电极形成肖特基接触,从而制备出肖特基接触的二极管。并且二极管能够应用在整流电路、稳压电路、限幅电路、电平选择电路等多种电路中。

金刚石半导体发展的近三十多年来,器件性能不断突破,但金刚石基电子器件应用于研究相对较少。当前无线能量传输(Wireless power transfer, WPT)技术越来越受到人们的关注,特别是在大功率和远距离能量传输系统中的应用^[15-18]。对大功率WPT系统需要在整流天线电路中应用工作在大功率段的大功率肖特基势垒二极管,以便在功率接收设备中将射频信号转换为直流信号。由于GaN半导体具有大于3.3 MV/cm的高击穿场^[17-18],因此通常被用作整流系统的高功率SBD。而金刚石SBD同样具有击穿场高、工作频率高等优异性能,也成为WPT系统整流电路中大功率、高效率RF-DC转换电路的优势候选材料。而且金刚石的高导热特性还能有效避免氮化镓基器件高功率密度工作下的热效应导致器件性能退化的问题^[19-20]。2017年Oishi等人^[21]首次将金刚石SBD应用于RF-DC整流电路中,利用两个金刚石SBD设计的双二极管整流电路,将10 MHz和9 V振幅的射频(Radio frequency, RF)正弦输入电压转换为高达4.2 V的直流输出电压。

本研究采用化学气相沉积(Chemical vapor deposition, CVD)生长的本征单晶金刚石作为衬底,对金刚石进行氢等离子体处理形成表面氢终端电导,制备成氢终端二极管。然后在PCB板上完成氢终端器件与RF-DC电路的金线互联,形成整流电路,分析电路性能,通过LT-Spice软件仿真,并与实验结果进行对比。

1 实验流程

实验使用的单晶金刚石是由西安电子科技大学采用自主研发的微波等离子体化学气相沉积(Microwave plasma chemical vapor deposition, MPCVD)设备外延生长的尺寸为6.0 mm×6.0 mm×0.4 mm的(100)晶向的单晶金刚石。将清洗后的单晶金刚石放于MPCVD腔体中,采用氢等离子体对金刚石表面进行氢化处理,得到氢终端表面金刚石。处理过程中氢气流量、甲烷流量、微波功率、压强、样品表面温度和处理时间分别为600 ml/min、1 ml/min、2 kW、9 kPa、700℃和40 min。氢终端处理前后金刚石表面原子力显微镜(Atomic force microscope, AFM)测试结果(5 μm×5 μm)如图1所示。氢等离子体处理后表面均方根粗糙度由1.362 nm升高至3.971 nm。霍尔效应测试显示氢终端金刚石表面方阻为5 kΩ/sq、空穴浓度为 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、迁移率为 $80 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。

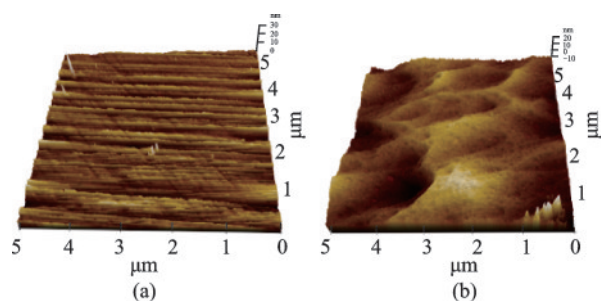


图1 氢等离子体(a)处理前和(b)处理后金刚石表面AFM测试结果

Fig.1 Hydrogen plasma AFM test results of diamond surface (a) before treatment and (b) after treatment

采用氢终端金刚石制备肖特基二极管的工艺流程图如图2所示。器件制备工艺主要包括有源区光刻,氧等离子体处理将氢终端转化为氧终端实现器件隔离,阳极窗口光刻和淀积阳极金属,制备pad电极。器件阴极和阳极金属的制备均采用电子束蒸发设备沉积,阴极金属Au和阳极金属Al的厚度均为100 nm。为了满足后续键合工艺的要求,进一步制备了pad电极,pad电极使用厚度为20/100 nm

