

2.45 GHz 微波无线能量传输用 Ge 基双通道整流单端肖特基势垒场效应晶体管*

毕思涵^{1)†} 宋建军¹⁾²⁾ 张栋¹⁾ 张士琦¹⁾

1) (西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体重点实验室, 西安 710071)

2) (中国航天科技集团有限公司抗辐射集成电路技术实验室, 西安 710071)

(2022 年 4 月 29 日收到; 2022 年 6 月 29 日收到修改稿)

整流器件是微波无线能量传输系统的核心部分, 新型整流器件的研发是当前领域研究的重要方向. 肖特基二极管和场效应晶体管是目前主流整流器件, 但二者整流范围有限, 无法实现兼顾弱能量和中等能量密度的宽范围整流. 有鉴于此, 本文提出并设计了 2.45 GHz 微波无线能量传输用 Ge 基 p 型单端肖特基势垒场效应晶体管 (源端为肖特基接触, 漏端为标准 p⁺掺杂). 在此基础上, 充分利用器件的肖特基结构, 采用新型二极管连接方式, 以实现不同偏压下开启的沟道和源衬肖特基结构的双通道宽范围整流. 采用 Silvaco TCAD 软件进行仿真, 对于负载为 0.3 pF 和 70 k Ω 的半波整流电路, 实现了 -20—24 dBm 宽范围整流, 相比同条件下 Ge 场效应晶体管范围拓宽 8 dBm, 且在范围内整体整流效率较高, 在 16 dBm 整流效率峰值可达 57.27%. 在 -10 dBm 弱能量密度的整流效率达到 6.17%, 是同等条件下 Ge 场效应晶体管的 7 倍多.

关键词: 无线能量传输, 肖特基势垒场效应晶体管, 肖特基接触, 整流效率

PACS: 84.40.Dc, 84.60.Bk, 73.43.Jn, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.71.20220855

1 引言

微波无线能量传输系统是一种突破了传输线的限制, 通过天线发射和接收微波信号, 将射频信号 (RF) 转化为直流 (DC) 信号的系统. 2.45 GHz 射频信号为我国环境中主要射频信号源, 若采用微波无线能量传输系统来传输该波段信号, 可以解决电池供电寿命短和初始成本高的问题, 且在医疗、便携式可穿戴设备等领域有广阔的应用前景^[1-4].

目前, 在微波无线能量传输领域, 国际研究者大多专注于阵列整流天线设计和整流电路优化提升, 而对新型整流器件的探索研究较少^[5-7]. 肖特基二极管和 CMOS 是主流的整流器件, 国内外对二者研究颇多, 但想实现从弱能量到中等能量密度的宽范围整流仍存在困难^[8-10]. 器件的整流范围越

宽, 对应正常工作时允许的输入电压范围就越大, 实际应用的场景就更加广泛. 因此, 通过新型整流器件来拓宽整流范围, 提升系统的整流性能, 是重要的研究方向.

传统的肖特基势垒场效应晶体管 (Schottky barrier-MOSFET, SB-MOSFET) 很好融合了 MOSFET 与肖特基结构, 若采用新型连接方式可实现沟道和源衬肖特基结构的双通道宽范围整流. 但 SB-MOSFET 具有输出电流小和反向泄漏电流明显的缺点, 限制了整流效率的提升^[11]. 而源端为肖特基接触, 漏端为标准 p⁺掺杂的单端肖特基势垒场效应晶体管 (Schottky barrier source left-MOSFET, SBSL-MOSFET), 载流子在输运时无需再翻越漏端肖特基势垒, 从而增大了沟道电流, 提高了整流效率. 当前国际的研究主要集中于通过工艺改善 SB-MOSFET 的导通电流, 而在整流应

* 高等学校学科创新引智计划 (批准号: B12026) 和智能可重构通用系统技术研究 (批准号: F020250058) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shbi@stu.xidian.edu.cn

用方面少有研究, 因此 SBSL-MOSFET 双通道整流的提出将弥补该器件在整流领域的空白^[12,13].

有鉴于此, 本文提出并设计了用于 2.45 GHz 微波无线能量传输的 Ge 基 p 型双通道整流 SBSL-MOSFET, 以实现宽范围的整流. 首先, 在传统 SB-MOSFET 基础上分析了 SBSL-MOSFET 的工作机理和电流输运, 设计了 Ge 基 p 型 SBSL-MOSFET. 之后仿真分析了器件的 $I-V$ 特性, 并提出新型连接方法下实现器件的双通道宽范围整流. 最后利用 Silvaco TCAD 软件的 MixedMode 搭建半波整流电路, 比较 SBSL-MOSFET 与几种 MOSFET 的整流性能, 证实了所设计的 SBSL-MOSFET 解决了传统器件整流范围较小的问题.

2 单端肖特基势垒场效应晶体管设计

2.1 基本输运机理

肖特基势垒场效应晶体管设计的重点在于源(漏)端肖特基接触金属的选取. 对于传统的 p 沟道 Ge 基 SB-MOSFET 选取 NiGe 作为源漏端金属, 而 SBSL-MOSFET 选取 NiGe 作为源端金属, 漏端为 p 型掺杂. 由于 Ge 价带附近费米能级钉扎的存在, 在器件关断时, NiGe 与沟道 n-Ge 接触为肖特基接触, 有较高的电子势垒(约 0.56 eV), 而在沟道反型后, 器件开启, NiGe 与 p-Ge 接触体现出欧姆特性, 空穴势垒低(约 0.1 eV)^[14,15].

对传统的 SB-MOSFET 工作机理进行分析, 图 1 是 p 沟 SB-MOSFET 表面随栅压 (V_g) 和漏压 (V_d) 变化的能带图. 如图 1(a) 所示为器件的关断状态, 此时栅压和漏压都为 0 V 时, 源漏端的

NiGe 与沟道 n-Ge 接触, 势垒高, 载流子很难通过, 其中 Φ_{bn} 为电子势垒高度, Φ_{bp} 为空穴势垒高度. 图 1(b) 展现了器件的反向泄漏, 当栅压为 0 V, 漏端有偏压时电子有一定概率隧穿通过肖特基势垒进入沟道区, 形成反向泄漏电流, 高电子势垒确保这一反向泄漏电流远小于正向导电电流, 但仍是较显著的现象. 如图 1(c) 随着栅压增大, 当电子势垒等于本征势垒高度时, 势垒消失, 此时电流主要以空穴热电子发射为主, 器件处于亚阈值状态, 尚未完全开启, 电流较小. 如图 1(d) 当栅压一直增大至阈值电压时沟道反型, 源漏端 NiGe 与反型形成的 p-Ge 接触, 空穴势垒小, 且栅压越大势垒宽度越窄, 空穴隧穿概率增加, 大量空穴可由隧穿机制从源极运动到漏极, 为载流子主要输运方式, 且伴随有少量空穴通过热电子发射翻越势垒, 器件开启.

