

低空穴衬底电流的新型体硅横向绝缘栅双极晶体管

段宝兴[†] 李玉滢 唐春萍 任宇壕 杨银堂

(西安电子科技大学集成电路学部, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2025 年 10 月 4 日收到; 2025 年 12 月 11 日收到修改稿)

本文提出一种新型延伸多晶硅栅体硅型横向绝缘栅双极晶体管 (extended polysilicon gate bulk silicon LIGBT, EGBS-LIGBT), 该器件结构为 P 型衬底上依次外延 N 型、P 型硅作为 N 漂移区和 P 漂移区, 相当于将常规 SOI (silicon-on-insulator)-LIGBT 的埋氧层替换成 N 型硅, 其优势在于极大降低成本且能降低空穴衬底电流. 在阳极正偏时, P 漂移区上方的肖特基型延伸多晶硅栅 (Schottky-extended polysilicon gate, S-EG) 在 P 漂移区的内侧表面形成电子反型层, 以获得低的正向导通压降 (V_{on}). 此外, 阳极采用肖特基接触降低空穴注入效率, 而 P 漂移区快速的动态电场调制能力还可迅速提取存储在漂移区中的过剩载流子, 且其多子为空穴还能促进关断时过剩电子的快速复合, 关断能量损耗 (E_{off}) 得以降低. 仿真结果表明: EGBS-LIGBT 在显著降低空穴衬底电流的同时, 改善了 E_{off} 与 V_{on} 间的折中关系. 该器件的 V_{on} 为 1.59 V、空穴衬底电流为 1.9 mA/cm²、 E_{off} 为 0.51 mJ/cm²、击穿电压 (BV) 达 701 V. 相较常规 LIGBT, 该结构在保持 V_{on} 基本不变的前提下, 将空穴衬底电流降至 1/10⁵, E_{off} 降低 69.8%, BV 提升 19.6%.

关键词: 横向绝缘栅双极晶体管, 空穴衬底电流, 关断损耗, 肖特基接触

DOI: 10.7498/aps.75.20251354

CSTR: 32037.14.aps.75.20251354

1 引言

横向绝缘栅双极晶体管 (LIGBT) 可与逻辑控制电路、驱动电路等集成在同一芯片上, 适用于智能功率集成电路 [1-3]. 近年来, 研究者们重点研究 SOI (silicon-on-insulator)-LIGBT, 相继提出短路阳极 SOI-LIGBT [4-6]、多栅 LIGBT [7] 以及浮动 P 漂移区阻挡结 LIGBT [8] 等新型结构. 但由于 SOI 材料成本高昂且工艺复杂性高, 相较于体硅 LIGBT, SOI-LIGBT 通常具有更高制造成本. 此外, SOI 结构存在的自热效应 [9,10] 与浮体效应 [11] 会劣化散热性能且降低电路集成度. 因此, 本研究选择体硅 LIGBT 作为研究对象. 然而将体硅 LIGBT 集成至逻辑电路时, 器件中阳极 P⁺区向衬底注入的空

穴会导致开关速度下降, 并引发同衬底其他器件的串扰问题 [12].

针对此问题, 学术界提出多种解决方案, 例如双埋层结隔离技术 [13-16]、阳极结构优化方案 (如将 P⁺集电极连接至最外层 N⁺沉阱 [17]、在 N 缓冲区内, P⁺集电极的前方设置浮动 N⁺区 [18] 等). 但这类结构存在耐压量级较低, 或对衬底电流抑制作用有限. 为有效抑制空穴衬底电流并确保新型体硅 LIGBT 的基本性能不逊于近年新研究的 SOI-LIGBT, 本文提出一种采用肖特基型延伸多晶硅栅 [19] (Schottky-extended polysilicon gate, S-EG) 的体硅型 LIGBT (EGBS-LIGBT). 该器件通过 P 漂移区/N 漂移区结形成的空穴阻挡势垒来抑制空穴衬底电流, 利用 S-EG 在 P 漂移区内侧表面反型出高密度的电子薄层, 相当于构建一条连通 P 阱区至 N 缓冲区的

[†] 通信作者. E-mail: bxduan@163.com

低阻导通路径, 从而获得低导通电压 (V_{on}). 同时, 阳极采用肖特基接触降低空穴注入效率, 并借助 P 漂移区加速关断过程中的空穴抽取与电子复合, 可大幅降低关断能量损耗 (E_{off}). 仿真结果表明: EGBS-LIGBT 将空穴衬底电流显著降低 4—5 个数量级, 并改善 E_{off} 与 V_{on} 的折中关系.

2 器件结构及机理

图 1(a) 和图 1(b) 分别展示了 EGBS-LIGBT 与常规 LIGBT 的器件结构横截面示意图. 相较于常规 LIGBT, EGBS-LIGBT 采用了肖特基延伸多晶硅栅 (S-EG) 结构以维持低导通压降. 该 S-EG 由轻掺杂 N 型多晶硅 (N-top) 和靠近阳极的重掺杂 N^+ 多晶硅区 (N^+ 区) 构成, 其中 N^+ 区用于阻挡空穴. S-EG 两端采用肖特基接触以阻挡电子. 另外 EGBS-LIGBT 采用镍金属作为 S-EG 两端的肖特基接触金属, 由于镍的成本仅为铝的 3—6 倍, 并且具有很高的工艺兼容性, 因此它是一种适合且廉价的可用于肖特基接触的金属材料. 当器件正向导通 ($V_{GS} \geq V_{DS}$) 时, 电势差降落在 N^+ 区与阳极之间, N^+ 区左侧大部分区域电势保持与 V_G 一致,

保证了 S-EG 有足够高的电势使得 P 漂移区表面反型出电子薄层^[20,21]; 当器件正向阻断 ($V_{GS} < V_{DS}$) 时, 电势差降落在 S-EG 的 N^+ 区与栅极之间, S-EG 的电势均大于 V_G , 如图 2(a) 所示, 在器件正常工作期间, S-EG 电势始终高于栅极电压 V_G , 使其表现出强电子吸附能力.

当阳极施加正向偏压时, 若阳极侧 P^+ 区与 N 缓冲区间电势差超过 PN 结开启电压 (硅材料典型值为 0.7 V), 空穴将从 P^+ 区注入至 N 缓冲区, 进而进入 P 漂移区. 经仿真数据表明, $V_A = 1$ V 时 P 漂移区内开始有少量空穴注入, $V_A = 2$ V 时, P 漂移区内有大量空穴注入. 在低阳极偏压条件 (<1 V) 下, 空穴与漂移区内的少量电子电荷重新复合. 随着阳极电压升高, 注入空穴浓度将超越 P 漂移区的背景掺杂浓度^[22]. 此时大注入诱发出的电子与空穴浓度均超过 P 漂移区的背景掺杂浓度多个数量级, 形成高浓度电子-空穴等离子体, 这是器件内有自由载流子移动的原因. 而电场驱动高密度空穴载流子向衬底漂移, 易形成衬底电流.