的Ti/Au。制备完成后的器件实物图如图3(a)所示,器件阴极采用金属Au形成欧姆接触,阳极采用金属Al形成肖特基接触,阴阳电极间距为50 μm ,两电极的长宽尺寸一致,均为50 $\mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$,用于键合的pad电极覆盖两电极上一小部分,大面积沉积在电极外,尺寸为140 $\mu\text{m} \times 185 \mu\text{m}$ 。

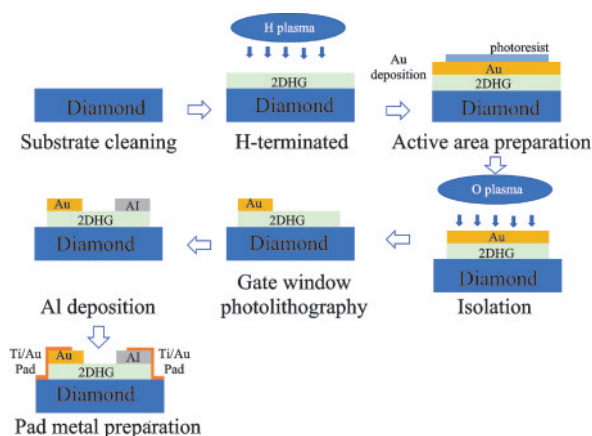


图2 金刚石肖特基二极管器件制备工艺流程图

Fig.2 Diamond Schottky diode device preparation process flow chart

使用LT-Spice软件搭建RF-DC电路[如图3(b)所示],并进行仿真研究。该电路包含两个电容 C_1 、 C_2 ,两个金刚石二极管D2、D5和三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 。通过选择适当容值的电容器,可以减少输出纹波,得到平滑的直流输出。接着通过实际设计和加工印制电路板,通过金线键合工艺来进行氢终端金刚石肖特基二极管和无源器件之间的电路连接,组成本研究所需的RF-DC电路。电路中电阻 R_1 为50 Ω 、 R_2 为1 k Ω 、 R_3 为5.1 k Ω ,电容 C_1 为200 pF、 C_2 为50 pF。版图左右两边为输入和输出端口,均采用BNC接口与外带测试电路所连。键合完成的电路实物图如图3(c)所示,插图为金线键合的氢终端金刚石肖特基二极管显微镜照片。在电路制备完成后,室温下对氢终端金刚石肖特基二极管和RF-DC电路特性进行测试分析研究。

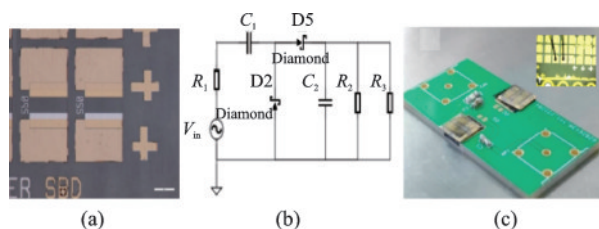


图3 (a) 氢终端金刚石肖特基二极管显微镜照片; (b) RF-DC电路原理图; (c) 电路实物图

Fig.3 (a) Microscope photo of a hydrogen terminal diamond Schottky diode; (b) Schematic diagram of the RF-DC circuit; (c) Schematic diagram of the circuit

2 实验结果与分析

在对电路特性进行分析之前,我们先对器件特性进行了测试。为了表征氢终端金刚石表面与Au电极的特征接触电阻率,使用环形传输线模型(C-TLM)来计算。测试结果如图4(a)所示,CTLM圆环间距为5~25 μm ,相邻圆环间距为5 μm ,圆环中心到外圈圆环边缘的距离为 R ,圆环中心到内圈圆环边缘的距离为 r 。可以看出,在不同的间距下, I - V 关系为典型的欧姆接触特性,且随着圆环间距的减小,电流逐渐增大。如图4(b)所示,对测试得到的5个点进行线性拟合,并通过计算最终得到样品表面的方块电阻为4.98 k Ω/sq 、传输长度为2.436 $\times 10^{-4}$ cm、比接触电阻率为 $1.074 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

