

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

宋建军 张龙强 陈雷 周亮 孙雷 兰军峰 习楚浩 李家豪

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

Song Jian-Jun Zhang Long-Qiang Chen Lei Zhou Liang Sun Lei Lan Jun-Feng Xi Chu-Hao Li Jia-Hao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 108401 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201674

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201674>

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

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>

基于机械剥离 β -Ga₂O₃ 的Ni/Au垂直结构肖特基器件的温度特性

Temperature dependent characteristics of Ni/Au vertical Schottky diode based on mechanically exfoliated beta-Ga₂O₃ single crystal

物理学报. 2020, 69(13): 138501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200424>

Ni/Au/n-GaN肖特基二极管可导位错的电学模型

Physical model of conductive dislocations in GaN Schottky diodes

物理学报. 2018, 67(17): 177202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180762>

基于N型纳米晶硅氧电子注入层的钙钛矿发光二极管

Perovskite light-emitting diodes based on n-type nanocrystalline silicon oxide electron injection layer

物理学报. 2019, 68(12): 128103 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190258>

基于离子注入隔离的微缩化发光二极管阵列性能

Ion implantation isolation based micro-light-emitting diode device array properties

物理学报. 2020, 69(2): 027802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191418>

基于两步退火法提升Al/n⁺Ge欧姆接触及Ge n⁺/p结二极管性能

Improved performance of Al/n⁺Ge Ohmic contact and Ge n⁺/p diode by two-step annealing method

物理学报. 2019, 68(17): 178501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190699>

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

宋建军^{1)3)†} 张龙强¹⁾ 陈雷²⁾ 周亮²⁾ 孙雷²⁾

兰军峰²⁾ 习楚浩¹⁾ 李家豪³⁾

1) (核电安全监控技术与装备国家重点实验室, 深圳 518172)

2) (北京微电子技术研究所, 北京 100076)

3) (西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

(2020 年 10 月 10 日收到; 2021 年 2 月 3 日收到修改稿)

肖特基二极管是 2.45 G 弱能量密度无线能量收集系统的核心器件, 其性能决定了系统整流效率的上限. 从材料设计角度出发, 利用晶向优化技术和 Sn 合金化技术, 提出并设计了一种大有效质量、大亲和能和高电子迁移率的 Ge 基复合半导体. 在此基础上, 进一步利用器件仿真工具, 设定合理的器件材料物理参数与几何结构参数, 实现了一种 2.45 G 弱能量微波无线输能用 Ge 基肖特基二极管. 基于该器件 SPICE 模型的 ADS 整流电路仿真表明: 与传统 Ge 肖特基二极管相比, 该新型 Ge 基肖特基二极管在输入能量为 $-10 \sim -20$ dBm 的弱能量工作区域, 能量转换效率提升约 10%. 本文技术方案及相关结论, 可为解决 2.45 G 弱能量密度无线能量收集系统整流效率低的问题提供有益的参考.

关键词: 弱能量无线传输, 肖特基二极管, 锗锡, 晶向, 整流效率

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

DOI: 10.7498/aps.70.20201674

1 引言

随着无线通信技术的发展, 大量无线设备 (如智能手机, 家用 Wi-Fi, 通信基站, 广播电塔等) 的出现给我们的生活带来了极大的便利, 这些设备不间断地发射无线电波, 它们之间通过无线电进行信息传递, 除此以外, 其余大部分能量都在环境中衰减浪费掉了. 根据我国环境射频能量分布评估, 2.45 G 射频信号为环境中的主要射频 (radio frequency, RF) 信号源, 但测得的环境射频功率密度较低^[1,2]. 如果能将这部分能量利用起来, 并实现非接触无线供电, 将突破传输线的限制, 为大量低功耗

设备在无需电池供电的情况下也可运行提供一种很好的解决方案, 极具应用潜力.

微波无线能量收集系统 (图 1(a)) 可通过微波接收天线捕获环境中的射频信号, 系统中的整流电路利用核心元件肖特基二极管 (Schottky barrier diode, SBD) 对射频信号能量整流, 并将直流能量供应给接收负载, 是实现上述应用的理想系统. 然而, 在 2.45 G 弱能量密度 RF 信号输入条件下, 基于 SBD 的微波射频无线能量收集系统整流效率偏低, 尚无法真正实现商业应用^[3-5]. 目前, 工程师们主要开展基于 Ge 半导体肖特基二极管整流电路的优化研发工作, 通过外围电路被动开启优化, 以提升 2.45 G 弱能量密度无线能量收集系统整流效

* 高等学校学科创新引智计划 (批准号: B12026) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jianjun_79_81@xidian.edu.cn

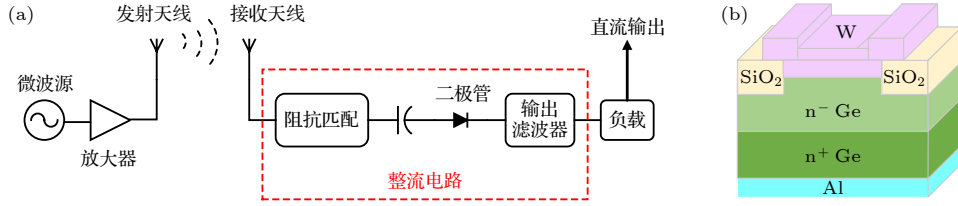


图 1 (a) 微波无线能量传输系统; (b) 典型肖特基二极管示意图

Fig. 1. (a) Microwave wireless energy transmission system; (b) schematic diagram of a typical Schottky diode.