为抑制衬底电流, 本文将垂直交替 P-N 漂移区结构与 S-EG 结合, 即上文提到的 EGBS-LIGBT: 在 P 漂移区与 P 型衬底间插入 N 漂移区, 从工艺角度出发, 其增加的外延成本相比于 SOI 材料要低很多. EGBS-LIGBT 的工作机制具有双重效应: 首先, 在正向阳极偏压下, P 漂移区/N 漂移区界面的内建电场将阻碍空穴向衬底移动; 其次, 由于 N 缓冲区掺杂浓度高于 P 漂移区, 其在 N 缓冲区内形成更平缓的电势梯度, 由图 2(a) 可见. 这使得阳极电势通过 N 缓冲区传递至 N 漂移区, 确保了 N 漂移区电势始终高于 P 漂移区, 形成反偏 PN 结以构建空穴阻挡势垒. 由此强化的内建电场不仅增强空穴阻挡效果, 还能促使空穴远离 P 漂移区/N 漂移区界面, 显著降低衬底电流. 如图 2(b) 所示, N 漂移区对空穴衬底电流表现出明显的阻挡作用.

利用 Sentaurus TCAD 仿真工具对 EGBS-LIGBT 的正向导通、正向阻断及关断特性分别进行研究与分析. 为了更好地校准仿真结果, 选择在模型大类中激活多个不相冲突的模型, 仿真中用到的物理模型包括禁带变窄模型、雪崩效应模型、迁移率模型、迁移率退化模型、产生-复合模型. 用 TCAD 工具不断改变器件结构参数和掺杂浓度以得到更高的 BV 和低的 V_{on} , E_{off} , 优化后的参数如表 1 所列.

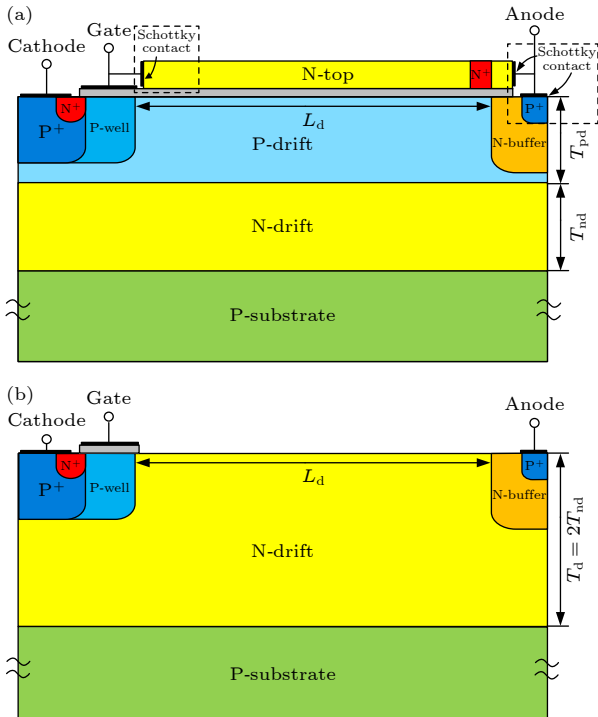


图 1 (a) EGBS-LIGBT 与 (b) 常规 LIGBT 的器件结构剖面示意图

Fig. 1. Schematic device cross-section of (a) EGBS-LIGBT and (b) conventional LIGBT.