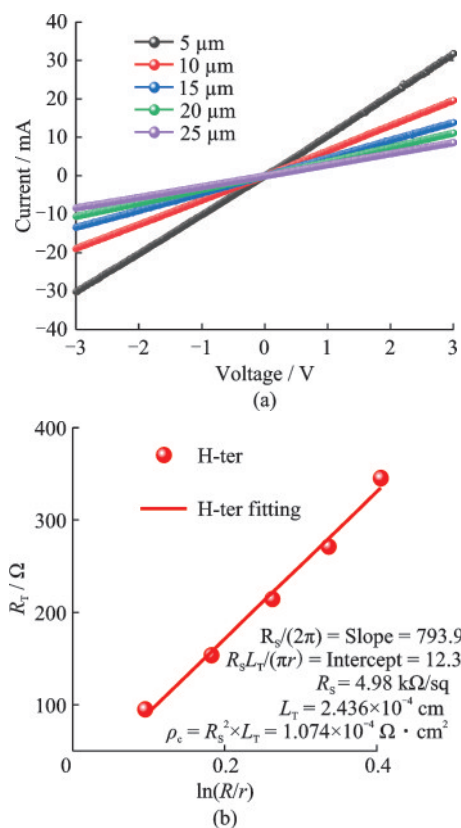


图4 (a) CTLM测量 I - V 特性曲线; (b) R_T - $\ln(R/r)$ 的分析图
Fig.4 (a) CTLM measured I - V characteristic curves; (b) R_T - $\ln(R/r)$ analysis diagram

氢终端金刚石肖特基二极管器件的 I - V 特性曲线和其极坐标图如图5所示。当二极管的正向电压为-5 V时,电流大小为1.13 mA,开启电压约为-1.56 V,开关比 $I_{\text{on}}/I_{\text{off}} > 10^3$,计算得到该器件的理想因子 n 为2.43。根据实测 I - V 特性曲线在软件LT-Spice的二极管库中添加金刚石二极管模型,设置参数反向饱和电流 $I_s = 2.09 \times 10^{-13}$ A,导通电阻 R_s

$=4\ 450\ \Omega$, 理想因子 $n=2.43$ 。如图 5(c) 所示, 该模

型仿真特性与二极管器件的实测特性基本一致。

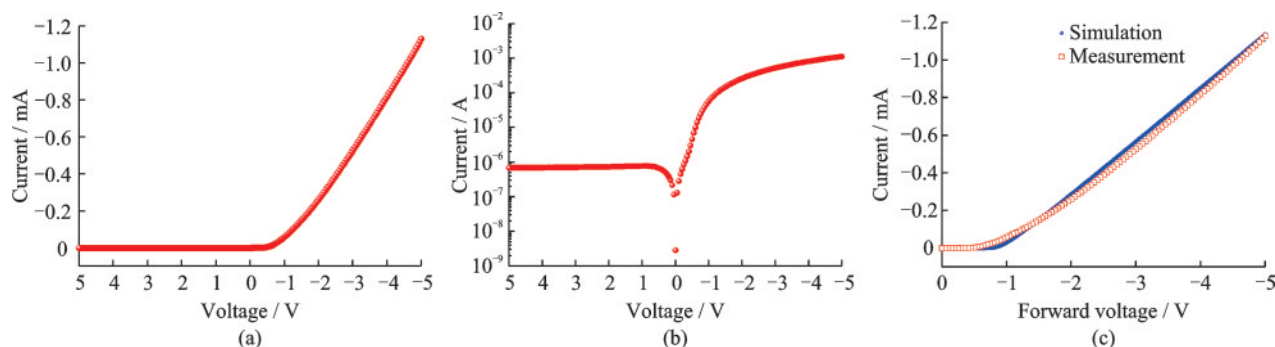


图 5 横向结构氢终端二极管:(a) I - V 特性;(b) 开关比;(c) 仿真与测试 I - V 曲线对比图

Fig.5 Transversal structure hydrogen terminal diode: (a) I - V characteristics; (b) Switching ratio; (c) Comparison of simulated and test I - V curves

在进行电路测试前,先使用软件 LT-Spice 对 RF-DC 电路进行仿真,结果如图 6 所示。射频输入信号频率为 10 MHz,幅度为 7 V,一个正弦信号周期为 $0.1\ \mu\text{s}$,图 6 给出了两个周期 ($0.2\ \mu\text{s}$) 下的波形变化图。可以看到经过 RF-DC 电路处理后,将射频电压信号由 7 V 的交流电信号转变成平均电压为 1.97 V 的直流电信号。