图 2 为在传统 SB-MOSFET 基础上设计的 SBSL-MOSFET 能带图, 不同之处在于漏端采用 p⁺ 掺杂代替了肖特基结构. 图 2(a) 器件关断状态, 栅压和漏压都为 0 V, 源端为 NiGe 与 n-Ge 接触的高势垒, 漏端为 pn 结势垒, 载流子无法通过. 图 2(b) 当栅压达到阈值电压, 沟道反型, 源端为 NiGe 与 p-Ge 接触的低空穴势垒, 且漏端势垒降低. 空穴由隧穿机制从源端进入沟道后继续向漏端运动, 在漏端不再需要翻越或隧穿通过势垒, 从而增大了沟道电流. 同时, 漏端换为 p⁺ 掺杂也解决了肖特基漏端反向隧穿泄漏电流显著的问题.

2.2 电流输运方程

当 SBSL-MOSFET 的沟道未完全反型时, 价带高度低于势垒高度, 由于较宽的势垒耗尽区, 无法

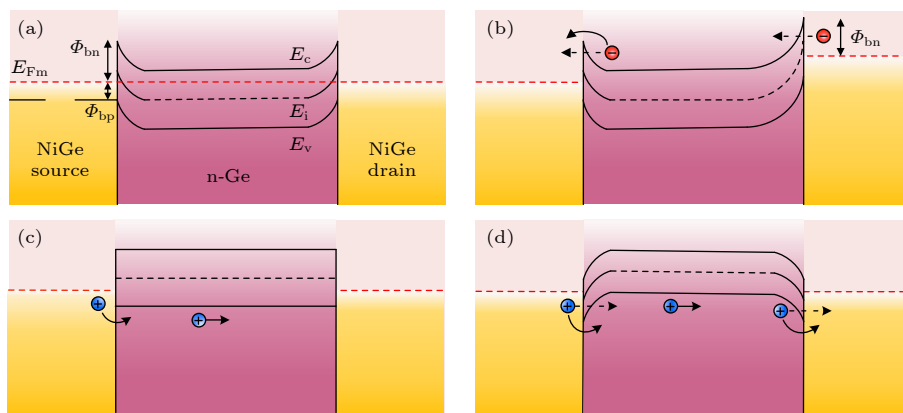


图 1 Ge 基 p 沟 SB-MOSFET 随外加电压变化的能带图 (a) $|V_g| = |V_d| = 0$; (b) $|V_g| = 0, |V_d| > 0$; (c) $|V_g| < |V_T|$; (d) $|V_g| > |V_T|$
 Fig. 1. Energy band diagram of Ge based p-channel SB-MOSFET with applied voltage: (a) $|V_g| = |V_d| = 0$; (b) $|V_g| = 0, |V_d| > 0$; (c) $|V_g| < |V_T|$; (d) $|V_g| > |V_T|$.

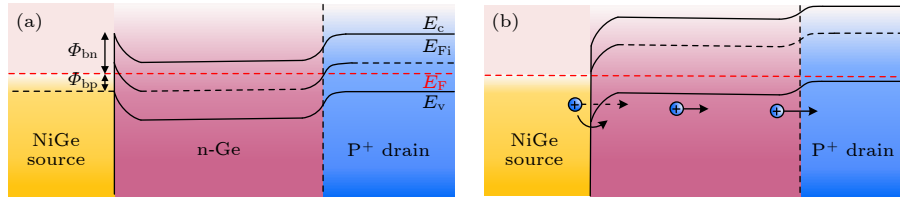

 图 2 Ge 基 p 沟 SBSL-MOSFET 随外加电压变化的能带图 (a) $|V_g| = |V_d| = 0$; (b) $|V_g| > |V_T|$

 Fig. 2. Energy band diagram of Ge based p-channel SBSL-MOSFET with applied voltage: (a) $|V_g| = |V_d| = 0$; (b) $|V_g| > |V_T|$.

发生载流子隧穿, 此时载流子的输运方式以能量较高的载流子越过势垒即热电子发射机制为主. 而当 SBSL-MOSFET 的沟道完全反型后, 势垒变薄, 隧穿概率增大, 此时载流子输运以隧穿机制为主.

当载流子的能量足够高时, 就有越过肖特基势垒的概率. 假设势垒的高度远高于 k_0T , 能够近似使用麦克斯韦-玻尔兹曼理论, 利用热电子发射理论, 则电子从半导体扩散到金属中的电流密度为 [16]

$$J_{s \rightarrow m} = A \cdot T^2 \exp\left(-\frac{q\varphi_{ns}}{k_0T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right)\right]. \quad (1)$$

而从金属扩散到半导体中的电流密度是 $J_{s \rightarrow m}$ 是一个常数, 由此可得出肖特基结构总电流密度公式为

$$\begin{aligned} J_{\text{total}} &= J_{s \rightarrow m} + J_{m \rightarrow s} \\ &= A \cdot T^2 \exp\left(-\frac{q\varphi_{ns}}{k_0T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - 1\right] \\ &= J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - 1\right], \end{aligned} \quad (2)$$

式中

$$J_s = A \cdot T^2 \exp\left(-\frac{q\varphi_{ns}}{k_0T}\right), \quad (3)$$

$$A^* = \frac{qm_n \cdot k_0^2}{2\pi^2 h^3}. \quad (4)$$

当 SBSL-MOSFET 沟道反型后, 外加栅压使得肖特基势垒变薄, 此时隧穿机制为载流子主要输运方式. (1) 式此时需考虑热电子发射和隧穿机制的共同作用, 将 (1) 式修改为 [17]

$$\begin{aligned} J_{\text{total}} &= J_{s \rightarrow m} + J_{m \rightarrow s} \\ &= -\frac{A \cdot T}{k_0} \int_0^\infty f_s(\xi)[1 - f_m(\xi)]|T_t(\xi)|d\xi \\ &\quad - \frac{A \cdot T}{k_0} \int_0^\infty f_m(\zeta)[1 - f_s(\zeta)]|T_t(\zeta)|d\zeta. \end{aligned} \quad (5)$$

考虑量子力学中半经典 WKB 近似算法, 可得载流子隧穿概率为

$$\Gamma_{\text{WKB}} = \begin{cases} 1, & \xi > q\Phi_B, \\ \exp\left(-\frac{2}{h} \int_0^r (2m_t[E_0(x) - \xi])^{\frac{1}{2}} dx\right), & 0 < \xi < q\Phi_B. \end{cases} \quad (6)$$

当能量 ξ 满足 $0 < \xi < q_B$ 时载流子输运以隧穿通过势垒为主, 当 $\xi > q_B$ 时载流子输运以热电子发射为主.