率, 但收效甚微 [6–8].

SBD 作为 2.45 G 弱能量密度 Wi-Fi 波段无线能量收集系统整流电路的核心器件 (图 1(b)), 其性能决定了系统整流效率的上限. 因此, 欲进一步提升目前 2.45 G 弱能量密度 Wi-Fi 波段无线能量收集系统整流效率, 对该核心元器件-肖特基二极管予以设计优化势在必行 [9–11]. 有鉴于此, 我们拟提出一种 2.45 G 弱能量密度无线能量收集用 Ge 基肖特基二极管, 旨在解决 2.45 G 弱能量密度无线能量收集系统整流效率低的问题.

2 新型 SBD 层结构材料设计

对于 2.45 G 弱能量密度 Wi-Fi 波段无线能量, 传统 SBD 无法正常开启工作. 因此, 优化设计 2.45 G 弱能量密度收集应用 SBD 必须考虑如何降低器件开启电压.

基于器件物理相关原理, 首先推导建立了 SBD 开启电压模型. 依据文献, SBD 从半导体到金属的电子流所形成的电流密度是

$$\begin{aligned}
 J_{s \rightarrow m} &= qn_0 \left(\frac{m_n^*}{2\pi k_0 T} \right)^{3/2} \int_{-\infty}^{\infty} dv_y \int_{-\infty}^{\infty} dv_z \int_{-\infty}^{\infty} v_x \\
 &\quad \times \exp \left[-\frac{m_n^* (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2k_0 T} \right] dv_x \\
 &= qn_0 \left(\frac{m_n^*}{2\pi k_0 T} \right)^{3/2} \iint_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{m_n^* (v_y^2 + v_z^2)}{2k_0 T} \right] \\
 &\quad \times dv_y dv_z \int_{v_{x0}}^{\infty} v_x \exp \left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2k_0 T} \right) dv_x \\
 &= qn_0 \left(\frac{k_0 T}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{m_n^* v_{x0}^2}{2k_0 T} \right) \\
 &= \frac{qm_n^* k_0^2}{2\pi^2 \hbar^3} T^2 \exp \left(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T} \right) \exp \left(\frac{qV_{bi} + qV}{k_0 T} \right), \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中, m_n^* 为电子电导率有效质量, 其他各物理量

详见文献 [12].

根据 SBD 器件金半接触的能带关系 [13], 上式可进一步简化为

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp \left(-\frac{q\phi_{ns}}{k_0 T} \right) \exp \left(\frac{qv}{k_0 T} \right), \quad (2)$$

式中, $A^* = \frac{qm_n^* k_0^2}{2\pi^2 \hbar^3}$ 称为有效理查逊常数; ϕ_{ns} 为金属一侧的势垒高度.

金属一侧的势垒高度不随外加电压变化, 从金属到半导体的电子流所形成的电流密度 $J_{m \rightarrow s}$ 是一个常数, 它与不加外加电压时的 $J_{s \rightarrow m}$ 大小相等, 方向相反, 则在热电子发射理论下, SBD 的总电流密度为

$$\begin{aligned}
 J_{\text{total}} &= J_{s \rightarrow m} + J_{m \rightarrow s} \\
 &= A^* T^2 \exp \left(-\frac{q\phi_{ns}}{k_0 T} \right) \left[\exp \left(\frac{qv}{k_0 T} \right) - 1 \right] \\
 &= J_s \left[\exp \left(\frac{qV}{k_0 T} \right) - 1 \right], \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中,

$$J_s = \frac{qm_n^* k_0^2}{2\pi^2 \hbar^3} T^2 \exp \left(-\frac{q\phi_{ns}}{k_0 T} \right), \quad (4)$$

称为 SBD 的反向饱和电流. 若考虑镜像力和隧道效应对势垒高度的影响, 则

$$\begin{aligned}
 J_s &= \frac{qm_n^* k_0^2}{2\pi^2 \hbar^3} T^2 \exp \left(-\frac{q\phi_{ns}}{k_0 T} \right) \\
 &\quad \times \exp \left\{ \frac{1}{k_0 T} \frac{1}{4} \left[\frac{2q^7 N_d}{\pi^2 \epsilon^3} (-V_{bi} - V) \right]^{1/4} \right\}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

考虑到后续 Silvaco 器件性能模拟软件中仿真所得伏安特性曲线中的电流为线电流密度, 还需要将 (5) 式除以所设计器件长度 L , 即 $J_s = J_l/L$, 进一步将其转换为线电流密度 J_l 的表达式, 并最终给出器件开启电压与线电流密度的关系为

$$V_{\text{on}} = \frac{k_0 T \ln \left(1 + \frac{1}{J_s} \right)}{q} = \frac{k_0 T \ln \left(1 + \frac{1}{j_l/L} \right)}{q}, \quad (6)$$

