**DOI**：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.230 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

# 一种基于氮化镓94%高效率宇航二次电源的研究

吕晓峰[1]，王英武[2]，巴得俊[1](中国电源学会学生会员)，许春飞[1]，王弈赫[1]，牛雨欣[1]

(1.浙江大学航空航天学院，杭州 310000；2.西安微电子技术研究所，西安 710054)

**摘要**：聚焦氮化镓GaN(gallium nitride)功率器件在提升宇航电源系统高功率密度及高效化方面的潜力，设计了一款集成控制器与驱动器的250 W GaN宇航二次电源样机，并通过Ansys仿真优化高频变压器绕组结构提高输出效率。实验结果表明，该GaN宇航电源峰值输出效率达94%，功率密度约高达12 W/cm²，相较于同等级硅器件电源，效率提升3.8%，功率密度提升2.7倍。此外，单粒子辐射实验验证了GaN器件的抗辐照特性。

**关键词**：GaN功率器件；高频变压器；宇航电源；高功率密度; 单粒子效应

# Study on Aerospace Secondary Power Supply with Efficiency of 94% Based on GaN

LÜ Xiaofeng[1], WANG Yingwu[2], BA Dejun[1], *Student Member*, *CPSS*, XU Chunfei[1], WANG Yihe[1], NIU Yuxin[1]

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China; 2. Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The potential of gallium nitride (GaN) power devices in enhancing the high power density and efficiency of aerospace power systems is focused on, and a 250 W GaN aerospace secondary power supply prototype with an integrated controller and driver is designed. The high-frequency transformer winding structure is optimized by Ansys simulations to improve the output efficiency. Experimental results show that the peak output efficiency of proposed GaN aerospace power supply reached 94%, and its power density was as high as about 12 W/m². Compared with those of the power supply of the same grade silicon device, its efficiency was 3.8% higher, and its power density was 2.7 times higher. In addition, the results of single-particle radiation experiments verified the anti-irradiation characteristics of GaN devices.

**Keywords:** GaN power device; high-frequency transformer; aerospace power supply; high power density; single-event effect (SEE)

宇航电源系统中，二次电源将主电源提供的电能转化为满足特定需求的电能形式，其性能优劣直接关系到航天器各子系统的正常运行。因此，宇航二次电源不仅需要提供稳定、高效的电能，适应宇航环境中的极端温度、强辐射等[1-2]，对于功率密度、效率和质量等方面的要求也日益增加。传统的硅(Si)功率器件电源面临着功率损耗大、功率密度小和输出效率低等问题。氮化镓GaN(gallium nitride)功率器件以优异的性能特点成为宇航电源系统关注的新型器件[3]。

GaN功率器件作为一种新型半导体功率器件，以高开关频率、高耐压、低导通阻抗等特性，在通信[4]、工业电源适配器[5]、电动汽车[6]等领域得到了巨大发展[7-8]。在宇航电源领域，GaN的宽带隙结构在抗总电离剂量TID(total ionizing dose)辐射方面有着固有优势，但对单粒子效应SEE(single-event effect)较为敏感[9-10]。研究抗辐照功率GaN器

**收稿日期**：2024-09-11；**修回日期**：2024-10-15；**录用日期**：2024-10-22；**网络首发日期**：2025-01-16

件在宇航环境下(包括极端温度、空间辐射效应等)的性能稳定性，对其在宇航电源领域中的应用至关重要[11-12]，已受到全世界的关注。美国 DARPA 率先研究 GaN 功率器件应用于射频电源;美国航空航天局、欧洲航天局及希腊 SITAEL Hellas 公司等相继开展了增强型氮化镓 eGaN (enhancement-mode GaN)功率器件替代传统 Si 开关器件的研究[13-14]；EPC Space、Infineon 等国外公司推出了多款用于宇航的抗辐照 GaN 功率器件[9]。国内针对宇航电源使用的抗辐照 GaN 功率器件仍处在研发阶段，应用方面的研究相对较少[15-16]。随着高频化的发展趋势，功率变压器在高频下的一系列高频效应会导致绕组 AC 阻抗增加，进而增加绕组的工作损耗。传统的变压器设计方法针对高频变压器的设计存在局限性,进而对电源的输出效率产生影响[17]。因此，基于仿真指导高频变压器绕组结构的优化设计方法对研究高频 GaN 宇航电源的高效率输出有着重要意义。

本文通过 GaN 功率器件的抗辐照实验和基于仿真优化的高频变压器，设计了具有高功率密度、高输出效率的宇航二次电源，并对 GaN 器件进行了单粒子实验验证。首先对宇航电源主功率拓扑工作模态及损耗进行了分析；然后通过仿真优化确定了高频变压器方案；最后对比 Si 和 GaN 功率器件电源样机体积及输出效率，验证了所设计 GaN 器件的高效率、高功率密度优势。

## 1　电源主功率拓扑及损耗分析

本文设计的宇航二次电源主功率拓扑采用隔离式半桥同步整流拓扑结构，如图 1 所示，其中，$U_{in}$ 为输入电压。该方案由高频变压器 $T_1$、输出电感 $L_1$、一次侧电容 $C_1/C_2$ 和 GaN 功率管 $Q_1/Q_2$ 组成的高频逆变电路，以及二次侧功率管 $Q_{SR1}/Q_{SR2}/Q_{SR3}/Q_{SR4}$ 组成的高频整流电路组成。二次侧采用双功率管并联可有效降低损耗，提高输出效率。