考虑到器件工作时, 金属和半导体间受正反偏压的影响, 同时考虑热电子发射和隧穿机制, 可将 (5) 式修改为

$$\begin{aligned} J_{\text{total}} &= \frac{A \cdot T}{k_0} \int_0^\infty |T_t(x)| \\ &\quad \times \ln\left(\frac{1 + \exp\left(\frac{-q\Phi_n - x}{k_0T}\right)}{1 + \exp\left(\frac{-q\Phi_n + x + qV}{k_0T}\right)}\right) dx. \end{aligned} \quad (7)$$

若积分限取 0 到势垒高度 $q(V_D - V)$, 表达式为隧穿电流, 积分限取 $q(V_D - V)$ 到正无穷则为载流子翻越势垒的热电子发射电流. 当式中 $V > 0$ 时为正向电流, $V < 0$ 为反向电流.

2.3 器件结构设计及特性仿真

肖特基势垒场效应晶体管的结构和特性会受如源 (漏) 金属选择、栅氧化层厚度、衬底掺杂浓度、栅材料选取等多个参数的影响. 基于 2.1 节理论, 本文设计的用于对照的传统 p 沟道 SB-MOSFET 选取 NiGe 合金作为源漏, NiGe 与 n-Ge 接触电子势垒高度为 0.56 eV, 栅材料选用重掺杂多晶硅栅 ($N_A = 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$).

以使器件具有低的阈值电压, 栅氧化层选取高介电常数的 HfO_2 且厚度为 7 nm, 衬底为 n-Ge 掺杂浓度 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. 在此基础上设计的 SBSL-MOSFET 除了漏端采用传统的 p⁺掺杂 Ge ($N_A = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), 其余参数与 SB-MOSFET 相同. 图 3 绘制了上述两个肖特基势垒场效应晶体管的

结构并标出了仿真使用的参数, SBLS-MOSFET 的栅宽 $W = 5 \mu\text{m}$ 、栅长 $L = 1 \mu\text{m}$ 、栅氧化层厚度 $t_{\text{ox}} = 7 \text{ nm}$ 、源(漏)厚度 $d = 10 \text{ nm}$ 、衬底掺杂浓度 $N_{\text{B}} = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、漏端掺杂浓度 $N_{\text{A}} = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

本文选取 Silvaco TCAD 来仿真肖特基势垒场效应晶体管, 仿真模型建立的关键在于物理模型的选取. 对于源(漏)肖特基结构, 选取通用肖特基隧穿(UST)模型. 在 UST 模型中, 隧道电流由肖特基触点附近网格位置的局部隧穿概率表示, 将不同势垒高度载流子隧穿概率与其浓度相乘, 再积分得到总电流. 迁移率模型选取 Lombardi, 将肖特基势垒场效应晶体管的温度、衬底掺杂浓度和温度对迁移率的影响组合计算. 图 4 为 Ge 基 SB-MOSFET 和 SBLS-MOSFET 结构模拟图, 两器件的各项参数在上文给出, 且再选取 Ge MOSFET 作为对照组, 源漏掺杂浓度 ($N_{\text{A}} = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), 其余参数与肖特基势垒场效应晶体管保持一致.

图 5 为 Ge MOSFET、Ge SB-MOSFET 和 Ge SBLS-MOSFET 在漏源电压 $V_{\text{DS}} = -0.1 \text{ V}$ 时仿真

得到的转移特性曲线图, 其中图 5(a) 为普通坐标系, 图 5(b) 为对数坐标系. 由图 5(a) 所示, 使用重掺杂多晶硅栅的 SB-MOSFET 和 SBLS-MOSFET 阈值电压低于传统的 MOSFET, 提取传统的 MOSFET 阈值为 0.41 V , SB-MOSFET 阈值为 65.31 mV , SBLS-MOSFET 阈值电压为 0.124 V , 由于 SBLS-MOSFET 漏端没有 LDD 区域, 所以其阈值会略高于 SB-MOSFET. 器件能够低栅压下开启利于在弱能量密度的整流应用, 但也会导致静态功耗上升和低电平噪声容限的下降等问题. 由图 5(b) 所示 SB-MOSFET 有明显的电子反向结泄漏电流, 这是 SB-MOSFET 的一个明显缺陷. 这种反向漏电流的大小依赖于漏极偏压, 降低了器件的关断能力, 而 SBLS-MOSFET 采用传统掺杂漏端解决了这一问题, 泄漏电流大幅度减小.

图 6 为 SB-MOSFET 和 SBLS-MOSFET 在栅压 $V_{\text{g}} = 0 \sim 0.6 \text{ V}$ 的输出特性曲线图. 改进后的 SBLS-MOSFET 输出电流明显大于相同偏压下的 SB-MOSFET, 增强了器件的输出性能, 利于整流性能的提高.

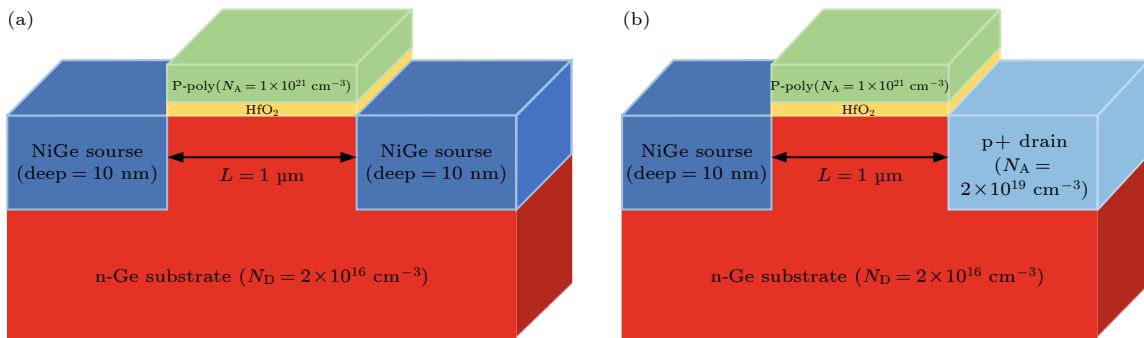


图 3 SB-MOSFET (a) 和 SBLS-MOSFET (b) 器件结构及仿真用关键参数值

Fig. 3. The key parameter values for device structure and simulation of SB-MOSFET (a) and SBLS-MOSFET (b).