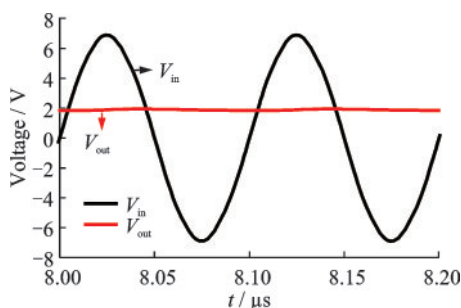


图 6 RF-DC 电路仿真结果

Fig.6 Simulated results of RF-DC circuit

图 7 为 RF-DC 电路进行测试的结果图。使用信号发生器对电路施加频率为 10 MHz、幅值为 7 V 的正弦波交流信号,并由示波器端接收处理过的直流电压信号。图 7 显示的是在 $8.0\sim 8.2\ \mu\text{s}$ 过程中两个输入周期内实际输入电压与实际和仿真输出电压的关系, $0.2\ \mu\text{s}$ 对应 10 MHz 正弦周期内两个周期。可以看到经过整流电路处理后输出电压与仿真结果基本一致。

最后对电路中的功率转化效率 (E_{PC}) 进行分析:

$$E_{\text{PC}} = \frac{P_{\text{DC}}}{P_{\text{RF}}} \quad (1)$$

$$P = V_{\text{rms}} \times I_{\text{rms}} \times \cos\varphi \quad (2)$$

其中 P_{RF} 表示射频功率, P_{DC} 表示直流功率, V_{rms} 表示电压的有效值, I_{rms} 表示电流的有效值, φ 表示电压和电流之间的相位差。通过分析可知,由于输出端电

压电流之间存在接近 180° 的相位差,即 $\varphi \approx 180^\circ$, $\cos\varphi \approx -1$ 。计算得 $P_{\text{RF}} = -5.25\ \text{mW}$, $P_{\text{DC}} = 0.7\ \text{mW}$, $E_{\text{PC}} = 13.3\%$ 。

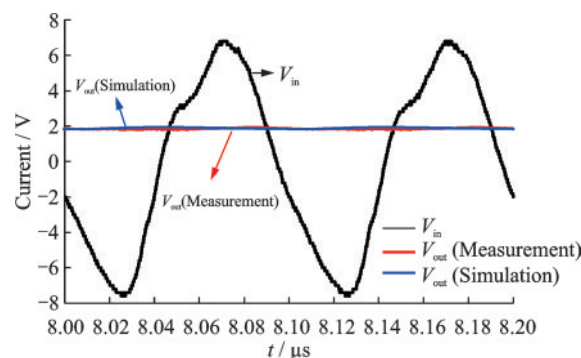


图 7 RF-DC 电路实际测试结果

Fig.7 Test results of RF-DC circuit

本研究基于单晶 CVD 金刚石制备了氢终端横向肖特基二极管,进一步实现了金刚石整流电路。通过仿真和实验分析研究,成功实现了 RF-DC 整流电路功能,实验和仿真数据一致性高。结果表明氢终端金刚石在整流电路中具有极大的应用潜力。

3 结 论

基于单晶 CVD 金刚石样品,制备金刚石氢终端 SBD 器件,对器件进行测试并提取相应参数。当二极管的正向电压为 $-5\ \text{V}$ 时,电流大小为 $1.13\ \text{mA}$,开启电压为 $-1.56\ \text{V}$,开关比 $I_{\text{on}}/I_{\text{off}} > 10^3$,器件的理想因子 n 为 2.43。然后在 LT-Spice 中搭建 RF-DC 整流电路并仿真,将实际制备的 SBD 器件参数带入到仿真电路中,器件仿真和实测数据一致性好。使用金线键合工艺完成器件与电路的键合,制备 RF-DC 电路。电路测试显示,成功将 10 MHz 的射频电压信号由 7 V 的交流电转变成平均电压为 1.97 V 的直流