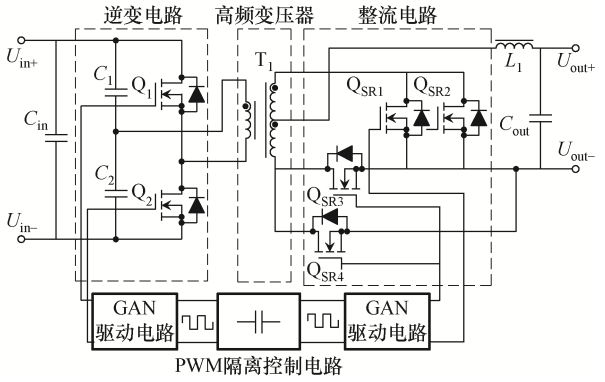



**图 1　半桥同步整流隔离电源 DC-DC 变换器**

**Fig. 1 Half-bridge synchronous rectifier DC-DC converter**

### 1.1　主功率拓扑工作模态分析

对主功率拓扑的不同模态进行分析，可以确定影响二次电源的主要功耗因素，进而实现对输出效率的优化。主功率拓扑在不同工作阶段的等效电路图和关键工作波形如图 2 所示。

半桥同步整流拓扑在 1 个开关周期内主要分为 4 个工作模态。

模态 1[$t_0$, $t_1$]：$Q_1$ 开通，$Q_2$ 关断。电流由输入端流经 $Q_1$、变压器一次线圈 $N_P$ 与 $C_2$ 形成电流回路，此时 $N_P$ 两端压降为 $U_{in}/2$。二次线圈 $N_{S1}$ 产生感应电动势，感应电压为 $U_{in}/(2n)$，$n$ 为线圈匝比，此时 $Q_{SR1}$ 和 $Q_{SR2}$ 开通，$Q_{SR3}$ 和 $Q_{SR4}$ 关断。电流通过储能电感与输出电容、$Q_{SR1}$ 和 $Q_{SR2}$ 形成回路，向电容电感充电并向负载供电。

模态 2($t_1$, $t_2$]：$Q_1$ 关断，$Q_2$ 关断。$N_P$ 因 $Q_1$ 关断，一次侧无电流回路，变压器停止传输能量，此时变压器二次绕组 $N_{S1}$ 和 $N_{S2}$ 端点电压皆为 0。二次侧储能电感续流向负载供电,各 1/4 电流经 $Q_{SR1}$、$Q_{SR2}$、$Q_{SR3}$、$Q_{SR4}$ 过两线圈共同连接点，回到储能电感。储能电感在开关关断时续流向负载供电，电感压降与输出相同。

模态 3($t_2$, $t_3$]：$Q_1$ 关断，$Q_2$ 开通。电流由输入端流经 $C_1$、$N_P$ 与 $Q_2$ 形成电流回路，此时 $N_p$ 两端压降为 $U_{in}/2$。$N_{S2}$ 产生感应电动势，感应电压为 $U_{in}/(2n)$,此时 $Q_{SR3}$ 和 $Q_{SR4}$ 开通,$Q_{SR1}$ 和 $Q_{SR2}$ 关断。电流通过储能电感与输出电容、$Q_{SR3}$ 和 $Q_{SR4}$ 形成回路，向电容电感充电并向负载供电。

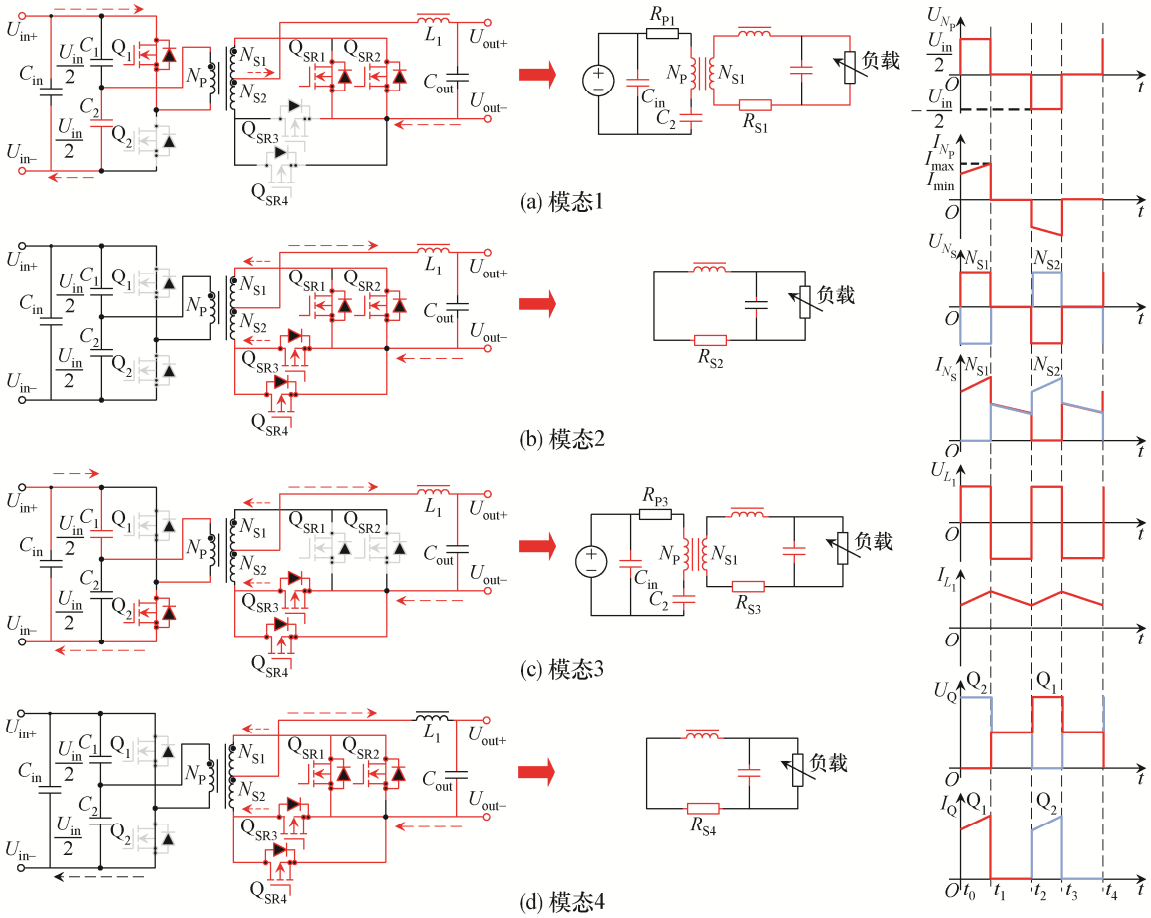



图 2 不同工作阶段的等效电路与关键波形

**Fig. 2 Equivalent circuits and key waveforms at different operating stages**

模态 4($t_3$, $t_4$]：$Q_1$ 关断，$Q_2$ 关断。$N_P$ 因 $Q_2$ 关断，一次侧无电流回路，变压器停止传输能量，此时 $N_{S1}$ 和 $N_{S2}$ 端点电压皆为 0。二次侧储能电感续流向负载供电，各 1/4 电流经 $Q_{SR1}$、$Q_{SR2}$、$Q_{SR3}$、$Q_{SR4}$ 过两线圈共同连接点，回到储能电感。储能电感在开关关断时续流向负载供电，电感压降与输出相同。