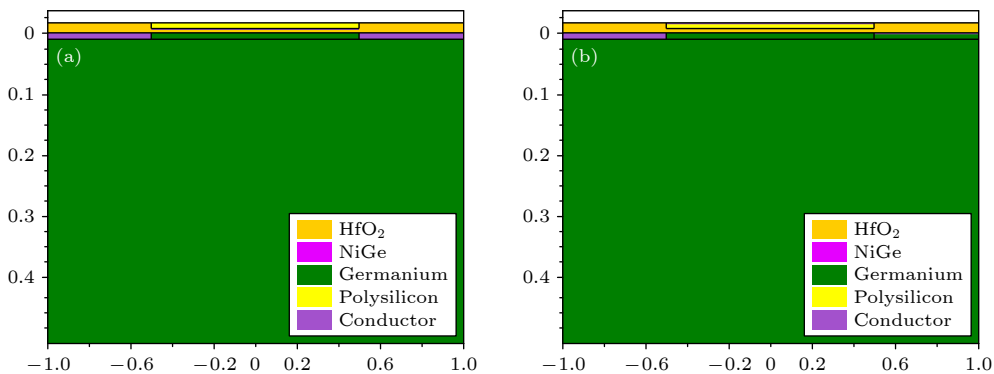


图 4 Ge SB-MOSFET (a) 和 Ge SBLS-MOSFET (b) 仿真结构图

Fig. 4. The simulation structure diagram of Ge SB-MOSFET (a) and SBLS-MOSFET (b).

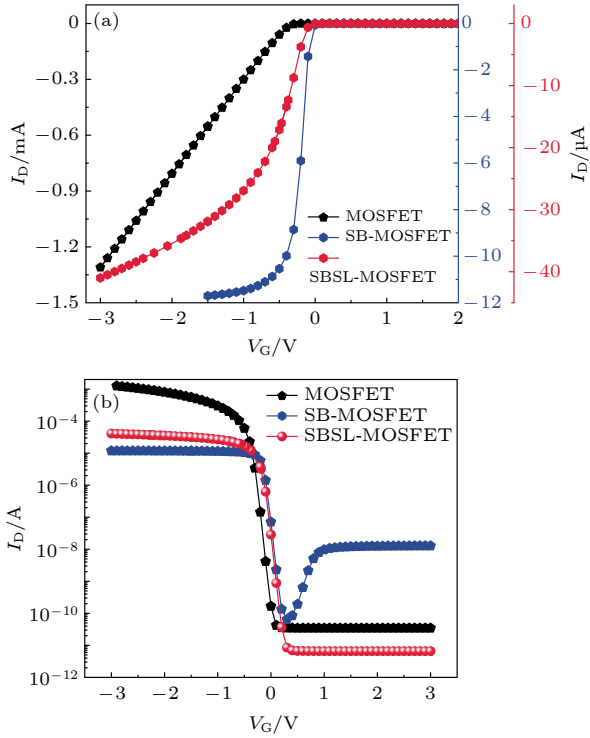


图 5 标准坐标系 (a) 和对数坐标系下 (b) 三种 MOSFET 的转移特性曲线图

Fig. 5. Transfer characteristic curves of three MOSFETs in the standard coordinate system (a) and the logarithmic coordinate system (b).

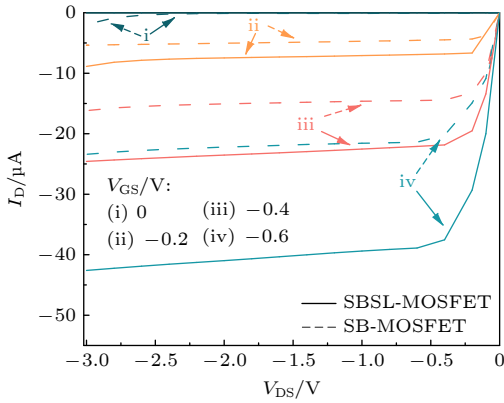


图 6 SB-MOSFET 和 SBSL-MOSFET 输出特性曲线图

Fig. 6. Output characteristic curves of SB-MOSFET and SBSL-MOSFET.

图 7 为传统 Ge-MOSFET 的输出特性曲线图。由于 SB-MOSFET 和 SBSL-MOSFET 阈值电压低, 在栅压 $V_g = -0.2$ V 已经开启, 有显著电流, 而阈值电压较高的传统 MOSFET 还没开启。相同栅压下, 由于源端载流子运输的隧道效应受隧穿概率的影响, SB-MOSFET 和 SBSL-MOSFET 的输出电流小于传统的 MOSFET, 这会影响器件的整流

效率, 因此后续研究采用新型连接方法增大输出电流, 从而弥补沟道隧穿电流小的缺点。

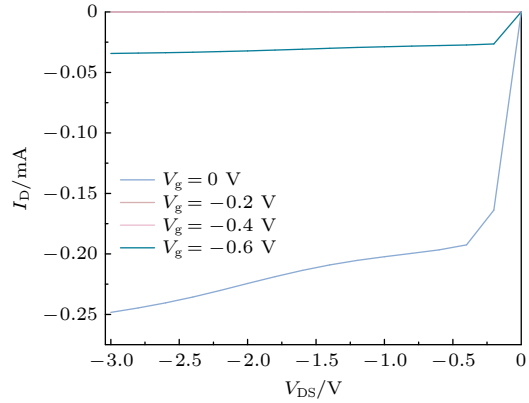


图 7 Ge-MOSFET 输出特性曲线图

Fig. 7. Output characteristic curve of Ge-MOSFET.