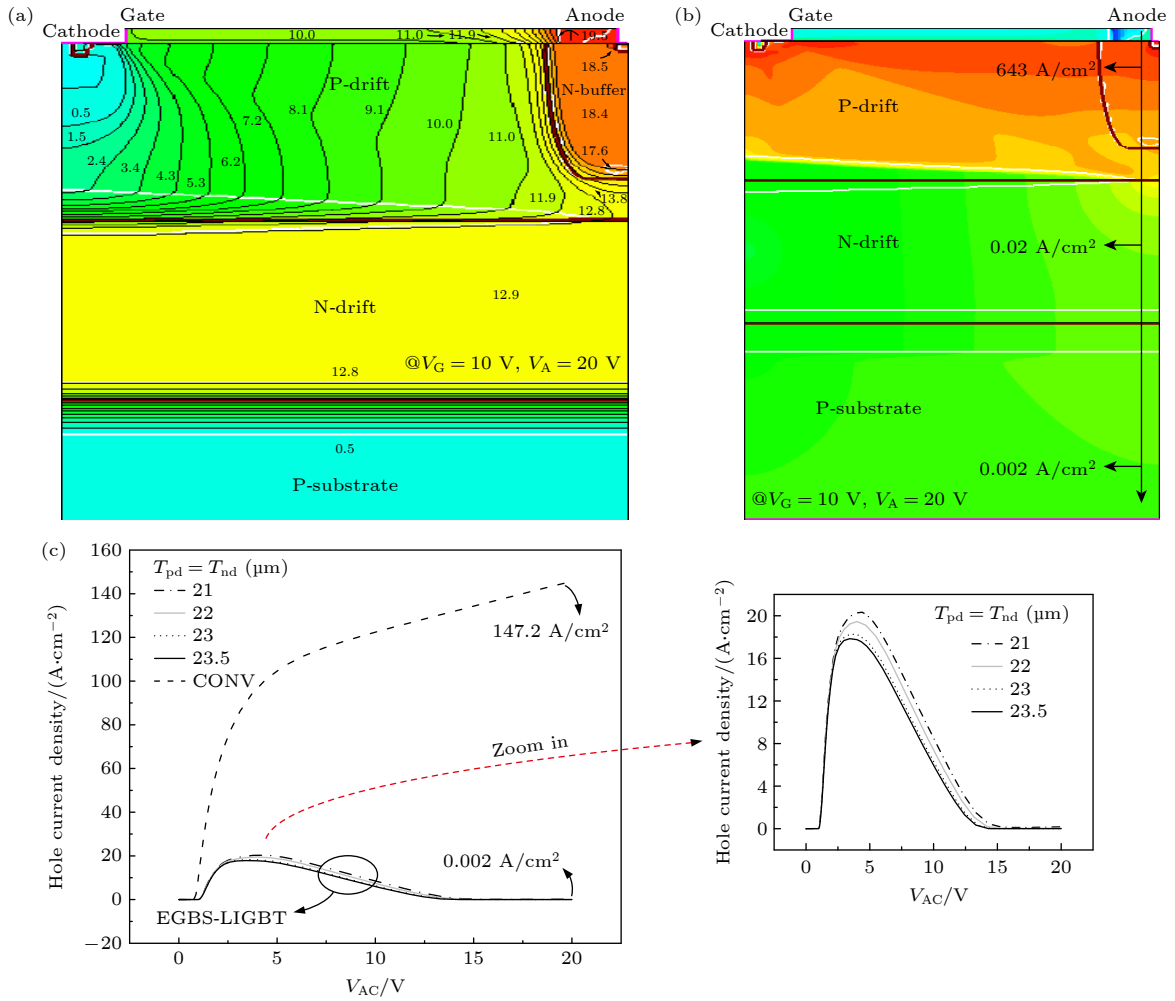


图 2 (a) EGBS-LIGBT 的电势分布截面示意图; (b) EGBS-LIGBT 的空穴电流密度分布截面示意图; (c) 不同漂移区厚度下 EGBS-LIGBT 与常规 LIGBT 空穴衬底电流-阳极电压关系曲线图

Fig. 2. (a) Potential distribution diagram of EGBS-LIGBT; (b) hole current density distribution diagram of EGBS-LIGBT; (c) diagram of the relationship between hole substrate current and V_{AC} for EGBS-LIGBT and conventional LIGBT with varying drift region thicknesses.

表 1 仿真中的关键参数

Table 1. Key parameters used in simulation.

参数	参数含义	常规LIGBT	EGBS-LIGBT
$L_d/\mu\text{m}$	漂移区长度	40	40
T_{ox}/nm	栅氧化层厚度	5	5
$T_{top}/\mu\text{m}$	S-EG厚度	—	2
$T_{nd}(T_{pd})/\mu\text{m}$	漂移区厚度	23.5	23.5
$N_{ndrift}/(10^{14} \text{ cm}^{-3})$	N漂移区掺杂浓度	5	5
$N_{pdrift}/(10^{14} \text{ cm}^{-3})$	P漂移区掺杂浓度	—	9
$N_{buffer}/(10^{16} \text{ cm}^{-3})$	N缓冲区掺杂浓度	6	6
$N_{p-anode}/(10^{18} \text{ cm}^{-3})$	阳极P ⁺ 区掺杂浓度	4	4
$N_{top}/(10^{14} \text{ cm}^{-3})$	S-EG的N型浅掺杂区掺杂浓度	—	4
$N_{top-n+}/(10^{20} \text{ cm}^{-3})$	S-EG的N型重掺杂区掺杂浓度	—	1
$N_{p-sub}/(10^{14} \text{ cm}^{-3})$	P型衬底掺杂浓度	4	4

3 仿真结果与分析

所提出的 EGBS-LIGBT 相较常规 LIGBT 结构展现出显著性能优势, 图 2 至图 8 的实验数据佐证了这一点. 如图 2(c) 所示, EGBS-LIGBT 具有卓越的衬底电流抑制能力, 将空穴衬底电流从 147.2 A/cm^2 降至仅 0.002 A/cm^2 ——降幅达 5 个数量级. 其空穴衬底电流与阳极电流密度比值低至 3.11×10^{-6} , 表明衬底电流对器件影响可忽略不计.

图 3(a) 和图 3(b) 显示在相同漂移区长度下, EGBS-LIGBT 击穿电压 (BV) 提升 19.6%, $N_{\text{pdrift}} = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时 BV 达到最优值, 且增加 S-EG 厚度 (T_{top}) 可进一步提升 BV. 原因在于 N 漂移区的引入会在 N-drift/P-substrate 结处引入电场峰, 调制了器件纵向电场使得 BV 提高, 并且增大 T_{top} 可

增加 S-EG 的耐压面积, 可使 BV 进一步提高.

图 4(a) 和图 4(b) 分别为 EGBS-LIGBT 电子电流密度和空穴电流密度在不同金属功函数值 (Φ_M) 下的输出特性曲线. 由图 4 可明显看出电子电流密度和空穴电流密度均随着金属功函数值变化而产生明显变化. 首先固定肖特基阳极处的 Φ_M 值, 可观察到 EGBS-LIGBT 导通时的空穴电流密度明显低于电子电流密度值, 表明该 EGBS-LIGBT 形成了由电子主导的双载流子导通模式, 也表明了该器件的正向导通压降大小主要取决于导通时电子电流密度的大小. 其次, 当金属功函数值较低时, 空穴电流密度处于极低的水平, 当继续增大金属功函数值, 可见空穴电流密度逐渐升高, 这是因为大多数金属的功函数小于 P 型半导体的功函数, 金半接触时易形成空穴阻挡层和电子反阻挡层. 拿本文 EGBS-LIGBT 举例, 当选择的金属功函数值为

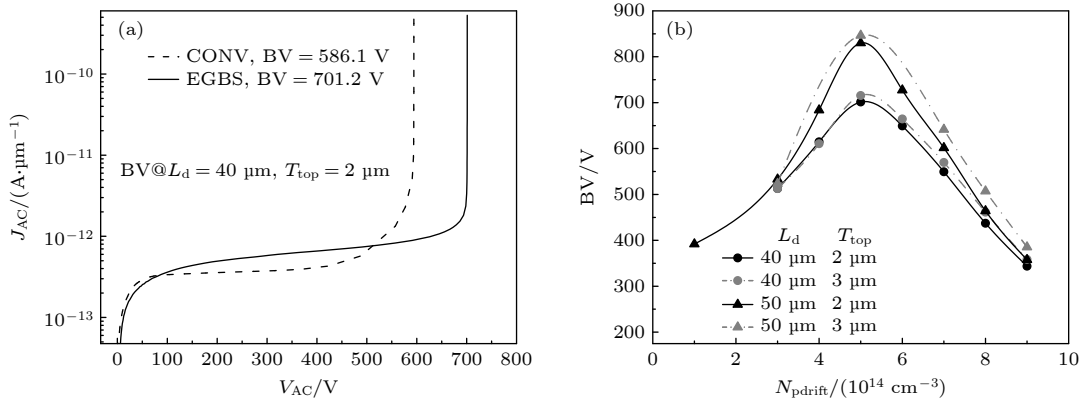


图 3 (a) EGBS-LIGBT 与常规 LIGBT 的击穿特性对比; (b) 不同 L_d 与 T_{top} 组合下 EGBS-LIGBT 的耐压变化曲线

Fig. 3. (a) Comparison of breakdown characteristic between EGBS-LIGBT and conventional LIGBT; (b) BV variation curves of EGBS-LIGBT with different combinations of L_d and T_{top} .