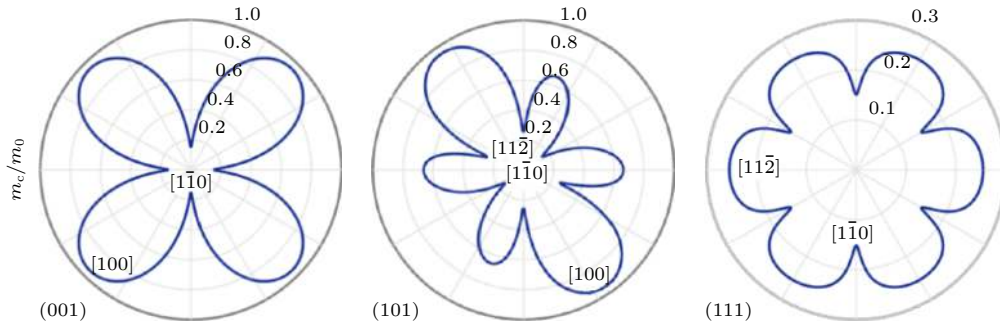
图2 (001), (101), (111) 剖面任意晶向电子电导率有效质量 (极坐标系下)^[14]

Fig. 2. (001), (101), (111) cross-section arbitrary crystal orientation electron conductivity effective mass (in polar coordinate system)^[14].

其中所设计器件的长度 L 为 $1\ \mu\text{m}$, 其方向沿下面二维图 6 中的视觉不可见坐标方向; 所设计器件宽度为 $14\ \mu\text{m}$, 其方向对应图 6 中的横向。

综合以上模型, 可以发现, SBD 开启电压与器件反向饱和电流密切相关. 同等条件下, 反向饱和电流越大, SBD 开启电压越低. 反向饱和电流不仅仅与金半接触区域半导体电子有效质量、金属功函数有关, 还与半导体掺杂浓度和半导体的亲和能有关. 对于 Ge SBD, 目前要想增大其反向饱和电流达到显著降低开启电压的目的, 只有通过材料设计想办法增大器件层结构材料中金半接触区域半导体电子有效质量与亲和能这条途径, 其他的方法已无法进一步实现优化。

2.1 大有效质量高迁移率设计

一方面, 我们希望增大 SBD 层结构材料中金半接触区域半导体电子有效质量, 以达到降低 SBD 开启电压的目的. 然而, 电子有效质量的增加会显著降低半导体的电子迁移率, 进而导致 SBD 串联电阻增大, 整流效率降低. 即增大半导体电子有效质量有利于 SBD 在弱能量密度信号情况下开启工作, 但低整流效率下 SBD 仍然无法实用。

我们知道, Ge 半导体电子有效质量具有各向异性, 沿不同的晶向电子电导率有效质量数值不同. 利用 kp 微扰理论, 图 2 建立了极坐标系下 (001), (101), (111) 剖面任意晶向 Ge 电子电导率有效质量模型 (建模过程详见我们发表的文献 [14]). 由图 2 可见, 沿各晶面典型高对称晶向, [100] 晶向 Ge 电子电导率有效质量 $0.95m_0$, 数值最大. 其他依次为, [111] 晶向 $0.64m_0$, [112] 晶向 $0.254m_0$, [110] 晶向最小, 约为 $0.151m_0$.

据此, 我们提出, 一方面优化选用 <100> 晶向

Ge 半导体与金属形成金半接触, 增大金半接触区域半导体电子有效质量, 以降低 SBD 开启电压, 满足弱能量密度情况下 SBD 开启需要; 另一方面, 在 SBD n-半导体除金半接触区外的主体区域, 通过 10% 左右 Sn 合金化电子迁移率各向异性消除技术, 使 Ge 电子布居等能面各向异性 L 能谷转变为各向同性 Γ 能谷 (见图 3), 同时由于 Γ 能谷电子电导率有效质量为 L 能谷的四分之一左右, 这样, 合金化后的 Ge 半导体材料电子迁移率 (与电子电导率有效质量成反比) 与纯 Ge 半导体材料 <110> 晶向最高电子迁移率相比至少可提升二倍^[15–17], 不仅解决了选用 <100> 晶向高电子电导率有效质量致半导体电子迁移率下降的问题, 还有效地降低了 SBD 的串联电阻, 提升了器件的整流效率^[18].

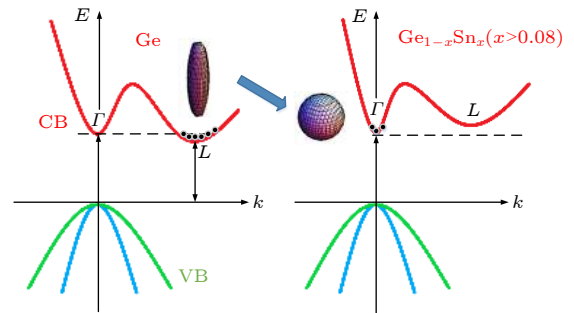
图3 Sn 合金化致 Ge 带隙类型转变示意图^[19]

Fig. 3. Schematic diagram of Ge band gap type transition caused by Sn alloying^[19].

2.2 亲和能设计

进一步讨论 Ge 半导体电子亲和能各向异性问题, 第一性原理仿真结果如图 4 所示 (详见我们的工作^[20]). 结果表明, [100] 晶向 Ge 功函数为 $4.604\ \text{eV}$, [110] 晶向为 $4.495\ \text{eV}$, [111] 晶向为 $4.55\ \text{eV}$.