3 整流电路设计及仿真

3.1 新型器件连接方法

在 2.45 GHz 微波无线能量信号收集时, -10 dBm 弱能量密度的射频输入功率通常很低, 在 50Ω 阻抗下的等效输入振幅仅为 100 mV. 有鉴于此, 整流器件若想实现较宽范围的整流, 需要具备极低的开启电压, 否则接收到的弱能量密度的射频信号不足以使之开启, 限制器件整流应用范围. 本文设计的 SBSL-MOSFET 开启电压低, 相比传统 MOS 在弱能量密度下有更高的整流效率. 为了实现较宽范围的整流, 进一步提高器件的输出电流, 抑制反向泄漏电流, 本文采用栅、漏、衬底三端相连作为输入端, 源极作为输出端的新颖二极管连接方法, 以实现沟道和源衬肖特基结构的双通道整流。

图 8 为能实现整流功能的传统二极管连接方式的 SBSL-MOSFET 电流示意图. 栅极与漏极连接作为等效输入端, 源极和衬底相连作为等效输出端. 在正向偏置条件下, 器件开启, 漏衬 pn 结处于反偏状态, 载流子很难通过势垒从而形成电流, 因此只存在沟道导通的电流. 而在反向偏置条件下, 漏衬 pn 结导通, 器件产生大的反向电流, 器件无法完全关断, 影响整流效率的提升。

图 9 为 SBSL-MOSFET 的新型二极管连接方式 [18,19]. 新型连接方式下将栅极、漏极和衬底三端相连作为等效输入, 源极作为等效输出. 在正向偏置条件下低阈值的沟道一路先导通, 随后加正偏压的源衬 NiGe/n-Ge 肖特基结构达到开启电压导通,

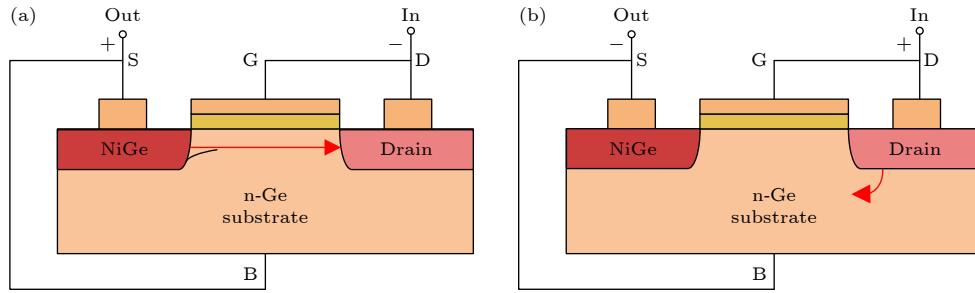


图 8 传统二极管连接方式 SBSL-MOSFET 电流示意图 (a) 正向电流; (b) 反向电流

Fig. 8. Conventional diode connection of SBSL-MOSFET current diagram: (a) Forward current; (b) reverse current.

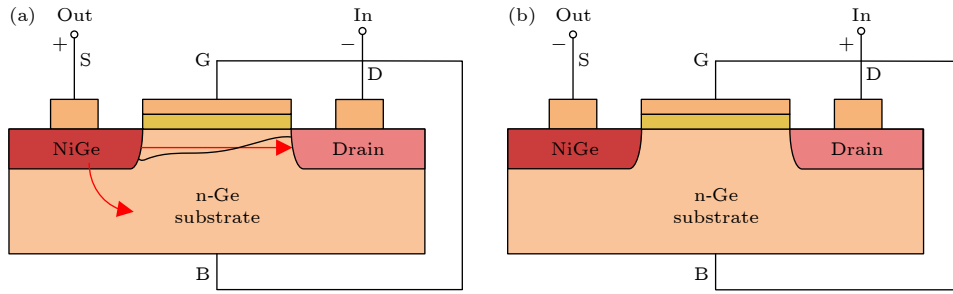


图 9 新型连接方式 SBSL-MOSFET 电流示意图 (a) 正向电流; (b) 反向电流

Fig. 9. Novel connection of SBSL-MOSFET current diagram: (a) Forward current; (b) reverse current.

肖特基结构的电流和沟道电流共同起作用, 能够提供大的正向导通电流. 而在反向偏置条件下漏衬 pn 结两端偏压相同, 有极低的反向泄漏电流. 因此, 与传统二极管连接方式相比, 新型连接方式的 SBSL-MOSFET 增大了总输出电流, 抑制了反向泄漏电流. 器件在正向偏置条件下开启, 反向偏置条件下关断, 实现了沟道和源衬肖特基结构的双通道整流, 在 2.45 GHz 微波无线能量信号的收集能力显著提升.

3.2 半波整流电路搭建

本文搭建了如图 10 所示半波整流电路来分析和仿真 SBSL-MOSFET 在 2.45 GHz 微波无线能量收集的整流性能. 器件采用 3.1 节所述两种连接方式, 可等效为二极管, 正向偏置半周期下器件导通, 反向偏置半周期下器件关断, 将交流电转化为脉动直流电. 电路中采用交流电压源, 信号频率 2.45 GHz, 电源内阻 R 为 50Ω . R_1 为负载电阻, C_1 为负载电容, 用来稳压和平滑输出信号 [20].

3.3 DC 仿真

图 11 为 Ge 基 SBSL-MOSFET 在两种连接方式下 DC 仿真的 $I-V$ 曲线图. 当器件在外加负压

时, 若采用新型连接方法, 从局部放大图可看出, 沟道在低阈值电压下优先开启 (电流为 I_D), 随后源衬肖特基结构正偏开启 (电流为 I_{sub}), 而器件在外加正压时两路关断, 实现了双通道整流, 利于整流范围的拓宽. 如图当偏压为 -1 V 时, 在源衬 NiGe/n-Ge 肖特基结构导通电流和沟道电流的共同作用下, 增大了总输出电流. 而传统连接方式下源衬肖特基结构不导通, 无法对输出电流做出贡献. 当外加正压 1 V 时, 传统连接方式泄漏电流 I_D 为新型连接方式的 59 倍, 可见采用新型连接方

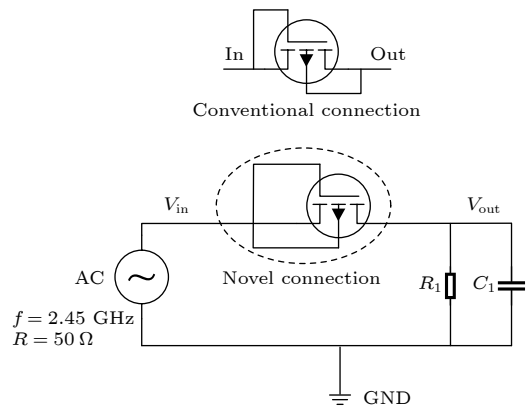


图 10 半波整流电路示意图

Fig. 10. The schematic diagram of half wave rectifier circuit.

式大幅度降低了泄漏电流, 利于器件即时关断, 提高了整流性能.