### 1.2 电路损耗分析

在电路损耗计算过程中，由于电容的等效串联电阻 ESR(equivalent series resistance)相对较小，忽略后得到各工作阶段一、二次绕组等效阻抗分别为

$$Z_P=\begin{cases}R_{DS,Q_1}+R_{N_P} & t_0<t\leqslant t_1\\ 0 & t_1<t\leqslant t_2\\ R_{DS,Q_2}+R_{N_P} & t_2<t\leqslant t_3\\ 0 & t_3<t\leqslant t_4\end{cases}\tag{1}$$

$$Z_S=\begin{cases}R_{DS,Q_{SR1}//Q_{SR2}}+R_{L_1}+R_{N_{S1}} & t_0<t\leqslant t_1\\ R_{DS,Q_{SR1}//Q_{SR2}//Q_{SR3}//Q_{SR4}}+R_{L_1}+R_{N_{S1}} & t_1<t\leqslant t_2\\ R_{DS,Q_{SR3}//Q_{SR4}}+R_{L_1}+R_{N_{S1}} & t_2<t\leqslant t_3\\ R_{DS,Q_{SR1}//Q_{SR2}//Q_{SR3}//Q_{SR4}}+R_{L_1}+R_{N_{S2}} & t_3<t\leqslant t_4\end{cases}\tag{2}$$

式中：$R_{DS,Q_1}$、$R_{DS,Q_2}$、$R_{DS,Q_{SR1}}$、$R_{DS,Q_{SR2}}$、$R_{DS,Q_{SR3}}$、$R_{DS,Q_{SR4}}$ 分别为对应功率器件的导通电阻；$R_{N_P}$ 为变压器一次侧线阻；$R_{N_{S1}}$、$R_{N_{S2}}$ 为变压器二次侧线阻；$R_{L_1}$ 为电感线阻。理想化绕组 $N_{S1}$ 和 $N_{S2}$ 参数相同，二次侧 4 个功率管导通电阻相同，且开通和关断时间均同步，得到总阻抗为

$$Z_{\mathrm{ESR}}=\begin{cases}R_{\mathrm{DS,Q_1}}+R_{N_{\mathrm{P}}}+\left(\dfrac{R_{\mathrm{DS,Q_{SR1}}}}{2}+R_{L_1}+R_{N_{\mathrm{S1}}}\right)\left(\dfrac{N_{\mathrm{P}}}{N_{\mathrm{S1}}}\right)^2 & t_0<t\leqslant t_1\\ \left(\dfrac{R_{\mathrm{DS,Q_{SR1}}}}{4}+R_{L_1}+R_{N_{\mathrm{S1}}}\right)\left(\dfrac{N_{\mathrm{P}}}{N_{\mathrm{S1}}}\right)^2 & t_1<t\leqslant t_2\\ R_{\mathrm{DS,Q_2}}+R_{N_{\mathrm{P}}}+\left(\dfrac{R_{\mathrm{DS,Q_{SR1}}}}{2}+R_{L_1}+R_{N_{\mathrm{S1}}}\right)\left(\dfrac{N_{\mathrm{P}}}{N_{\mathrm{S1}}}\right)^2 & t_2<t\leqslant t_3\\ \left(\dfrac{R_{\mathrm{DS,Q_{SR1}}}}{4}+R_{L_1}+R_{N_{\mathrm{S1}}}\right)\left(\dfrac{N_{\mathrm{P}}}{N_{\mathrm{S1}}}\right)^2 & t_3<t\leqslant t_4\end{cases} \tag{3}$$

$Z_{\mathrm{ESR}}$ 主要包括功率管导通阻抗、电感及变压器线阻。功率器件的驱动损耗 $P_{\mathrm{Gate,Loss}}$ 和开关损耗会随着工作频率 $f_{\mathrm{sw}}$ 的升高而增大。驱动损耗计算公式为

$$P_{\mathrm{Gate,Loss}}=\begin{cases}(Q_{\mathrm{gs,Q_1}}U_{\mathrm{gs,Q_1}}+2Q_{\mathrm{gs,Q_{SR1}}}U_{\mathrm{gs,Q_{SR1}}})f_{\mathrm{sw}} & t_0<t\leqslant t_1\\ 4Q_{\mathrm{gs,Q_{SR1}}}U_{\mathrm{gs,Q_{SR1}}}f_{\mathrm{sw}} & t_1<t\leqslant t_2\\ (Q_{\mathrm{gs,Q_2}}U_{\mathrm{gs,Q_2}}+2Q_{\mathrm{gs,Q_{SR1}}}U_{\mathrm{gs,Q_{SR1}}})f_{\mathrm{sw}} & t_2<t\leqslant t_3\\ 4Q_{\mathrm{gs,Q_{SR1}}}U_{\mathrm{gs,Q_{SR1}}}f_{\mathrm{sw}} & t_3<t\leqslant t_4\end{cases} \tag{4}$$

式中：$Q_{\mathrm{gs,Q_1}}$、$Q_{\mathrm{gs,Q_2}}$、$Q_{\mathrm{gs,Q_{SR1}}}$ 分别为对应功率管栅源极电荷；$U_{\mathrm{gs,Q_1}}$、$U_{\mathrm{gs,Q_2}}$、$U_{\mathrm{gs,Q_{SR1}}}$ 分别为对应功率管栅源极电压。开关损耗中开通损耗 $P_{\mathrm{Switch,on}}$ 计算公式为

$$P_{\mathrm{Switch,on}}=\frac{1}{2}U_{\mathrm{DS}}I_{\mathrm{DS}}t_{\mathrm{rise}}f_{\mathrm{sw}} \tag{5}$$