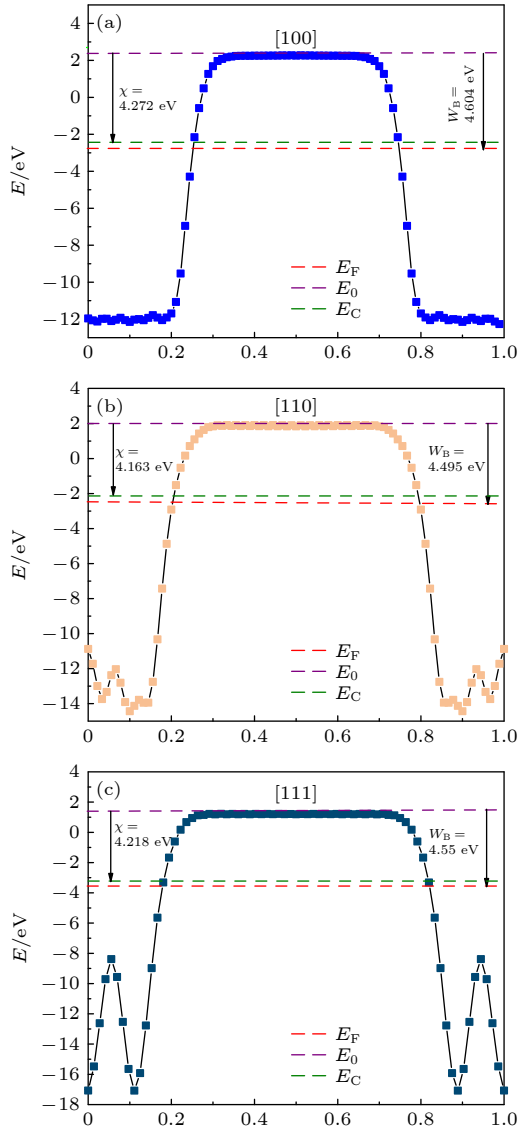
图4 (100), (110), (111) 晶面 Ge 半导体功函数^[18,19]

Fig. 4. (100), (110), (111) crystal plane Ge semiconductor work function^[18,19].

利用半导体亲和能与功函数之间的关系^[20], 可进一步解得, [100] 晶向 Ge 亲和能为 4.272 eV, [110] 晶向为 4.163 eV, [111] 晶向为 4.218 eV. 与 (110) 高电子迁移率晶面相比, 选用 (100) 晶面 Ge 作 SBD 的金半接触面, 可增大半导体亲和能, 有利于进一步降低 SBD 开启电压, 这与前述为增大电子电导率有效质量而选用 (100) 晶面方案不产生矛盾.

3 新型 SBD 器件设计与结果分析

在上节材料设计的基础上, 提出一种新型的 SBD 器件, 其材料物理参数与几何结构参数如图 5(a) 所示, 图 5(b) 为对比器件, 即传统 Ge SBD 器件剖面示意图.

肖特基结采用金属 W, 欧姆结采用金属 Al, 且阴极设置于在 n^+ DR-GeSn 层, 能够避免 n^+ DR-GeSn 与 Si 衬底之间界面差致器件性能退化的问题; 轻掺杂 n^- 区域, 包括 (100) Ge 帽层, 掺杂浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; 重掺杂 n^+ 区域掺杂浓度为 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. 此外, 为降低器件工艺成本, 该器件拟在 Si 衬底上制备实现. 为此, 采用两步法 (低温 LT+ 高温 HT) 工艺, 先制备高质量 Ge 缓冲层. 然后, 利用减压化学气相沉积 (reduced pressure chemical vapour deposition, RPCVD) 制备出 DR-GeSn 外延层.

图 6 为 Silvaco 软件器件仿真结构和网格设置图, 这里要补充说明两点: 1) 考虑器件软件仿真收敛效率, 仿真结构中去掉了 Si 衬底和 Ge 缓冲层,

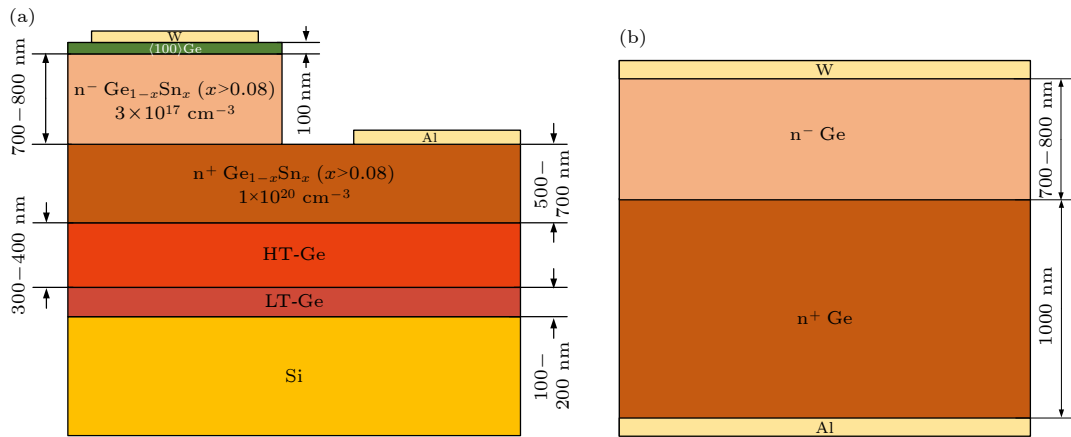


图5 (a) 新型 SBD 器件剖面示意图含层结构材料物理参数和几何结构参数; (b) 传统 SBD

Fig. 5. (a) The cross-sectional schematic diagram of the new SBD device contains the physical parameters and geometric structure parameters of the layered structure material; (b) the traditional SBD.