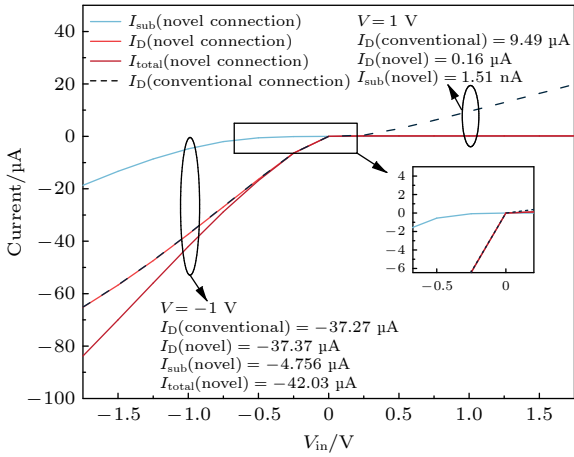


图 11 Ge 基 SBSL-MOSFET 在两种连接方式下的 I - V 曲线图

Fig. 11. I - V curve diagram under two connection methods of Ge based SBSL-MOSFET.

图 12 为 SB-MOSFET 和 SBSL-MOSFET 在新型连接方法下 DC 仿真的 I - V 曲线图. 如图外加偏压为 -1 V 时, 两种器件的源衬肖特基导通电流相差不多, 而 SBSL-MOSFET 沟道电流 I_D 相比 SB-MOSFET 有显著提升, 使得总输出电流增大了 12.17 μ A, 利于整流效率的提升.

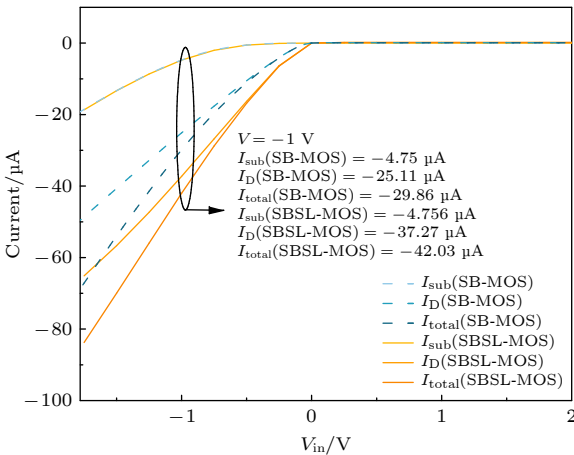


图 12 SB-MOSFET 和 SBSL-MOSFET 在新型连接方式下 I - V 曲线图

Fig. 12. I - V curve diagram under the new connection method of SB-MOSFET and SBSL-MOSFET.

3.4 瞬态仿真

对搭建的半波整流电路进行 MixedMode 瞬态仿真以分析器件的整流性能. 整流效率是衡量器件

整流性能的关键指标, 表示了微波无线能量传输系统将输入射频功率转换为直流输出能量的能力. 整流效率越高, 输出的可供负载利用的能量就越多, 其计算方法为:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{I_{out} \times V_{out}}{I_{in} \times V_{in}} \times 100\%. \quad (8)$$

计算一个周期的整流效率, 需将此周期的输出输入功率积分算出并相比:

$$\eta = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T I_{out} \times V_{out}}{\frac{1}{T} \int_0^T I_{in} \times V_{in}} \times 100\%. \quad (9)$$

图 13(a) 为电路瞬态仿真达到稳态时的波形图, 选取 23.57 — 25.2 ns 的稳定波形, 输入电源为 2.45 GHz 交流电压源, 内阻 50 Ω , 电压峰峰值为 2 V, 负载电阻 70 k Ω , 负载电容 0.3 pF. 从图 13(a) 中可看出输入的交流信号在经过 SBSL-MOSFET 整流电路后变为脉动直流信号, 器件有较好的整流功能. 图 13(b) 为单个周期输入输出电压局部放大图. 其中 ΔV 为输出脉动电压变化幅度, ΔV 越小说明输出直流信号越稳定. 图 13(c) 为由电压电流计算绘制的瞬态输入输出功率图, 将一个周期内输出和输入功率相比即可计算出整流效率. 图 13(d) 为整流效率和负载电压随阻抗变化图. 使用上述交流电压源和负载电容电阻计算出整流效率为 45.64% , 综合考虑整流效率和负载电压, 70 k Ω 负载电阻和 0.3 pF 负载电容搭配为整流电路最佳负载搭配.

图 14 为 SB-MOSFET 和 SBSL-MOSFET 整流效率曲线图. 两种器件在 -20 dBm 沟道开启整流, 在 5.56 dBm 源衬肖特基结构一路导通, 双路协同整流, 从而拓宽了整流范围. 改进后的 SBSL-MOSFET 输出电流增大, 泄漏电流减小, 整流效率相比 SB-MOSFET 整体显著提高. 在 -10 dBm 弱能量密度区域整流效率提升 3.74% , 在 16 dBm 整流效率峰值达到 57.27% , 提升了 6.62% .

图 15 为 SB-MOSFET, SBSL-MOSFET, Ge-MOSFET, QS-MOSFET 四种 MOSFET 的整流效率曲线图, 图中标出了几种器件的整流范围, 其中 QS-MOSFET 为文献报道的弱能量密度用整流器件^[20]. SBSL-MOSFET 的优势在于低阈值电压优先开启的沟道一路可以和 QS-MOSFET 一样在弱能量密度 (-10 dBm) 整流, 整流效率达到了 6.17% ,

是传统 Ge-MOSFET 整流效率的 7 倍多, 而此时传统 Ge-MOSFET 整流效率过低, 无法很好整流. 随后开启的源衬肖特基一路使得 SBSL-MOSFET 整流效率不至于像 QS-MOSFET 在不到 15 dBm

就降低至近 0, 拓宽了器件的整流范围, 实现了 -20—24 dBm 宽范围整流, 范围相比同条件 Ge-MOSFET 拓宽 8 dBm, 比 QS-MOSFET 拓宽约 10.5 dBm, 且整体整流效率保持较高水平.