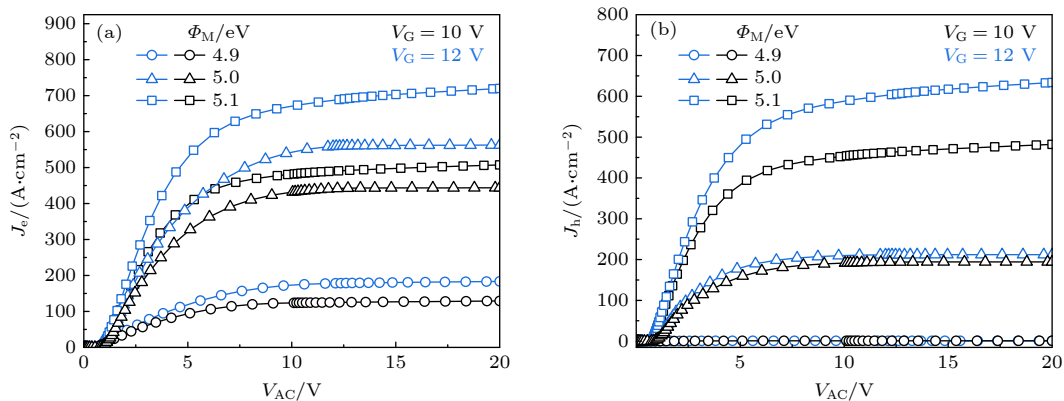


图 4 (a) 不同金属功函数值下 EGBS-LIGBT 的电子电流密度与阳极电压的关系; (b) 不同金属功函数值下 EGBS-LIGBT 的空穴电流密度与阳极电压的关系

Fig. 4. (a) Relationship between electron current density and anode voltage of EGBS-LIGBT with different values of metal work function; (b) relationship between hole current density and anode voltage of EGBS-LIGBT with different values of metal work function.

4.9 eV 时, 金半接触形成的空穴阻挡势垒较高, 电子在导通状态下很快会从肖特基阳极处流出, 不能保证空穴的正常注入, 使得空穴电流密度近似为 0, 器件呈现出近似单极导通特性; 当选择的金属功函数值为 5.1 eV 时, 金属和 P 型半导体的费米能级近似相等, 削弱了电子的快速流出, 从而确保了阳极处空穴的正常注入, 使器件呈现出正常的双极导通特性. 但如果空穴电流密度过高, EGBS-LIGBT 的漂移区空穴更易注入衬底, 还会延长器件关断时抽取空穴的时间, 因此金属功函数值不宜过大也不宜过小. 为了降低空穴注入衬底的概率以及缩短关断时空穴的抽取时间, 本文所提器件的阳极金属功函数值取为 5.0 eV, 保证器件既具有良好的导通能力和关断能力, 也能将衬底空穴电流减小到预期标准.

图 5(a) 显示, 在相同漂移区长度下, EGBS-LIGBT 导通压降 (V_{on}) 为 1.59 V, 与常规 LIGBT 基本持平. 这是由于阳极的肖特基接触降低了 Anode-P+区的空穴注入效率, 导致 EGBS-LIGBT 的 V_{on} 略高于常规 LIGBT. 同时, 在图 5(b) 中, 将 EGBS-LIGBT 与最新的 SOI-LIGBT^[5,23,24] 进行了比较, 发现 EGBS-LIGBT 仍具有优异的导通特性, 突出了该器件的竞争优势. 图 6 通过不同的栅压下的 $I-V$ 曲线概览正向偏置安全工作区 (FBSOA): 在低栅压时, 由于阳极肖特基接触略微降低了 EGBS-LIGBT 的阳极 P+区空穴注入, 使 EGBS-LIGBT 实现了更大的安全工作区面积, 显示出比常规 LIGBT 更优的工作可靠性. 然而, 当施加更高的栅压时, EGBS-LIGBT 的安全工作区变窄, 出现此现象的原因主要是高栅压下 EGBS-LIGBT 电流驱动能力增强导致电流集中, 而大电流易在阴极处引发闩锁, 这造成了安全工作区右边界的收缩. 而常规 LIGBT 漂移区的一部分空穴会注入到衬底中, 缓解了其漂移区内的电流集中现象, 增强了其抗闩锁能力. 另外, 常规 LIGBT 在以和 EGBS-LIGBT 相同的导通压降工作时需要具有更低的 P+阳极掺杂浓度, 这意味着其具有较低的空穴注入, 阳极肖特基接触给 EGBS-LIGBT 带来的优势在此时也变得不明显. 综合以上因素, 常规 LIGBT 在高栅压条件下拥有比 EGBS-LIGBT 大的安全工作区面积, 但是其注入衬底的电荷有诸多前文所提到的不利影响.

考虑到 EGBS-LIGBT 在高栅压下由于电流驱动能力增强造成电流集中, 优化方案可以从加快

空穴从 P+源区抽取或是增加空穴抽取路径的角度出发. 例如在原 EGBS-LIGBT 的 P-well 下方增加 P+埋层以提高阴极处空穴抽取速度, 因为高浓度的 P+埋层能降低阴极处 P 型区域的电阻, 即使当

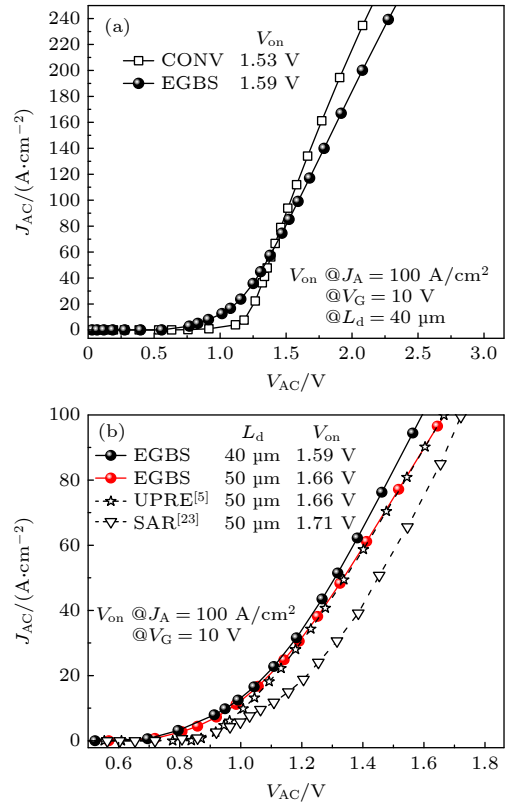


图 5 (a) EGBS-LIGBT 与常规 LIGBT 的正向导通特性对比; (b) EGBS-LIGBT 与近年新型 SOI-LIGBT 的正向导通特性对比
 Fig. 5. (a) Comparison of the forward conduction characteristics between EGBS-LIGBT and conventional LIGBT; (b) comparison of forward conduction characteristics between EGBS-LIGBT and the recent novel SOI-LIGBT.