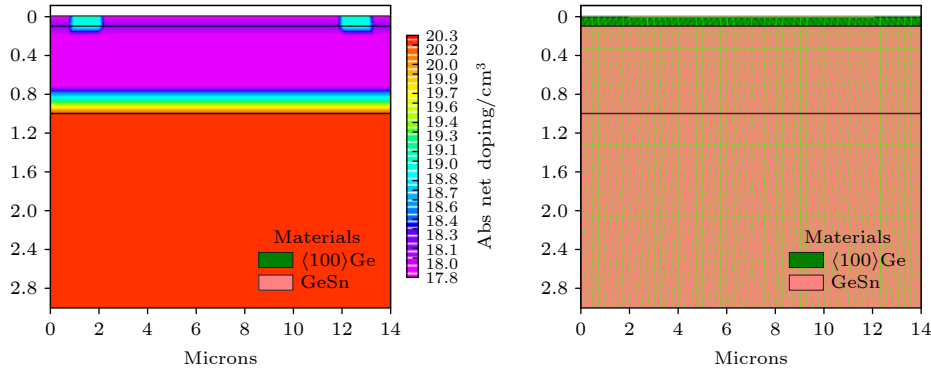


图 6 新型 SBD 器件 Silvaco 仿真结构和网格设置截图

Fig. 6. A screenshot of the Silvaco simulation structure and grid settings of the new SBD device.

但不会影响仿真结果; 2) 网格设置过程中, Ge 帽层与 n^- GeSn 层之间、 n^- GeSn 层与 n^+ GeSn 层之间网格相对于其他区域更加密集, 以保证仿真结果收敛。

从有效质量和亲和能两个材料物理指标设计出发, 提出引入 $\langle 100 \rangle$ 晶向 Ge 半导体与金属 W 形成 SBD 肖特基接触, 可以有效地降低 SBD 开启电压。但在具体的器件设计过程中, $\langle 100 \rangle$ 晶向 Ge 半导体帽层需要多厚需要利用 Silvaco 工具予以仿真确定。图 7 为不同厚度 $\langle 100 \rangle$ 晶向 Ge 半导体帽层新型 SBD 器件正向伏安特性曲线, 由图 7 可见, 以 1 mA 电流对应为器件开启电压, 当 Ge 帽层的厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 器件的开启电压最小, 比其他帽层厚度器件的开启电压降低约 0.1 V。因此, 依据优化结果, 所设计新型 SBD 器件 $\langle 100 \rangle$ 晶向 Ge 帽层厚度确定为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

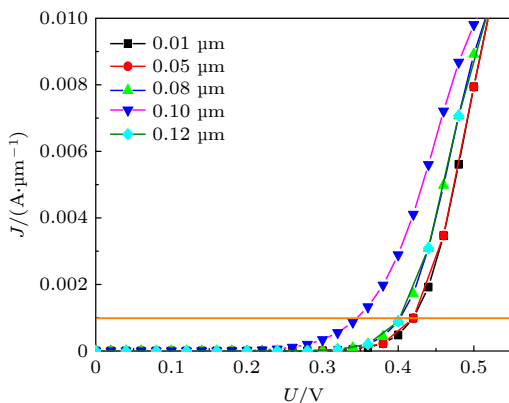
图 7 不同厚度 $\langle 100 \rangle$ 晶向 Ge 帽层新型 SBD 器件正向伏安特性曲线

Fig. 7. Forward V - J characteristic curve of new SBD device with different thickness $\langle 100 \rangle$ crystal orientation Ge cap layer.

图 8(a) 和图 8(b) 中 Ge, GeSn 和 Ge_on_GeSn 三条曲线分别对应传统 Ge SBD, GeSn SBD 以及带 Ge 帽层新型 GeSn SBD 的伏安特性、电容特性器件仿真结果, 由图 8(a) 可见, 相对于传统 Ge 基 SBD 器件, 带 Ge 帽层新型 GeSn SBD 开启电压明显降低。同时, 器件仍然保持了优异的整流非线性特性。

如前所述, 带 Ge 帽层新型 GeSn SBD 低开启电压、非线性优异主要源于大有效质量、大亲和能、高迁移率的复合材料设计, 符合前期设计预想。电容特性方面, 由图 8(b) 可见, 相对于传统 Ge 基 SBD 器件, 带 Ge 帽层新型 GeSn SBD 电容有一定程度降低, 这有利于后续对 2.45 GHz 弱能量密度 RF 信号整流效率的提升 [21,22]。依据器件物理相关知识, SBD 电容与材料亲和能等物理参数相关, 其下降的原因也主要是因为新型复合材料的引入所致。

图 9 为带 Ge 帽层新型 GeSn SBD 的器件击穿特性仿真结果, 由图可见, 当所施加电压达到约 11.4 V 时, 器件会发生反向击穿, 反向饱和电流的增大导致器件更容易被击穿, 但是击穿电压的变化在后续仿真中对弱能量密度区域的整流效率影响并不大。