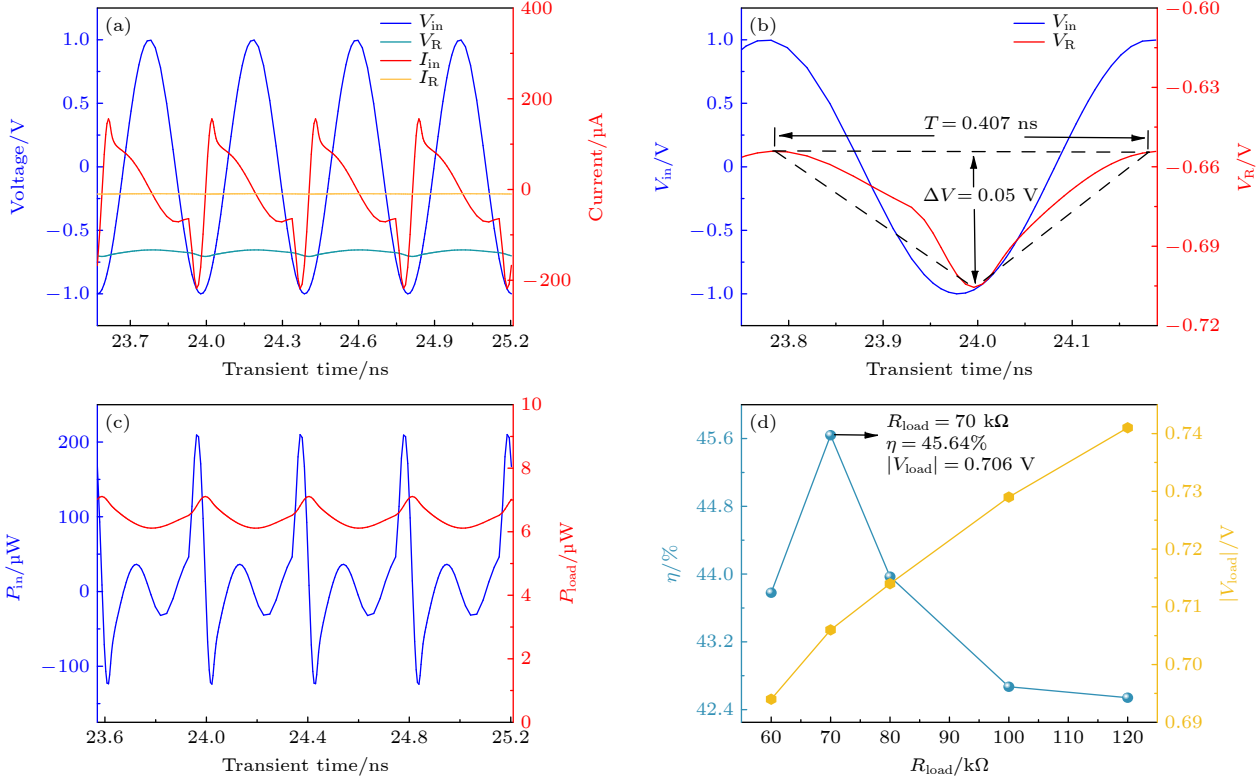


图 13 (a) 瞬态仿真输入输出电流电压波形图; (b) 瞬态仿真输入输出电压单周期局部放大图; (c) 瞬态仿真输入输出功率图; (d) 整流效率和负载电压随负载阻抗变化图

Fig. 13. (a) Transient simulation input and output current and voltage waveforms; (b) transient simulation input and output voltage single-cycle partial enlarged diagram; (c) transient simulation input and output power diagrams; (d) rectification efficiency and load voltage with load impedance change graph.

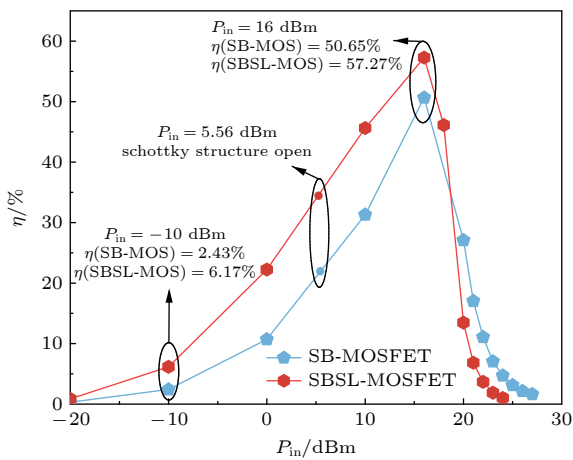


图 14 SB-MOSFET 和 SBSL-MOSFET 整流效率曲线图

Fig. 14. Rectifying efficiency graph of SB-MOSFET and SBSL-MOSFET.

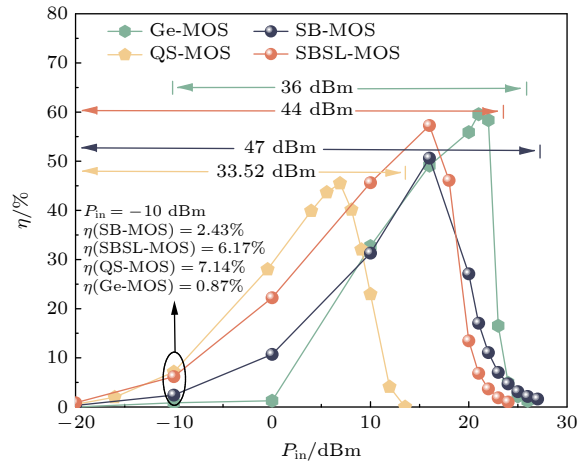


图 15 四种 MOSFET 整流效率曲线图

Fig. 15. Rectifying efficiency graphs of four kinds of MOSFET.

4 结 论

本文提出并设计 Ge 基 p 型用于 2.45 GHz 微波无限能量传输的 SBSL-MOSFET. 仿真结果表明: 相比传统的 SB-MOSFET, SBSL-MOSFET 提高了输出电流, 减小了泄漏电流, 提升了整流性能. 为了拓宽器件的整流范围, 采用了新型连接方式, 实现了沟道一路先开启和源衬肖特基结构一路后开启的双通道整流. 从直流和瞬态模拟方面分析了 SBSL-MOSFET 相对于传统 SB-MOSFET 的优势, 实现了 $-20\sim 24$ dBm 宽范围整流, 在 16 dBm 整流效率峰值达到 57.27%, 整流效率相对于 SB-MOSFET 整体提升, 且在 -10 dBm 弱能量密度整流效率达到 6.17%, 是同等条件下 SB-MOSFET 的 2.5 倍, Ge-MOSFET 的 7 倍多, 充分说明了该器件的优势.