式中：$U_{\mathrm{DS}}$、$I_{\mathrm{DS}}$ 分别为漏源电压、漏极电流；$t_{\mathrm{rise}}$ 为上升时间，$t_{\mathrm{rise}}=Q_{\mathrm{g}}/i_{\mathrm{drive}}$，$Q_{\mathrm{g}}$ 为栅极总电荷，$i_{\mathrm{drive}}$ 为驱动电流。假设开通损耗和关断损耗相等，可以计算得到整个工作周期开关损耗为

$$P_{\mathrm{Switch,Loss}}=\begin{cases}U_{\mathrm{DS,Q_1}}I_{\mathrm{Q_1}}t_{\mathrm{rise}}f_{\mathrm{sw}} & t_0<t\leqslant t_1\\ 4U_{\mathrm{DS,Q_{SR1}}}I_{\mathrm{Q_{SR1}}}t_{\mathrm{rise}}f_{\mathrm{sw}} & t_1<t\leqslant t_2\\ U_{\mathrm{DS,Q_1}}I_{\mathrm{Q_1}}t_{\mathrm{rise}}f_{\mathrm{sw}} & t_2<t\leqslant t_3\\ 4U_{\mathrm{DS,Q_{SR1}}}I_{\mathrm{Q_{SR1}}}t_{\mathrm{rise}}f_{\mathrm{sw}} & t_3<t\leqslant t_4\end{cases} \tag{6}$$

式中：$U_{\mathrm{DS,Q_1}}$、$U_{\mathrm{DS,Q_{SR1}}}$ 和 $I_{\mathrm{Q_1}}$、$I_{\mathrm{Q_{SR1}}}$ 分别为对应器件导通电压和流经的电流。

在不考虑变压器磁心损耗的前提下，功率器件的导通电阻 $R_{\mathrm{DS(ON)}}$、$Q_{\mathrm{g}}$ 以及输入电容 $C_{\mathrm{iss}}$、输出电容 $C_{\mathrm{oss}}$、反向传输电容 $C_{\mathrm{rss}}$ 性能参数，$R_{N_{\mathrm{P}}}$、$R_{N_{\mathrm{S1}}}$、$R_{N_{\mathrm{S2}}}$ 及 $R_{L_1}$ 是影响器件电源输出效率和损耗的主要因素。

## 2　功率器件及变压器优化

### 2.1　功率氮化镓器件性能参数对比

功率器件工作损耗(包括导通损耗、开关损耗、驱动损耗)是影响二次电源输出效率的主要因素之一。因此，功率器件的参数及选型会对二次电源的输出效率产生影响。100 V 工业级和宇航级 Si 和 GaN 功率器件参数对比见表 1，其中 $U_{\mathrm{gs,th}}$ 为栅源极阈值电压。通常在相同标准等级、相同击穿电压 BV(breakdown voltage)$U_{\mathrm{br}}$ 下，GaN 器件的 $R_{\mathrm{DS(ON)}}$ 和 $Q_{\mathrm{g}}$ 均显著小于 Si 器件。在宇航高频二次电源应用中，功率器件的驱动损耗和开关损耗会随着工作频率的升高而增大，而在相同的工作频率下，GaN 器件具有更小的导通损耗、驱动损耗和开关损耗。因此，GaN 器件更加适应于高频工作条件。相较于工业级 GaN 器件，宇航级 GaN 器件由于抗辐照加固设计，具有较高的 $Q_{\mathrm{g}}$、$C_{\mathrm{iss}}$、$C_{\mathrm{oss}}$、$C_{\mathrm{rss}}$,因此其抗辐照能力相较于工业级 GaN 更优。

### 2.2　功率氮化镓器件空间特性验证

空间辐射效应是航天器在轨面临的最复杂、影响最广泛及危害最大的环境问题，其作用范围涵盖航天器的所有材料、器件及部组件。GaN 功率器件在空间强辐射环境下的可靠性研究，是 GaN 宇航电源面临的主要挑战[18]。空间辐射环境主要来源有

**表 1 100 V Si MOS 和 GaN HEMT 功率器件对比**

**Tab. 1 Comparison between 100 V Si MOS and GaN HEMT power devices**

| 参数 | 100 V Si MOS (工业级) | 100 V GaN HEMT (工业级) | 100 V Si MOS (宇航级) | 100 V GaN HEMT (宇航级) |
|---|---|---|---|---|
| 封装 | SOT-23 | WLCSP 3 mm×5 mm | SMD-2 | 裸片倒装 6.05 mm×2.3 mm |
| 型号 | IRLML0100TRPbF-1 | INN100W12 | IRHNA57160 | EPC7018 |
| $U_{br}$/V | 100 | 100 | 100 | 100 |
| $U_{gs,th}$/V | 1.0~2.5 | 1.1 | 2.0~4.0 | 1.2 |
| $R_{DS(ON)}$/mΩ | 220.0 | 6.0 | 12.0 | 2.7 |
| $Q_g$/nC | 2.5 | 5.2 | 160.0 | 15.2 |
| 品质因数($R_{DS(ON)}$·$Q_g$) | 550.0 | 31.2 | 1 920.0 | 41.0 |
| $C_{iss}$/nF | 0.290 | 0.660 | 6.440 | 1.828 |
| $C_{oss}$/nF | 0.002 7 | 0.238 0 | 1.660 0 | 1.025 0 |
| $C_{rss}$/nF | 0.001 3 | 0.002 6 | 0.060 0 | 0.005 8 |

3 个：地磁场俘获带、太阳宇宙射线、银河宇宙射线[19]。GaN 功率器件在空间中的辐射特性主要有 SEE、TID、瞬时剂量率效应和位移损伤效应。空间辐射效应的模拟通常在地面利用实验室辐射模拟装置开展[20]，本实验选取了 EPC 100 V GaN 功率器件进行 SEE 实验，监测了在单粒子照射下 GaN 器件的栅极、漏极电流与漏极电压的变化曲线，实验结果如图 3 所示。随着单粒子能量的作用，漏极电流会随之增大，表明单粒子照射会对器件的电性能产生影响。从实验结果看，虽然实验选用的 GaN 功率器件在单粒子照射下漏极电流增大，但其抗空间辐射性能较强，在 BV 电压下，依旧能保证其应用的性能稳定性。

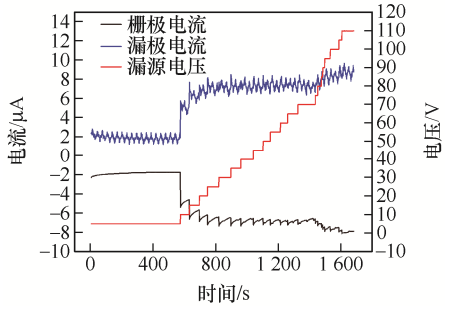



**图 3 GaN 器件单粒子辐射变化**

**Fig. 3 Variations in single-particle radiation of GaN device**

## 2.3 高频变压器设计

本文设计的 250 W 宇航二次电源指标见表 2。

**表 2 250 W 二次电源设计指标**

**Tab. 2 Design indexes for 250 W secondary power supply**

| 参数 | 设计值 |
|---|---|
| 输入电压 $U_{in}$ | 30~50$U_{DC}$ |
| 输出电压 $U_{out}$ | 5$U_{DC}$ |
| 输出功率 $P_{out}$/W | 250 |
| 工作频率 $f_{sw}$/kHz | 400 |