将所设计的带 Ge 帽层新型 GeSn SBD、传统 Ge SBD 以及 GeSn SBD 正向伏安特性曲线、反向伏安特性曲线以及在 2.45 GHz 频率下的电容特性曲线带入 Cadence Model Editor 软件中, 提取器件的 SPICE 参数如表 1 所列。

将所设计的肖特基二极管 SPICE 参数带入 ADS 仿真软件中, 采用图 10 所示仿真电路, 使用阻抗自匹配模型, 对整流电路进行优化。

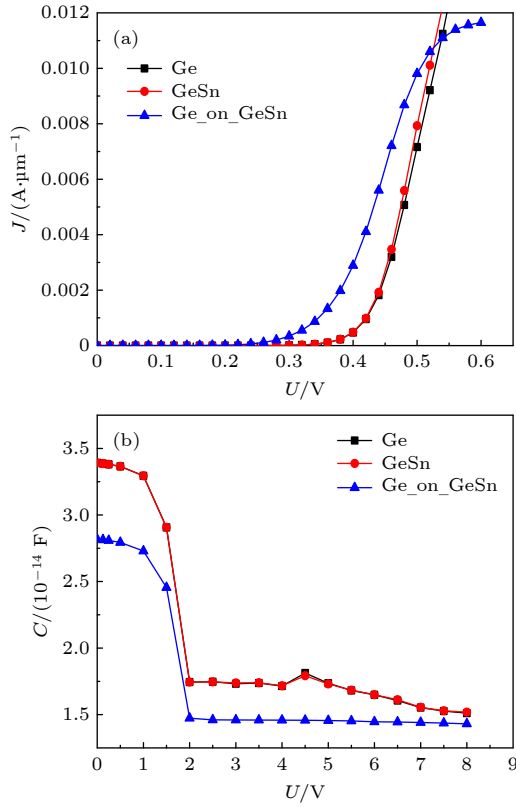


图 8 三种 Ge 基 SBD 器件伏安特性、电容特性仿真结果
Fig. 8. volt-ampere characteristic Capacitance-voltage characteristic simulation results of three Ge-based SBD devices.

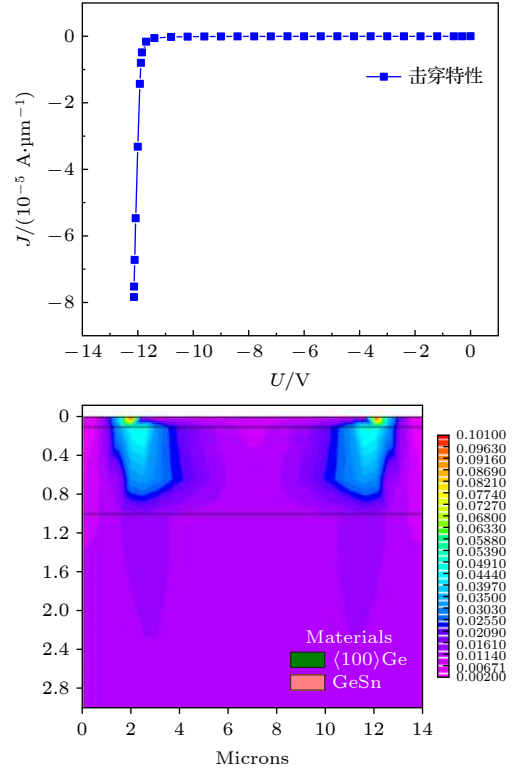


图 9 新型 Ge 基 SBD 器件击穿特性仿真结果
Fig. 9. Simulation results of the breakdown characteristics of the new Ge-based SBD device.

表 1 三种 Ge 基 SBD 器件 SPICE 参数表

Table 1. SPICE parameter table of three Ge-based SBD devices.

| 参数 | B_v/V | C_{j0}/fF | E_G/eV | I_S/A | N | R_S/Ω | M |
|------------|---------|-------------|----------|--------------------------|-------|--------------|--------|
| Ge | 18.9 | 36 | 0.69 | 9.6235×10^{-11} | 0.999 | 2.9 | 0.5072 |
| GeSn | 19 | 36.2 | 0.69 | 9.628×10^{-11} | 0.999 | 2.8 | 0.5073 |
| Ge_on_GeSn | 11.4 | 30 | 0.69 | 1.0437×10^{-8} | 1.106 | 11.6 | 0.4037 |