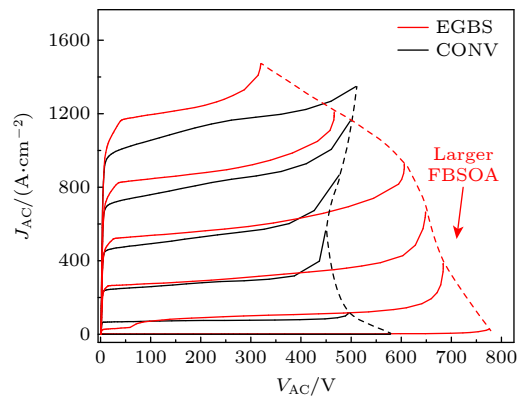


图 6 不同 V_G 下 EGBS-LIGBT 和常规 LIGBT 的 FBSOA 曲线预测图
 Fig. 6. The predicted FBSOA curves of EGBS-LIGBT and conventional LIGBT under different V_G .

较大电流通过时,也很难在 P-well 和 N+源区之间形成 0.7 V 的正向导通压降,从而降低闩锁的概率,器件的安全工作区也得以大幅扩展.但是由于空穴被快速地抽取导致器件的导通压降略有升高以及饱和电流降低,为了获得低导通压降和大饱和电流,在 P-well 的一侧又增加了 N 型区,如图 7(a) 所示,我们称此优化的 LIGBT 为 PB-EGBS LIGBT (P-Buried-EGBS LIGBT). 增加的 N 型区为导通时沟道内的电子提供了相比于 P 漂移区来说更低的导电路径,使得沟道内的电子可以沿器件纵向方向扩散,增加了 P-well 周围的电子电流浓度.又由于漂移区内的电导调制,空穴在此处的浓度也有所提高,因此能降低导通压降并提高饱和电流. 综上,该方案的机理在于 P+埋层加速阴极区域空穴的抽取,新增的 N 型区又增加电子-空穴对在此处的浓度,达到导通时一边增加载流子浓度,一边抽取的效果,并且 N 型区的存在也会阻挡空穴向低掺杂的 P-well 处流动,极大地降低了触发闩锁的概率,从而获得了高栅压下更大的安全工作区,也进一步优化了器件的导通特性. 图 7(b) 为 EGBS-LIGBT、常规型 LIGBT 与新优化的 PB-EGBS LIGBT 的 FBSOA 对比曲线, EGBS-LIGBT 在低栅压时表现出比常规型 LIGBT 更大的 FBSOA 和更大的饱和电流,而在栅压大于 12 V 时其 FBSOA 衰减迅速,限制其在高栅压下的应用. 而 PB-EGBS LIGBT 实现了在高栅压下拥有大安全工作区的目标,另外可以通过调节 N 型区的纵向宽度 (T_n) 和掺杂浓度来控制正向导通压降和饱和电流,一般其纵向宽度越大掺杂浓度越高,导通压降越低且饱和电流越

大,但这也影响安全工作区的边界,因此需要合理控制 N 型区的掺杂浓度和尺寸,图 7(b) 中 PB-EGBS LIGBT 选择了合适的参数,保证了其与另外两种器件有着相似的导通压降. 虽然其饱和电流略低于 EGBS-LIGBT,但是其关断时间得以降低.

综上,可见在阴极 P-well 下添加 P+埋层是一个提高安全工作区十分有效的手段. 除此之外,在大安全工作区的前提下继续降低导通压降并提升饱和电流也可以采取其他措施,如增加漂移区内部载流子的积累概率或是合理调控载流子寿命等.

图 8(a) 为关断特性测试结果: 常规 LIGBT 关断时间为 233.2 ns, EGBS-LIGBT 仅需 119.8 ns, 关断速度提升 48.6%. 这主要得益于三重机制: 首先,阳极肖特基接触降低空穴注入效率; 其次, P 漂移区的应用使得 EGBS-LIGBT 的阳极电势由 P-drift/N-buffer 结承担,能极大地降低关断时间和关断损耗. 原因在于,常规型 LIGBT 的阳极电势由 P-well/N-drift 结承担, N-buffer 的浓度通常高于 P-well,使得耗尽区在 P-drift 内扩展速度比在 N-drift 内快,因此应用 P 漂移区的 EGBS-LIGBT 表现出快速的动态电场调制能力,可迅速提取存储在 P 漂移区中的过剩载流子; 最后, P 漂移区促使电子-空穴快速复合,显著地减少载流子存储时间,进而同步降低关断时间和关断损耗. 图 8(b) 对比相同 V_{on} 下 EGBS-LIGBT 与常规 LIGBT 的反向偏置安全工作区 (RBSOA), 测试中采用一致栅极脉冲参数并逐步提升总线电压 (V_{bus}) 以考察最大关断极限电压. 数据显示: 当总线电压达到 700 V (EGBS-LIGBT 的击穿电压值) 时 EGBS-LIGBT 仍

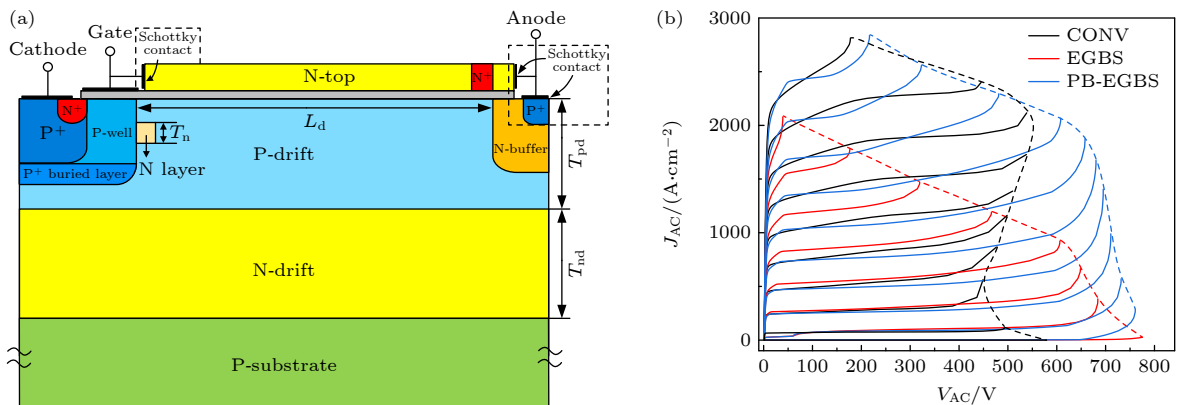


图 7 (a) PB-EGBS LIGBT 器件结构剖面示意图; (b) EGBS-LIGBT、PB-EGBS LIGBT 与常规 LIGBT 的 FBSOA 对比曲线图
 Fig. 7. (a) Schematic device cross-section of PB-EGBS LIGBT; (b) comparison of FBSOA curves among the EGBS-LIGBT, PB-EGBS LIGBT, and conventional LIGBT.