根据二次电源参数指标设计主功率变压器。变压器选择天通 TPW33 磁心材料，型号规格为 EIR20，磁心有效导磁截面积 $A_e$=60.09×10$^{-6}$ m$^2$，有效磁路体积 $V_e$=141 6.7×10$^{-9}$ m$^3$。为了保证一次侧上、下功率管的死区时间，防止同时开通，选择最大占空比 $D_{max}$ 为 0.4，计算设计变压器的匝比为

$$n=\frac{1}{2}\frac{U_{in,min}}{U_{out}}\cdot 2D_{max}=2.4 \tag{8}$$

式中，$U_{in,min}$、$U_{out}$ 分别为最小输入电压和输出电压。

为了避免磁饱和，要求磁通变化率小于 0.35T。计算变压器匝数的表达式为

$$N_P=\text{Round}\left(\frac{U_{in}}{2\Delta BA_e f_{sw}}\cdot D_{max}\right) \tag{9}$$

$$N_S=\text{Ceil}\left(\frac{N_P}{n}\right) \tag{10}$$

式中：Round(·) 为取整函数；$\Delta B$ 为磁感应强度变化量；Ceil(·) 为向上取整函数。

根据磁心材料特性计算磁芯损耗，表达式为

$$P_{\mathrm{Core}}=300\left[-1.976\left(\frac{I_{\mathrm{o}}}{I_{\mathrm{o,max}}}\right)^{2}+2.808\frac{I_{\mathrm{o}}}{I_{\mathrm{o,max}}}+0.129\,1\right]\mathrm{kW/m^{3}} \tag{11}$$

式中，$I_{\mathrm{o}}$、$I_{\mathrm{o,max}}$ 分别为输出电流、最大输出电流。

## 2.4 高频变压器绕组优化及仿真

高频功率变压器作为宇航电源系统中实现一、二次侧隔离及电磁能量转换的核心器件，其能量转换效率直接影响宇航电源的输出效率。随着工作频率的提升，变压器的 AC 阻抗会变大，因此需要对变压器的绕组结构进行优化设计。

本文选择变压器匝比为 2:1:1，并对比设计了方案 1~方案 3 三种高频变压器，以验证不同绕组结构对 GaN 器件电源输出效率的影响。基于 Ansys 的变压器绕组仿真模型如图 4 所示。

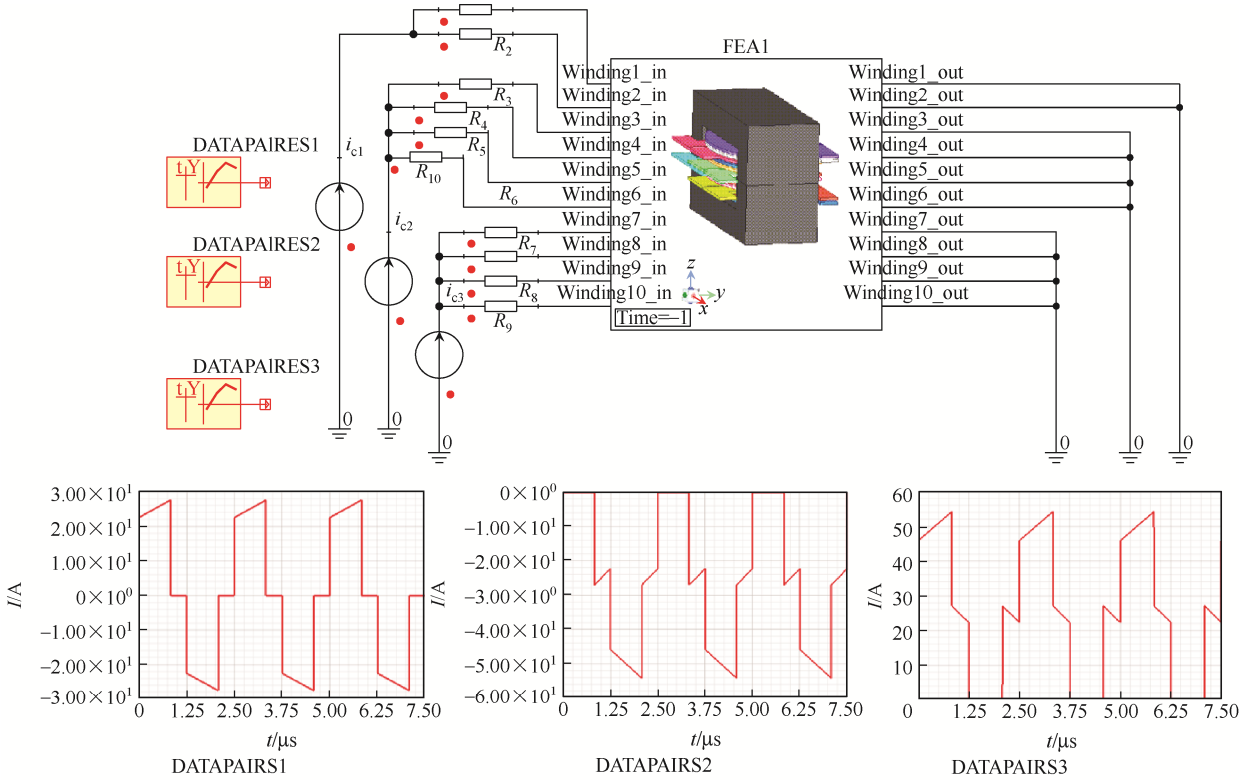
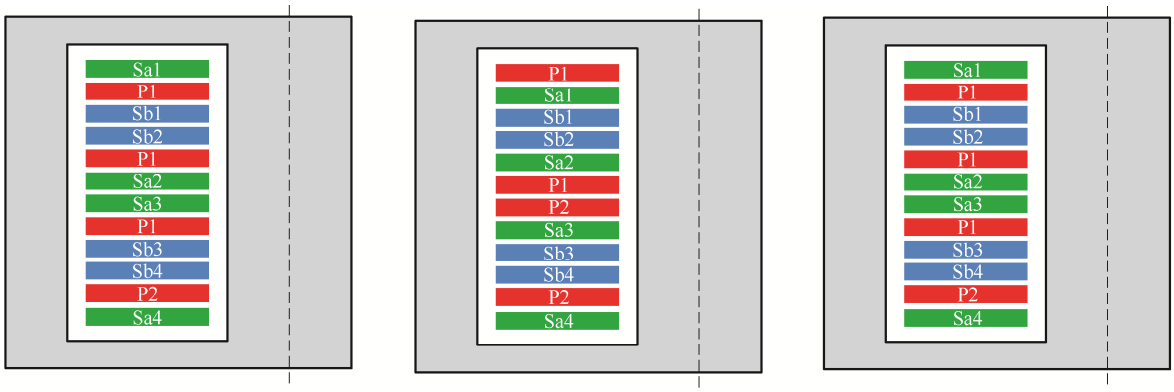