电,转换效率为13.3%。本研究验证了金刚石肖特基二极管在高频整流电路中的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Isberg J, Hammersberg J, Johansson E, et al. High carrier mobility in single-crystal plasma-deposited diamond [J]. *Science*, 2002, 297(5587): 1670-1672.
- [2] Achard J, Silva F, Tallaie A, et al. High quality MPACVD diamond single crystal growth: high microwave power density regime [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(20): 6175-6188.
- [3] Geis M W, Smith H I, Argoitia A, et al. Large-area mosaic diamond films approaching single-crystal quality [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58(22): 2485-2487.
- [4] Tallaie A, Achard J, Silva F, et al. Growth of large size diamond single crystals by plasma assisted chemical vapour deposition: recent achievements and remaining challenges [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2013, 14(2-3): 169-184.
- [5] Kato T, Miyake T, Tashima D, et al. Maximum output power control using short-circuit current and open-circuit voltage of a solar panel [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(10): 10NF08.
- [6] Kawarada H, Aoki M, Ito M. Enhancement mode metal-semiconductor field effect transistors using homoepitaxial diamonds [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 65(12): 1563-1565.
- [7] Ueda K, Kasu M, Yamauchi Y, et al. Diamond FET using high-quality polycrystalline diamond with f_t of 45 GHz and f_{max} of 120 GHz [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2006, 27(7): 570-572.
- [8] Hirama K, Sato H, Harada Y, et al. Thermally stable operation of H-terminated diamond FETs by NO_2 adsorption and Al_2O_3 passivation [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, 33(8): 1111-1113.
- [9] Yu C, Zhou C J, Guo J C, et al. Hydrogen-terminated diamond MOSFETs on (0 0 1) single crystal diamond with state of the art high RF power density [J]. *Functional Diamond*, 2022, 2(1): 64-70.
- [10] Twitchen D J, Whitehead A J, Coe S E, et al. High-voltage single-crystal diamond diodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2004, 51(5): 826-828.
- [11] Butler J E, Geis M W, Krohn K E, et al. Exceptionally high voltage Schottky diamond diodes and low boron doping [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, 18(3): S67-S71.
- [12] Traoré A, Muret P, Fiori A, et al. Zr/oxidized diamond interface for high power Schottky diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(5): 052105.
- [13] Vescan A, Daumiller I, Gluche P, et al. Very high temperature operation of diamond Schottky diode [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1997, 18: 556-558.
- [14] Vescan A, Daumiller I, Gluche P, et al. High temperature, high voltage operation of diamond Schottky diode [J]. *Diamond and Related Materials*, 1998, 7(2-5): 581-584.
- [15] Shinohara N. Rectennas for microwave power transmission [J]. *IEICE Electronics Express*, 2013, 10(21): 20132009.
- [16] Hemour S, Wu K. Radio-frequency rectifier for electromagnetic energy harvesting: development path and future outlook [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(11): 1667-1691.
- [17] Takahashi K, Ao J P, Ikawa Y, et al. GaN Schottky diodes for microwave power rectification [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, 48(4): 04C095.
- [18] Kobayashi Y, Tashiro S, Noji T, et al. GaN HEMT based rectifier for spacecraft health monitoring system using microwave wireless power transfer [C]. *2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings*. Kaohsiung, Taiwan: IEEE, 2012: 391-393.
- [19] Blevins J D, Via G D, Bar-Cohen A, et al. Developing a new thermal paradigm for gallium nitride (GaN) device technology [C]. *Compound Semiconductor Man-Tech Conference*. Miami, Florida, 2016: 141-146.
- [20] Woo H, Jo Y, Kim J, et al. Effect of heating on electrical transport in AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes on Si substrate [J]. *Current Applied Physics*, 2014, 14(S1): S98-S102.
- [21] Oishi T, Kawano N, Masuya S, et al. Diamond Schottky barrier diodes with NO_2 exposed surface and RF-DC conversion toward high power rectenna [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, 38(1): 87-90.



马源辰(MA Yuanchen) 男,1998年生,福建宁德人,博士,主要研究方向为金刚石生长与器件制备。

任泽阳(REN Zeyang) 男,1991年生,山东枣庄人,博士,副教授,主要研究方向为宽禁带半导体材料与器件。

李逸江(LI Yijiang) 男,1999年生,陕西宝鸡人,硕士,主要研究方向为硼掺杂金刚石。

张金凤(ZHANG Jinfeng) 女,1977年生,陕西铜川人,博士,教授,主要研究方向为金刚石和III-V氮化物半导体材料与器件。