可成功关断, 而常规 LIGBT 在超过 475 V 时即失效. 此差异源于常规 LIGBT 漂移区和衬底中的过剩空穴积累. 综上, EGBS-LIGBT 的 RBSOA 边界扩展至 700 V, 远优于常规 LIGBT.

图 9(a) 和图 9(b) 分析漂移区掺杂浓度对四大核心参数的影响. 图 9(a) 表明: 当 P 漂移区掺杂浓度 (N_{pdrift}) 为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时, 器件实现 P/N 双漂移区全耗尽, 此时击穿电压 BV 达到峰值; 偏离该浓度将导致 N 漂移区未完全耗尽, 引起 BV 衰减. 增加 N_{pdrift} 会降低 P 漂移区内自由电子浓度并强化载流子复合, 导致 V_{on} 上升, 同时 E_{off} 同步下降. 图 9(b) 中对 N 漂移区浓度 (N_{ndrift}) 的研究表明: 在 $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时 BV 高达 701 V 且衬底电流稳定在 1.9 mA/cm^2 以下. 值得注意的是, 随着 N_{ndrift} 增加, 升高的电子浓度使 V_{on} 降低, 但载流子复合时

间延长导致 E_{off} 增大. 经参数优化后, 在 $N_{\text{pdrift}} = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和 $N_{\text{ndrift}} = 9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时获得均衡性能: BV 达 701 V, V_{on} 仅 1.59 V, E_{off} 低至 0.51 mJ/cm^2 , 衬底空穴电流为 1.9 mA/cm^2 .

图 10(a) 和图 10(b) 对比了近期提出的 SOI-LIGBT^[5,8,23]、体硅 LIGBT^[25]、常规 LIGBT 以及本文提出的 EGBS-LIGBT 之间的 $E_{\text{off}}-V_{\text{on}}$ 折中关系. 值得注意的是, 图中空心符号代表 SOI-LIGBT, 而实心符号代表没有 SOI 层的 LIGBT. 图 10(a) 重点比较了 EGBS-LIGBT 与最新的 SOI-LIGBT^[5,8,23] 的关系, 强调了 EGBS-LIGBT 具有更优异的性能. 图 10(b) 主要比较了 EGBS-LIGBT 与常规 LIGBT 的关系. 从图中可以看出, 所提出的 EGBS-LIGBT 在相同 V_{on} 值下, E_{off} 降低了 69.8%, 表明 P 漂移区和 S-EG 结构能够有效地改善 $E_{\text{off}}-V_{\text{on}}$ 折中关系.

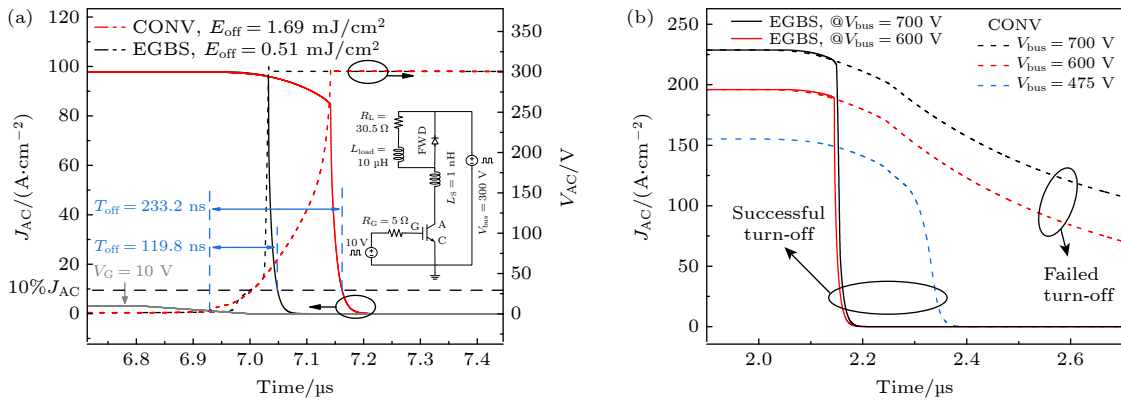


图 8 (a) 关断特性测试 (V_{bus} 为关断测试电路的恒定直流电压); (b) EGBS-LIGBT 与常规 LIGBT 的 RBSOA

Fig. 8. (a) Turn-off characteristic test (V_{bus} is a constant DC voltage of turn-off test circuit); (b) RBSOA of EGBS-LIGBT and conventional LIGBT.

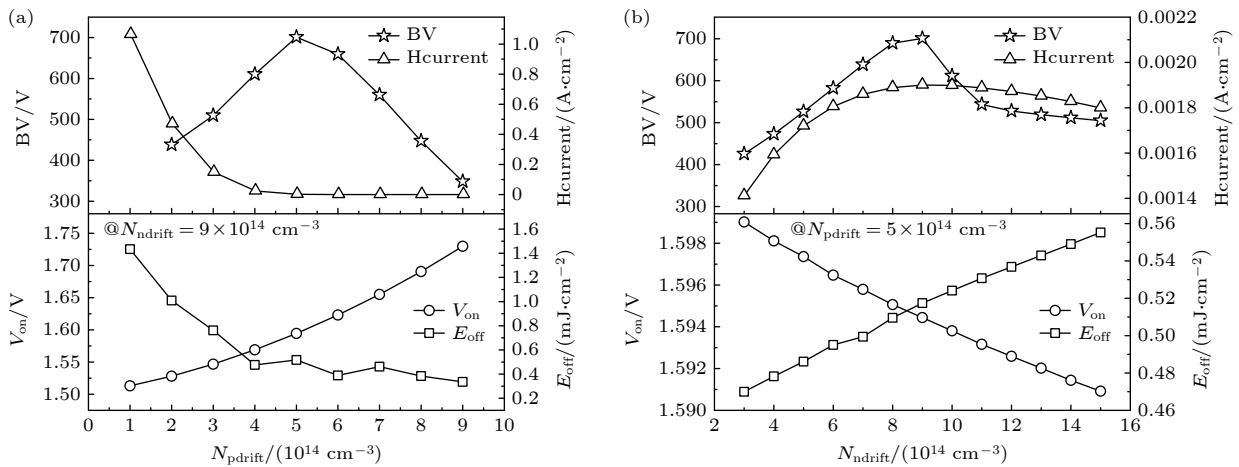


图 9 (a) N_{pdrift} 对 EGBS-LIGBT 性能的影响; (b) N_{ndrift} 对 EGBS-LIGBT 性能的影响

Fig. 9. (a) The impact of N_{pdrift} on the performance of EGBS-LIGBT; (b) the impact of N_{ndrift} on the performance of EGBS-LIGBT.