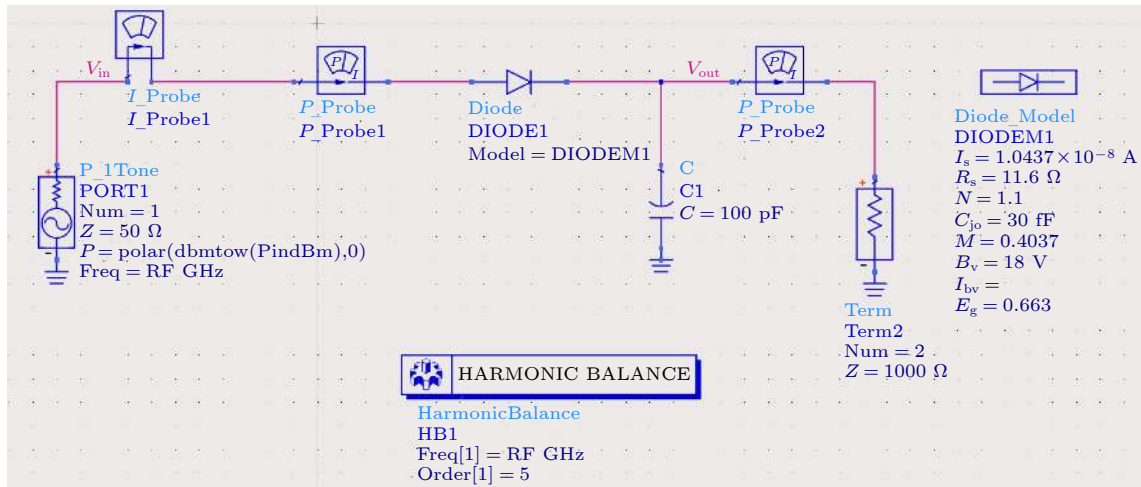


图 10 新型 Ge 基 SBD 器件整流测试电路
Fig. 10. New Ge-based SBD device rectification test circuit.

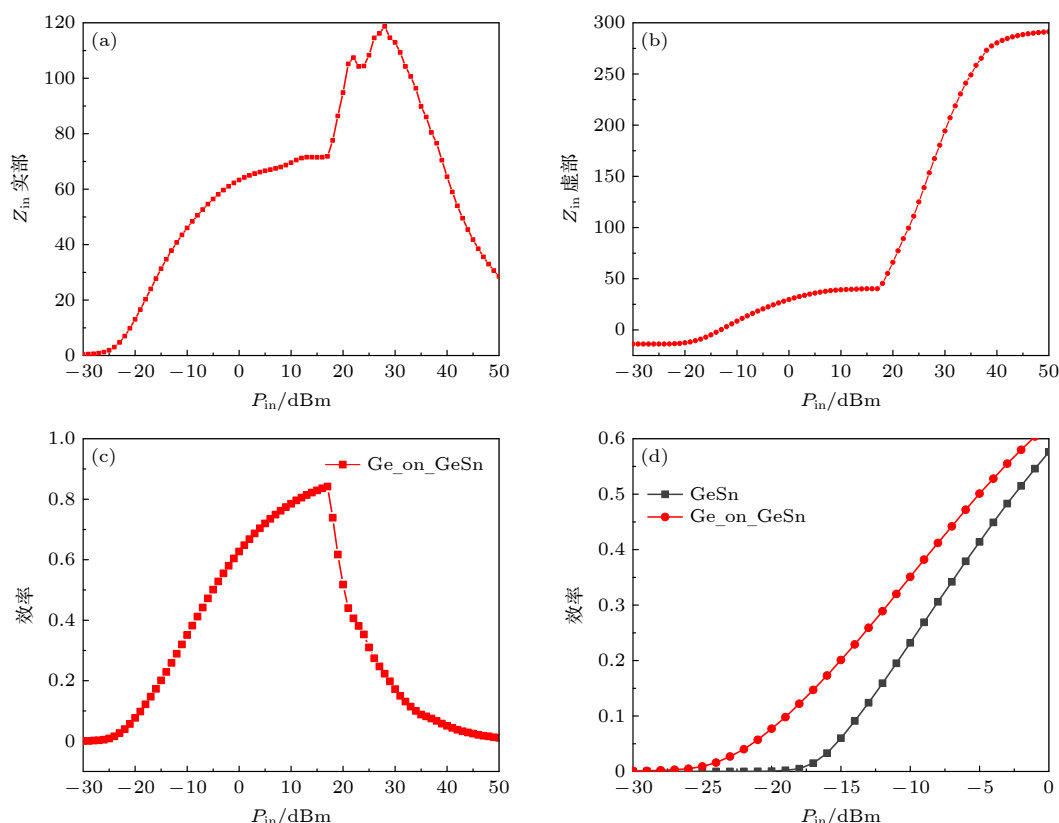


图 11 整流电路的仿真结果, 输入能量与 (a) 阻抗实部、(b) 阻抗虚部、(c) 整流效率以及 (d) 弱能量区域整流效率的关系

Fig. 11. Simulation results of the rectifier circuit, the relationship between the input energy and (a) the real part of the impedance (b) the imaginary part of the impedance (c) the rectification efficiency (d) the rectification efficiency in the weak energy region.

图 11 为仿真结果, 将电路匹配在 -10 dBm 附近, 匹配结果良好. 在输入能量为 -10 dBm 时, 能量转换效率达到了 35.1%; 在输入能量为 -20 dBm 时, 能量转换效率达到了 7.7%. 与传统 Ge 肖特基二极管相比, 该新型 Ge 基肖特基二极管在输入能量为 -10 — -20 dBm 的弱能量工作区域, 能量转换效率整体提升约 10%.

4 结 论

本文提出并设计了一种大有效质量、大亲和能和高电子迁移率的 Ge 基复合半导体肖特基器件, 给出了器件层结构材料物理参数和几何结构参数. Silvaco 仿真结果表明: 与常规肖特基二极管相比, 该器件的开启电压降低大约 0.1 V, 零偏电容降低 6 fF, 反向饱和电流也显著提升. 同时采用所设计的新型 Ge 基肖特基二极管作为核心整流器件进行了整流电路的仿真, 结果表明, 该新型 Ge 基肖特基二极管在输入能量为 -10 — -20 dBm 的弱能量工作区域, 能量转换效率提升约 10%. 本文有关

新型 Ge 基复合半导体器件的研究, 可为提高弱能量密度下工作的微波无线能量传输系统的能量转换效率提供有价值的参考.