**图 4　基于 Ansys 的 Simplore 变压器仿真模型**

**Fig. 4 Simulation model of Simplore transformer based on Ansys**

变压器仿真结果如图 5 所示。图 5(a)~(c)分别为设计的 3 种变压器对比方案，对绕组在




(a) 方案1变压器绕组结构　　(b) 方案2变压器绕组结构　　(c) 方案3变压器绕组结构

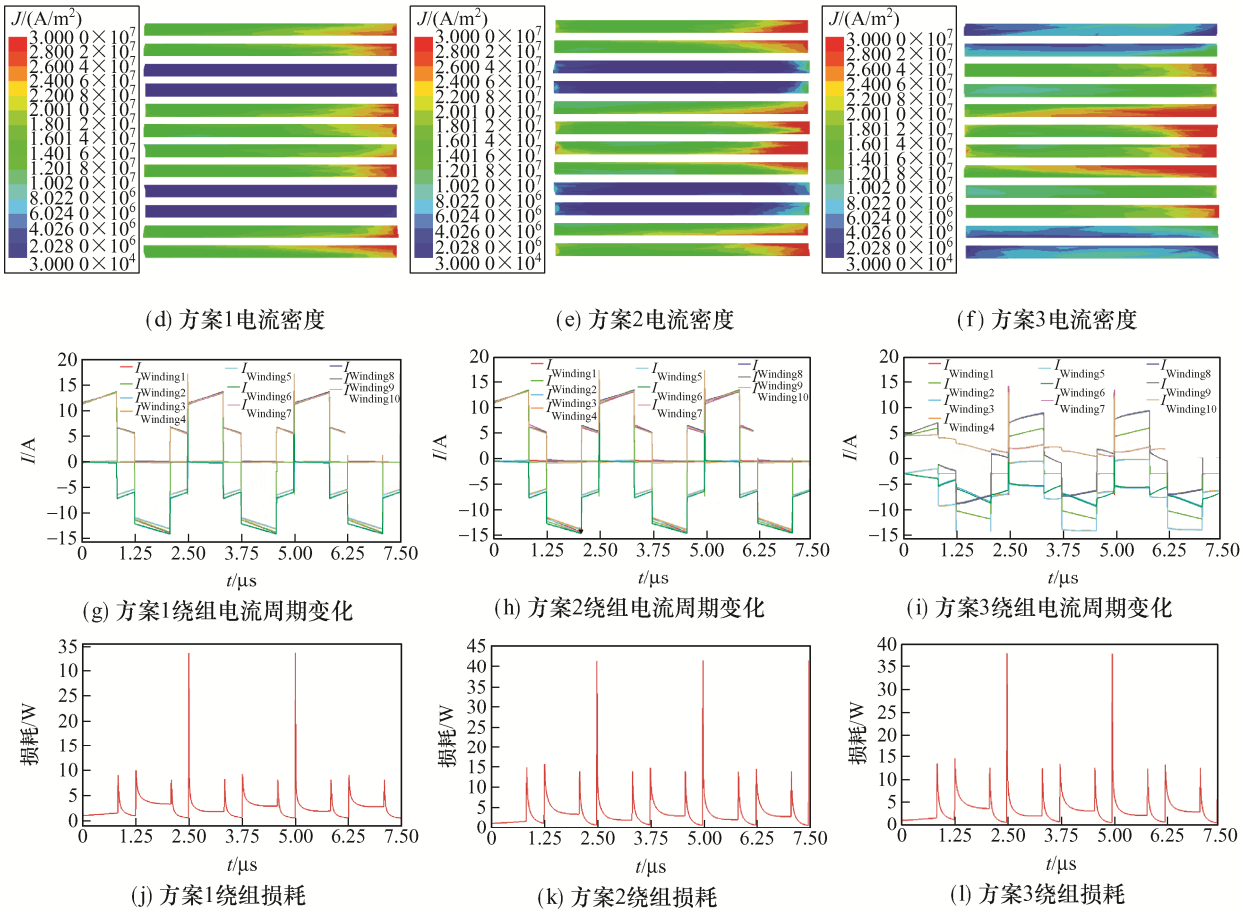



**图 5 变压器绕组结构、电流密度、绕组电流周期变化及绕组损耗仿真结果**

**Fig. 5 Simulation results of transformer winding structure, current density, winding current cycle variation and winding loss**

3 个周期(0~7.5 μs)内的电流变化进行了仿真；图 5(d)~(f)分别为在 $t$=7 μs 时 3 种方案的电流密度；图 5(g)~(i)为绕组在 3 个周期内的电流变化曲线；图 5(j)~(l)为绕组在 3 个周期内的瞬态损耗曲线。可以看出：方案 1 电流密度分布相对较为均匀，热集中较小，且每个周期内电流变化趋势相对一致；方案 1、方案 2、方案 3 在 3 个周期(0~7.5 μs)内绕组的平均损耗为 2.47、3.17、3.14 W，单个周期内的平均损耗分别为 0.82、1.05、1.04 W；方案 1 绕组排布结构损耗更小，基于此方案设计对应的变压器可以有效提高二次电源的输出效率。

## 3 实验结果分析

本文设计了输入电压 30~50 V、输出电压/电流 5 V/50 A、输出功率 250 W 的 GaN 器件二次电源，通过对比同等功率规格 Si 器件电源验证其高功率密度特性；并基于仿真结果设计对应的高频变压器，验证提高二次电源的输出效率。GaN 宇航电源控制器选择浙江航芯源抗辐射 PWM 控制器 C42603，内部集成同步整流控制输出和集成运算放大器、比较器；驱动器选择抗辐照 C43709。将隔离器与驱动器集成，可以满足高效率、高功率密度的电源要求。