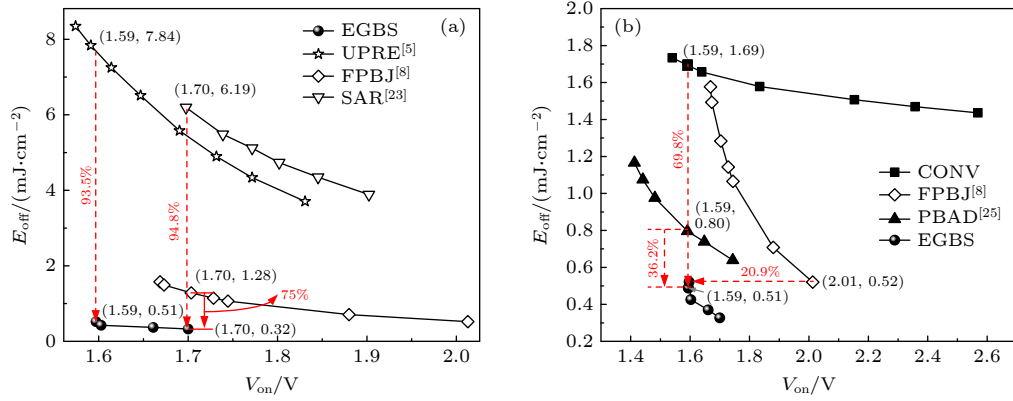


图 10 (a) EGBS-LIGBT 与近期新型 SOI-LIGBT 的 E_{off} - V_{on} 折中关系图; (b) EGBS-LIGBT, SOI-LIGBT, bulk LIGBT 和 conventional LIGBT 的 E_{off} - V_{on} 折中关系图

Fig. 10. (a) The E_{off} - V_{on} trade-off diagram of EGBS-LIGBT and the recent novel SOI-LIGBT; (b) the E_{off} - V_{on} trade-off diagram of EGBS-LIGBT, SOI-LIGBT, bulk LIGBT, and conventional LIGBT.

4 结 论

本文提出一种具有低空穴衬底电流、低关断损耗 (E_{off}) 和高击穿电压 (BV) 的体硅型 LIGBT. 其独特的 P 漂移区与 N 漂移区双漂移结构使 EGBS-LIGBT 实现了超低空穴衬底电流 ($1.9 \text{ mA}/\text{cm}^2$), 较常规 LIGBT 降低 99.9%. 在器件正向导通和阻断状态下, S-EG 在 P 漂移区内侧表面反型出高密度电子薄层, 形成低阻导通路径, 使器件获得 1.59 V 的低导通压降. 关断过程中, 阳极肖特基接触降低空穴注入效率, P 漂移区快速的动态电场调制能力提升了空穴抽取速度, P 漂移区也加速了关断阶段与过剩电子的复合. 三者的协同效应使 E_{off} 显著降低. 仿真表明 EGBS-LIGBT 的 E_{off} 为 $0.51 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 与常规 LIGBT、体硅型 LIGBT (PBAD-LIGBT) 和新型 SOI-LIGBT (FPBJ-LIGBT) 相比分别降低 69.8%, 36.2% 和 77.7%.

参考文献

[1] Du Y C 2016 *M. S. Thesis* (Nanjing: Southeast University) (in Chinese) [杜益成 2016 硕士学位论文 (南京: 东南大学)]
 [2] Sakurai N, Mori M, Yatsuo T 1990 *Proceedings of the 2nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's Tokyo, Japan, April 4-6, 1990* p66
 [3] Disney D, Letavic T, Trajkovic T, Terashima T, Nakagawa A 2017 *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 659
 [4] Sun L, Duan B, Wang Y, Yang Y 2019 *IEEE Trans. Electron Devices* **66** 2675
 [5] Wei J, Dai K, Yang K, Zhu P, Li J, Li Z, Zhang B, Luo X 2023 *IEEE Trans. Electron Devices* **70** 662
 [6] Duan B, Wang J, Tang C, Yang Y 2024 *IEEE Electron Device Lett.* **45** 1926
 [7] Yang J, Zhang M, Wu Y, Wang M, Wei J 2022 *IEEE*

Electron Device Lett. **43** 272
 [8] Zeng R, Wu Z, Lei S, Liao L, Feng Y 2024 *IEEE Access* **12** 123071
 [9] Su, Goodson, Antoniadis, Flik, Chung 1992 *International Technical Digest on Electron Devices Meeting San Francisco, CA, USA, December 13-16, 1992* p357
 [10] Arnold E, Pein H, Herko S P 1994 *Proceedings of International Electron Devices Meeting San Francisco, CA, USA, December 11-14, 1994* p813
 [11] Dai C H, Chang T C, Chu A K, Kuo Y J, Jian F Y, Lo W H, Ho S H, Chen C E, Chung W L, Shih J M, Xia G, Cheng O, Huang C T 2011 *IEEE Electron Device Lett.* **32** 847
 [12] Chan W W T, Sin J K O, Wong S S 1995 *Proceedings of International Electron Devices Meeting Washington, DC, USA, December 10-13, 1995* p971
 [13] Bakeroot B, Doutreloigne J, Moens P 2006 *IEEE Electron Device Lett.* **27** 492
 [14] Bakeroot B, Doutreloigne J, Vanmeerbeek P, Moens P 2008 *IEEE Trans. Electron Devices* **55** 435
 [15] Su R Y, Cheng C C, Huo K H, et al. 2012 *24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's Bruges, Belgium, June 3-7, 2012* p221
 [16] Tsai Y C, Gong J, Chan W C, Wu S Y, Lien C 2015 *IEEE Electron Device Lett.* **36** 929
 [17] Fujii H, Komatsu S, Sato M, Ichikawa T 2011 *Proceedings of the 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's San Diego, USA, May 23-26, 2011* p372
 [18] Pathirana V, Udugampola N, Trajkovic T, Udrea F 2018 *IEEE Electron Device Lett.* **39** 866
 [19] Duan B X, Liu Y L, Tang C P, Yang Y T 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 078501 (in Chinese) [段宝兴, 刘雨林, 唐春萍, 杨银堂 2024 物理学报 **73** 078501]
 [20] Duan B X, Wang J S, Tang C P, Yang Y T 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 157301 (in Chinese) [段宝兴, 王佳森, 唐春萍, 杨银堂 2024 物理学报 **73** 157301]
 [21] Duan B X, Ren Y H, Tang C P, Yang Y T 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 087301 (in Chinese) [段宝兴, 任宇壕, 唐春萍, 杨银堂 2025 物理学报 **74** 087301]
 [22] Qin Z X, Narayanan E M S 1997 *Proceedings of the 9th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's Weimar, Germany, May 26-29, 1997* p313
 [23] Luo X 2019 *IEEE Trans. Electron Devices* **66** 1390
 [24] Gu Y 2024 *IEEE Trans. Electron Devices* **71** 381
 [25] Sun L, Duan B, Yang Y 2021 *IEEE J. Electron Devices Soc.* **9** 409