参考文献

- [1] 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]
- [2] De S C, Meneghini M, Caria A, Dogmus E, Zegaoui M, Medjdoub F, Kalinic B, Cesca T, Meneghesso G, Zanoni E 2018 *Mater. Today* **11** 153
- [3] Wan S P, Huang K 2018 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **17** 538
- [4] Chen Y S, Chiu C W 2018 *Int. J. RF Microwave Comput. Aided Eng.* **28** 1
- [5] Erkmén F, Almonneef T S, Ramahi O M 2018 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **66** 2433
- [6] Wonwoo L, Yonghee J 2018 *Micromachines*. **10** 12
- [7] Song C Y, Huang Y, Zhou J F, Zhang J W, Yuan S, Carter P 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 3486
- [8] Hemour S, Zhao Y P, Lorenz C H P, Houssameddine D, Gui Y S, Hu C M, Wu K 2014 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **62** 965
- [9] Abdelmalek B, Fedoua D, Ilyas B 2019 *Wirel. Netw.* **25** 3029
- [10] Zheng S Y, Liu W J, Pan Y M 2019 *IEEE Trans. Ind. Inf.* **15** 3334

- [11] Cansiz M, Altinel D, Kurt G K 2019 *Energy Technol.* **174** 292
- [12] Liu W F, Wang Y Y, Song J J 2020 *Superlattices Microstruct.* **28** 106639
- [13] 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 著 (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 110—113页]
- [14] Yang W, Song J J, Hu H Y, Zhang H M 2018 *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **13** 986
- [15] Yang W, Song J J, Ren Y, Zhang H M 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 198502 (in Chinese) [杨雯, 宋建军, 任远, 张鹤鸣 2018 物理学报 **67** 198502]
- [16] Yang W, Song J J, Miao Y H, Zhang J, Dai X Y 2019 *Sci. Technol. Adv. Mater.* **11** 1315
- [17] Zhai X, Song J J, Dai X Y 2019 *IEEE Access* **7** 127438
- [18] Wirths S, Geiger R, Driesch V D N, Mussler G, Stoica T, Mantl S, Ikonc Z, Luysberg M, Chiussi S, Hartmann J M, Sigg H, Faist J, Buca D, Grützmacher D 2015 *Nat. Photonics* **9** 88
- [19] Zhai X, Song J J, Dai X Y, Zhao T L 2020 *Semicond. Sci. Technol.* **35** 085026
- [20] Amato M, Bertocchi M, Ossicini S 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **119** 085705
- [21] Minnie M, Rajeev K S, Charita M 2020 *Mater. Today* **28** 1445
- [22] Huang W Q, Cheng B W, Xue C L, Li C B 2014 *Physica B* **443** 43

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

Song Jian-Jun^{1)3)†} Zhang Long-Qiang¹⁾ Chen Lei²⁾ Zhou Liang²⁾ Sun Lei²⁾
Lan Jun-Feng²⁾ Xi Chu-Hao¹⁾ Li Jia-Hao³⁾

1) (*State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, Shenzhen 518172, China*)

2) (*Beijing Microelectronics Technology Institute, Beijing 100076, China*)

3) (*School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(Received 10 October 2020; revised manuscript received 3 February 2021)

Abstract

With the development of modern communication technology, unlimited energy harvesting technology has become more and more popular. Among them, the weak energy density wireless energy harvesting technology has broken through the limitations in traditional transmission lines and can use the “waste” energy in the environment, which has become very popular. The Schottky diode is the core device of the 2.45 G weak energy density wireless energy harvesting system, and its performance determines the upper limit of the system's rectification efficiency. From the material design point of view, using crystal orientation optimization technology and Sn alloying technology, we propose and design a Ge-based compound semiconductor with large effective mass, large affinity, and high electron mobility. On this basis, the device simulation tool is further used to set reasonable device material physical parameters and geometric structure parameters, and a Ge-based Schottky diode for 2.45 G weak energy microwave wireless energy transmission is realized. The simulation of the ADS rectifier circuit based on the SPICE model of the device shows that comparing with the conventional Schottky diode, the turn-on voltage of the device is reduced by about 0.1 V, the zero-bias capacitance is reduced by 6 fF, and the reverse saturation current is also significantly increased. At the same time, the designed new Ge-based Schottky diode is used as the core rectifier device to simulate the rectifier circuit. The results show that the new-style Ge-based Schottky diode is in the weak energy working area with input energy in a range of $-10 \sim -20$ dBm. The energy conversion efficiency is increased by about 10%. The technical solutions and relevant conclusions of this article can provide a useful reference for solving the problem of low rectification efficiency of the 2.45 G weak energy density wireless energy harvesting system.

Keywords: weak energy wireless transmission, Schottky diode, germanium-tin, crystal orientation, rectification efficiency

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

DOI: 10.7498/aps.70.20201674

* Project supported by the National 111 Center (Grant No. B12026).

† Corresponding author. E-mail: jianjun_79_81@xidian.edu.cn