图 6 为样机实物尺寸对比图，在输出电压/电流 5 V/50 A 相同的功率条件下，Si 器件电源样机为 76.7 mm×76.7 mm，功率密度为 4.22 W/cm$^2$，GaN 器件电源样机尺寸为 50.0 mm×43.0 mm，功率密度为 11.63 W/cm$^2$。GaN 电源相比 Si 电源面积减小了 63.45%，功率密度提高了 1.76 倍。

对比相同输入输出条件下，Si 电源与 GaN 电源及优化变压器后的输出效率，如图 7 所示。结果

表明，GaN 电源效率最高提高了 6.0%，半载效率提高了近 4.0%，满载效率提高了 3.8%，峰值效率可达到 94.2%。优化后的变压器结构相较于未优化结构，最高效率提高了 0.5%，降低变压器损耗 1.25 W。

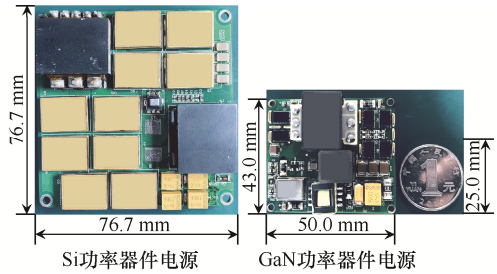



**图 6　Si 和 GaN 功率器件隔离电源实物尺寸对比**

**Fig. 6 Physical comparison of dimensions between isolated power supply in Si power device and that in GaN power device**

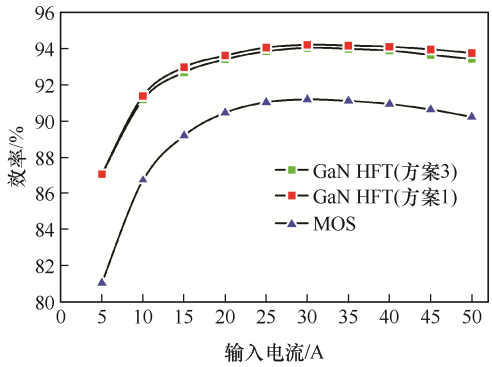
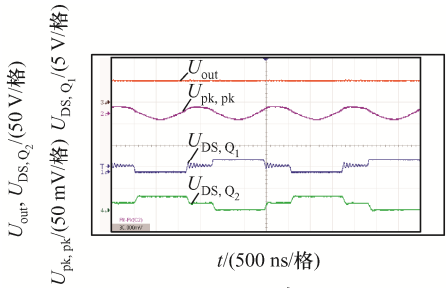


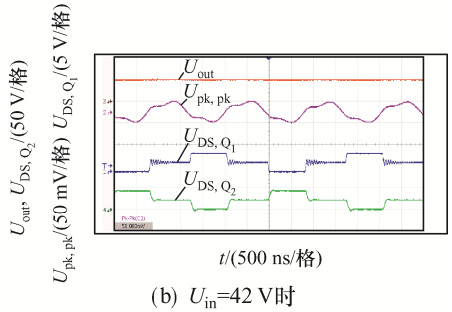

**图 7　Si 和 GaN 功率器件电源效率对比**

**Fig. 7 Comparison of efficiency between Si and GaN power devices**

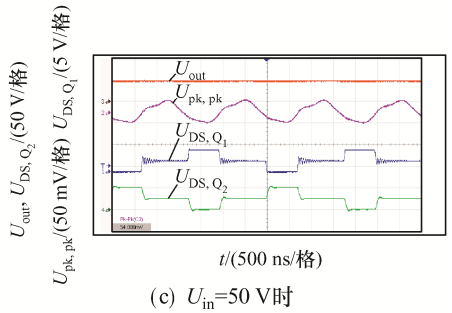
不同输入条件下，样机输出波形如图 8 所示。可以看出，在不同输入电压下，电源样机输出和应力波形稳定，输出电压纹波 $U_{\mathrm{pk,pk}}$ 较小。输入电压 50 V 时，输出最大纹波 54 mV；输入电压 30 V 时，输出最小纹波为 30 mV。




(a) $U_{\mathrm{in}}$=30 V时




(b) $U_{\mathrm{in}}$=42 V时



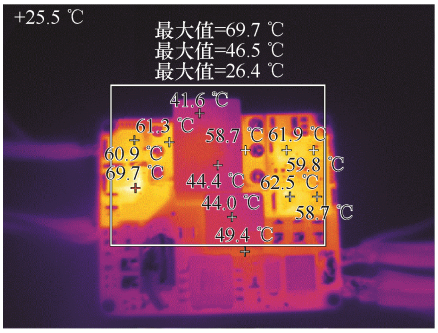

(c) $U_{\mathrm{in}}$=50 V时

**图 8　GaN 功率器件应力、输出、纹波测试波形**

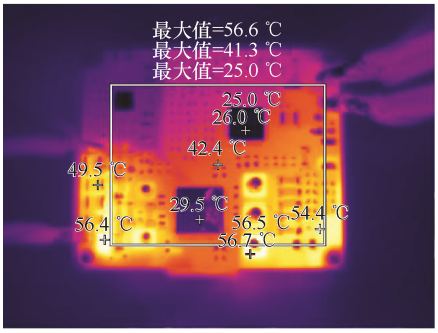
**Fig. 8 Test waveforms of stress, output and ripple of GaN power device**

图 9 为 GaN 功率器件样机红外温度测试图。可以看出，GaN 功率管的温升较低，损耗较小。

以上实验结果说明，GaN 功率器件在宇航二次




(a) 正面




(b) 反面

**图 9　250 W GaN 样机红外温度图**

**Fig. 9 Infrared temperature map of 250 W GaN prototype**

电源方案中作为关键功率器件，可以有效降低损耗，提高电源输出效率和功率密度。

## 4 结语

本文研究设计了一种高功率密度 GaN 宇航二次电源，通过比较传统 Si 器件和 GaN 器件宇航电源的功率密度、输出效率及样机热分布图验证了 GaN 器件在宇航电源应用中的优势。基于 Ansys 仿真比较设计了一种高频变压器绕组结构，实验验证了所设计的绕组结构可以有效提高高频变压器的输出效率。研究结果表明：抗辐照 GaN 功率器件可以通过单粒子实验，不会影响输出性能；基于抗辐照 GaN 器件设计的宇航电源相较于 Si 电源面积减小了 63.45%，功率密度提高了 1.76 倍，满载输出效率提高了 3.8%；优化后的高频变压器绕组相较于传统绕组，输出效率提高了 0.5%，节省功率 1.25 W。本文通过对 GaN 功率器件在宇航二次电源中的应用研究，验证了其在提升宇航电源系统性能的优势。