Novel bulk silicon lateral insulated gate bipolar transistor with low hole substrate current

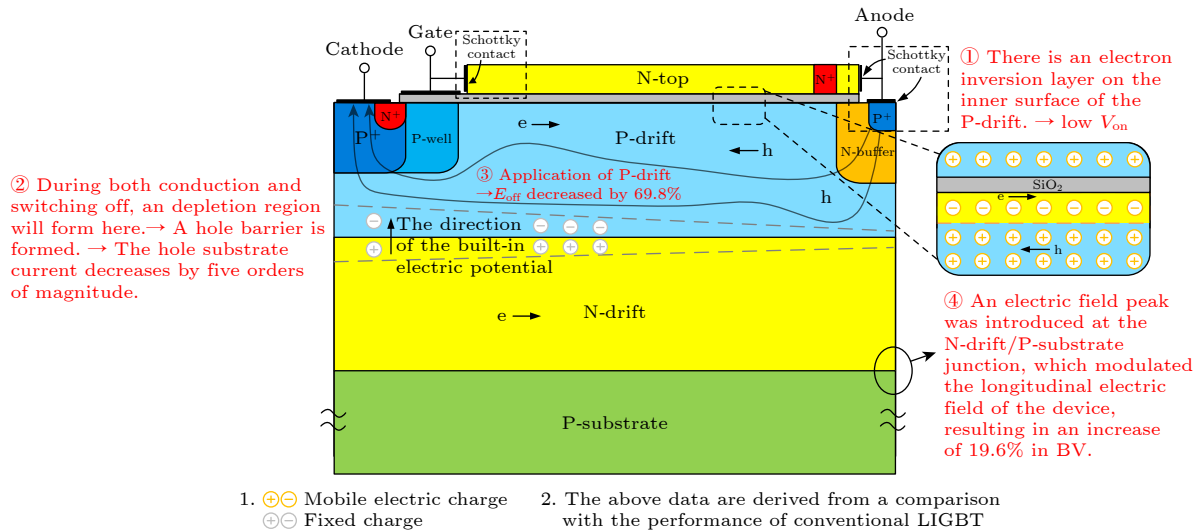
DUAN Baoxing[†] LI Yuying TANG Chunping
REN Yuhao YANG Yintang

(Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices,
School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 4 October 2025; revised manuscript received 11 December 2025)

Abstract

This paper proposes a new extended polysilicon gate bulk silicon lateral insulated gate bipolar transistor (EGBS-LIGBT). In order to suppress the hole substrate current, N-type and P-type silicon are epitaxially grown on the P-substrate sequentially to serve as N-drift and P-drift. The PN junction composed of two drift regions is in a reverse-biased state during both normal conduction and off states of the device. The built-in potential within it forms a hole-blocking barrier to prevent holes from moving towards the substrate. Meanwhile, a Schottky-extended polysilicon gate (S-EG) is added on the P-drift, forming a thin electron-inversion layer on the inner surface of the P-drift, which can achieve a low on-state voltage (V_{on}). In addition, the Schottky contact at the anode reduces hole injection efficiency, while the rapid dynamic electric field modulation capability of P-drift enables the swift extraction of excess carriers stored in this region. The majority carriers in the P-drift, which are holes, can also accelerate recombination with the excess electrons during the turn-off phase. The above factors help to reduce the turn-off time and the turn-off energy loss (E_{off}). The simulation results show that EGBS-LIGBT effectively reduces the hole substrate current while improving the trade-off relationship between E_{off} and V_{on} . In this paper, EGBS-LIGBT has a V_{on} of 1.59 V, hole substrate current is 1.9 mA/cm², E_{off} is 0.51 mJ/cm², and breakdown voltage (BV) is 701 V. Compared with conventional LIGBT, the EGBS-LIGBT exhibits approximately equal V_{on} , the hole substrate current reduced to 1/10⁵ of the conventional LIGBT, 69.8% lower E_{off} , and 19.6% higher BV.



Keywords: lateral insulated gate bipolar transistor, hole substrate current, turn-off loss, Schottky contact

DOI: 10.7498/aps.75.20251354

CSTR: 32037.14.aps.75.20251354

[†] Corresponding author. E-mail: bxduan@163.com



低空穴衬底电流的新型体硅横向绝缘栅双极晶体管

段宝兴 李玉滢 唐春萍 任宇壕 杨银堂

Novel bulk silicon lateral insulated gate bipolar transistor with low hole substrate current

DUAN Baoxing LI Yuying TANG Chunping REN Yuhao YANG Yintang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 050805 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251354

CSTR: 32037.14.aps.75.20251354

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251354>

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

肖特基结多数载流子积累新型绝缘栅双极晶体管

Novel majority carrier accumulation insulated gate bipolar transistor with Schottky junction

物理学报. 2024, 73(7): 078501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231768>

新型载流子积累的逆导型横向绝缘栅双极晶体管

Noval carrier accumulation reverse-conducting lateral insulated gate bipolar transistor

物理学报. 2024, 73(15): 157301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240572>

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

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

物理学报. 2022, 71(20): 208401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220855>

内嵌横向PNP晶体管的新型静电放电双向防护器件

Novel dual-direction electrostatic discharge device with lateral PNP transistor

物理学报. 2022, 71(23): 238501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220824>

基于锗硅异质结双极晶体管的低噪声放大器及其反模结构的单粒子瞬态数值仿真研究

Numerical simulation of single-particle transients in low-noise amplifiers based on silicon-germanium heterojunction bipolar transistors and inverse-mode structures

物理学报. 2024, 73(12): 126103 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240307>

多晶硅发射极高速双极晶体管质子单粒子效应

Proton single-event effects in high-speed polysilicon-emitter bipolar transistors

物理学报. 2025, 74(14): 148501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250276>