参考文献

- [1] Ullah M A, Keshavarz R, Abolhasan M, Lipman J, Esselle K P, Shariati N 2022 *IEEE Access* **10** 17231
- [2] Haerinia M, Shadid R 2020 *Signals* **1** 209
- [3] Divakaran S K, Krishna D D 2019 *INT. J. RF. Microw. C. E* **29** e21633
- [4] Zhang Z, Pang H, Georgiadis A, Cecati C 2019 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **66** 1044
- [5] Eteng A A, Goh H H, Rahim S K A, Alomainy A 2021 *IEEE Access* **9** 27518
- [6] Zhu G L, Du J X, Yang X X, Zhou Y G, Gao S 2019 *IEEE Access* **7** 141978
- [7] Xiao H, Zhang H, Song W, Wang J, Chen W, Lu M 2021 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **69** 2896
- [8] Song J J, Zhang L Q, Chen L, Zhou L, Sun L, Lan J F, Xi C H, Li J H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 108401 (in Chinese) [宋建军, 张龙强, 陈雷, 周亮, 孙雷, 兰军峰, 刁楚浩, 李家豪 2021 物理学报 **70** 108401]
- [9] Li Y C, Chen H Y, Song J J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 108401 (in Chinese) [李好晨, 陈航宇, 宋建军 2020 物理学报 **69** 108401]
- [10] Chong G, Ramiah H, Yin J, Rajendran J, Mak P I, Martins R P 2019 *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs* **68** 1743
- [11] Choi W, Lee J, Shin M 2014 *IEEE Trans. Electron Devices* **61** 37
- [12] Kim S, Lee K, Lee J H, Park B G, Kwon D 2021 *IEEE Trans. Electron Devices* **68** 4754
- [13] Yao Y, Sun Y, Li X, Shi Y, Liu Z 2020 *IEEE Trans. Electron Devices* **67** 751
- [14] Chen C W, Tzeng J Y, Chuang C T, Chien H P, Chien C H, Luo G L 2014 *IEEE Trans. Electron Devices* **61** 2656
- [15] Zhang M T 2014 *M. S. Thesis* (Xiamen: Xiamen University) (in Chinese) [张茂添 2014 硕士学位论文 (厦门: 厦门大学)]
- [16] Sze S M, Kwok K N (translated by Geng L, Zhang R Z) 2007 *Physics of Semiconductor Devices* (Xi'an: Xi'an jiaotong University Press) pp130–142 (in Chinese) [施敏, 伍国珏 (耿莉, 张瑞智译) 2007 半导体器件物理 (北京: 西安交通大学出版社) 第 130–142页]
- [17] Tang X Y 2007 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [汤晓燕 2007 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [18] Shokrani M R, Hamidon M N, Khoddam M, Najafi V 2012 *IEEE International Conference on Electronics Design* Kuala Lumpur, Malaysia, November 5–6, 2012 p234
- [19] Shokrani M R, Khoddam M, Hamidon M N B, Kamsani N A, Rokhani F Z, Shafie S B 2014 *Sci. World J.* **2014** 1
- [20] Zhang D, Song J J, Xue X H, Zhang S Q 2022 *Chin. Phys. B* **31** 068401

A Ge-based dual channel rectified single ended Schottky barrier field effect transistor for 2.45 GHz microwave wireless energy transmission*

Bi Si-Han^{1)†} Song Jian-Jun¹⁾²⁾ Zhang Dong¹⁾ Zhang Shi-Qi¹⁾

1) (*Key Laboratory of Wide Bandgap Semiconductors, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Radiation-resistant Integrated Circuit Technology Laboratory, China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710071, China*)

(Received 29 April 2022; revised manuscript received 29 June 2022)

Abstract

Rectifier component is a core part of a microwave wireless energy transmission system, and the development of new rectifier components is an important research direction in this field. Schottky diodes and field-effect transistors are currently the mainstream rectifier devices, but they have a limited rectification range and cannot achieve a wide-range rectification of both weak energy and medium energy density at the same time. In view of this, in this work proposed and designed is a Ge based p-type single-ended Schottky barrier field effect transistor (Schottky contact at the source and standard p⁺ doping at the drain) for 2.45 GHz microwave wireless energy transmission. Based on this, the Schottky structure of the device is fully utilised and a new diode connection is used in order to realize a dual channel wide range rectification of the trench and source lined Schottky structure opened at different bias voltages. Simulations are carried out by using the Silvaco TCAD software. For a half-wave rectifier circuit with a load of 0.3 pF and 70 kΩ, a wide range from -20 to 24 dBm rectification is achieved, which is 8 dBm wider than the range of Ge field-effect transistors under the same conditions, and the overall rectification efficiency is higher in the range, with a peak rectification efficiency of 57.27% at 16 dBm. The rectification efficiency at -10 dBm weak energy density reaches 6.17%, which is more than 7 times that of Ge FETs under the same conditions.

Keywords: wireless energy transmission, Schottky barrier field effect transistor, Schottky contact, rectifying efficiency

PACS: 84.40.Dc, 84.60.Bk, 73.43.Jn, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.71.20220855

* Project supported by the 111 Project (Grant No. B12026) and the Technology of Intelligent Reconfigurable General System, China (Grant No. F020250058).

† Corresponding author. E-mail: shbi@stu.xidian.edu.cn



2.45 GHz微波无线能量传输用Ge基双通道整流单端肖特基势垒场效应晶体管

毕思涵 宋建军 张栋 张士琦

A Ge-based dual channel rectified single ended Schottky barrier field effect transistor for 2.45GHz microwave wireless energy transmission

Bi Si-Han Song Jian-Jun Zhang Dong Zhang Shi-Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 208401 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220855

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220855>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于晶向优化和Sn合金化技术的一种2.45 G弱能量微波无线传输用Ge基肖特基二极管

A Ge-based Schottky diode for 2.45 G weak energy microwave wireless energy transmission based on crystal orientation optimization and Sn alloying technology

物理学报. 2021, 70(10): 108401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201674>

用于提高微波无线能量传输系统接收端能量转换效率的肖特基二极管

Ge Schottky diode for improving energy conversion efficiency of the receiver of microwave wireless power transfer

物理学报. 2020, 69(10): 108401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191415>

HfO₂基铁电场效应晶体管读写电路的单粒子翻转效应模拟

Single-event-upset effect simulation of HfO₂-based ferroelectric field effect transistor read and write circuits

物理学报. 2020, 69(9): 098502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200123>

铁电负电容场效应晶体管研究进展

Recent research progress of ferroelectric negative capacitance field effect transistors

物理学报. 2020, 69(13): 137701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200354>

纳米线环栅隧穿场效应晶体管的电容模型

Capacitance model for nanowire gate-all-around tunneling field-effect-transistors

物理学报. 2021, 70(21): 218501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211128>

基于二维材料二硒化锡场效应晶体管的光电探测器

Field effect transistor photodetector based on two dimensional SnSe₂

物理学报. 2020, 69(13): 137801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191960>