**参考文献：**

[1] 毕津顺, 沈立志, 梅博, 等. 面向空间应用的 GaN 功率器件及其辐射效应[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(1): 149-159.
Bi Jinshun, Shen Lizhi, Mei Bo, et al. GaN power devices and their radiation effects for space applications [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(1): 149-159. (in Chinese)

[2] 方唱凯, 王卫国, 郭显鑫, 等. 国外星载大电流直流开关电源均流技术综述[J]. 航天器工程, 2021, 30(2): 128-135.
Fang Changkai, Wang Weiguo, Guo Xianxin, et al. Review of current sharing technology for foreign spaceborne high-current DC/DC converter [J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(2): 128-135. (in Chinese)

[3] Wang Jin. Wide bandgap-based power electronics for aerospace applications [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2022, 9(3): 16-25.

[4] Li Yanchao, Lyu Xiaofeng, Cao Dong, et al. A 98.55% efficiency switched-tank converter for data center application [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 6205-6222.

[5] 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)

[6] Lu Juncheng, Zhu Liyan, Liu Guanliang, et al. Device and system-level transient analysis in a modular designed sub-MW EV fast charging station using hybrid GaN HEMTs Si MOSFETs [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1): 143-156.

[7] 蔡蔚, 孙东阳, 周铭浩, 等. 第三代宽禁带功率半导体及应用发展现状[J]. 科技导报, 2021, 39(14): 42-55.
Cai Wei, Sun Dongyang, Zhou Minghao, et al. Third generation wide bandgap power semiconductors and their applications [J]. Science & Technology Review, 2021, 39(14): 42-55. (in Chinese)

[8] Sun Ruize, Lai Jingxue, Chen Wanjun, et al. GaN power integration for high frequency and high efficiency power applications: A review [J]. IEEE Access, 2020, 8: 15529-15542.

[9] Carbone M, Hirche K, Morand S, et al. An overview of GaN FET technology, reliability, radiation and market for future space application [C]// 2019 European Space Power Conference (ESPC). Juan-les-Pins, France, 2019: 1-4.

[10] Zhou Tianyang, Zhou Feng, Chen Quanyou, et al. Normally-off Schottky-gate p-GaN HEMTs with enhanced irradiation hardness [C]// 2024 36th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Bremen, Germany, 2024: 526-529.

[11] Kuboyama S, Maru A, Shindou H, et al. Single-event damages caused by heavy ions observed in AlGaN/GaN HEMTs [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(6): 2734-2738.

[12] Khachatrian A, Buchner S, Koehler A, et al. The effect of the gate-connected field plate on single-event transients in AlGaN/GaN Schottky-gate HEMTs [J]. IEEE Transac-

tions on Nuclear Science, 2019, 66(7): 1682-1687.

[13] NASA/Goddard Space Flight Center. NASA studies space applications for GaN crystals [J]. Defense & Aerospace Week, 2018: 103.

[14] Barnes A R, Vitobello F. ESA perspective on the industrialisation of European GaN technology for space application [C]// 2014 9th European Microwave Integrated Circuit Conference. Rome, Italy, 2014: 233-236.

[15] 岳露. 基于 GaN 器件高功率密度电源设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
Yue Lu. Design and research of high power density power supply based on GaN device [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023. (in Chinese)

[16] 顾占彪, 李志斌, 石伟杰, 等. 宽禁带器件在 1 kV 高频直流谐振变换器中的应用与对比[J]. 电源学报, 2020, 18(1): 150-161.
Gu Zhanbiao, Li Zhibin, Shi Weijie, et al. Applications and comparison of wide-bandgap devices in 1 kV high-frequency resonant DC-DC converters [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(1): 150-161. (in Chinese)

[17] Ba Dejun, Lyu Xiaofeng, Wang Yihe, et al. Comparative study of the effects of HFT(PCB) parasitics on single-ended forward DC/DC converters [J]. IEICE Electronics Express, 2024, 21(19): 20240380.

[18] 赵元富, 王亮, 岳素格, 等. 宇航抗辐射加固集成电路技术发展与思考[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(4): 12-18, 44.
Zhao Yuanfu, Wang Liang, Yue Suge, et al. Development and considerations for aerospace radiation-hardened integrated circuit [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(4): 12-18, 44. (in Chinese)

[19] 陈伟, 郭晓强, 姚志斌, 等. 空间辐射效应地面模拟等效的关键基础问题[J]. 现代应用物理, 2017, 8(2): 1-12.
Chen Wei, Guo Xiaoqiang, Yao Zhibin, et al. Key basic issues in equivalent gound simulation of space radiation effects [J]. Modern Applie Physics, 2017, 8(2): 1-12. (in Chinese)

[20] 陈睿, 梁亚楠, 韩建伟, 等. 氮化镓基高电子迁移率晶体管单粒子和总剂量效应的实验研究[J]. 物理学报, 2021, 70(11): 208-215.
Chen Rui, Liang Yanan, Han Jianwei, et al. Single event effect and total dose effect of GaN high electron mobility transistor using heavy ions and gamma rays [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(11): 208-215. (in Chinese)



吕晓峰

**作者简介：**

吕晓峰(1987—　)，男，通信作者，博士，助理研究员。研究方向：宇航二次电源。E-mail：xiaofeng.lyu@zju.edu.cn。

王英武(1973—　)，男，博士，研究员。研究方向：功率变换技术，变换器建模，仿真技术。E-mail：kkww19@sina.com。

巴得俊(1996—　)，男，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：空天电子信息技术。E-mail：12324061@zju.edu.cn。

许春飞(1989—　)，男，本科，助理研究员。研究方向：宇航二次电源。E-mail：xuchunfei3020@sina.com。

王弈赫(1995—　)，男，博士研究生。研究方向：空天电子信息技术。E-mail：12224095@zju.edu.cn。

牛雨欣(1999—　)，女，博士研究生。研究方向：空天电子信息技术。E-mail：22231194@zju.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)