

# 低功耗 IGBT(LPL-IGBT) 及其仿真\*

吴 郁 陆秀洪 亢宝位 王 哲 程 序 高 琰

(北京工业大学电子信息与控制学院, 北京 100022)

**摘要:** 提出了一种新结构的 IGBT, 取名为低功耗 IGBT (LPL-IGBT), 它具有离子注入形成的超薄且轻掺杂的背 P 型发射区, 从而具有 NPT-IGBT 的优点; 同时具有由衬底预扩散残留层构成的 n 型缓冲层, 又具有 PT-IGBT 的优点。计算机仿真结果证明, 它的关断损耗比 PT-IGBT 和 NPT-IGBT 降低一倍左右。它的结构比 FSIGBT 更适合于实际生产。

**关键词:** PT-IGBT; NPT-IGBT; 通态压降; 关断损耗

**EEACC:** 2560; 2550; 1210

**中图分类号:** TN 323<sup>+</sup>. 4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2001)12-1565-07

## 1 引言

目前, 电力电子技术已进入工作频率几十 kHz 的高频时代。在此频率范围, 功率双极晶体管的开关损耗过大; 恰恰相反, 功率 VDMOSFET 的通态损耗太大。而绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)能折中兼顾, 使得开关损耗和通态损耗都不很大, 从而成为目前高频电力电子领域的主流器件。从需要来看, 目前 IGBT 的功率损耗仍然较大, 因而降低 IGBT 的功率损耗一直是国际上研究的焦点之一。目前, 这种重要的器件在国内尚没有规模生产, 仅有少量研究工作<sup>[1,2]</sup>。

1982 年 IGBT 发明之后<sup>[3]</sup>, 首先大规模制造的主要是穿通型 IGBT (PT-IGBT)<sup>[4]</sup>。PT-IGBT 具有 n<sup>+</sup> 缓冲层, 因而其 n<sup>-</sup> 基区可以较薄, 这有利于降低功率损耗, 但厚而重掺杂的背 p<sup>+</sup> 发射区造成其空穴发射效率高, 关断时电子不能从背发射区流出, 只依靠基区复合而消失, 导致其开关时间较长, 开关损耗大。出于降低高耐压器件制造成本的目的, 1988 年提出了非穿通型 IGBT (NPT-IGBT)<sup>[5]</sup>。NPT-IGBT

具有离子注入形成的超薄而轻掺杂的背 p<sup>+</sup> 区, 背发射效率较低, 关断时电子可以从背发射区流出, 因而开关时间短, 有利于降低开关损耗; 然而 NPT-IGBT 中没有 n<sup>+</sup> 缓冲层, 耐高压的需要迫使采用相对较宽的 n<sup>-</sup> 基区, 这不利于降低功率损耗。本文提出的新结构 IGBT, 既具有 n 型缓冲层, 同时又具有薄而轻掺杂的背发射区, 它同时具有 PT-IGBT 和 NPT-IGBT 的优点。用 Avanti 公司的 MEDICI 仿真工具进行了的计算机仿真, 结果证明, 新结构 IGBT 的总功率损耗比 PT-IGBT 和 NPT-IGBT 都低得多, 大约只为其一半左右。我们将其命名为低功耗 IGBT (Low Power Loss IGBT, 下文简称为 LPL-IGBT)。2000 年, 曾报道一种场中止 IGBT (FSIGBT)<sup>[6]</sup>, 其基本思想与本文提出的 LPL-IGBT 相似, 但是其 n<sup>+</sup> 缓冲层是由离子注入法制造, 特别是这一步骤是在 IGBT 芯片的正面 MOSFET 结构制造完毕之后进行的, 由于正面 MOSFET 结构的铝电极和亚微米的结深都不允许背面离子注入后再进行高温长时间退火, 所以缓冲层厚度限于 1 μm 以内。如此薄的 n<sup>+</sup> 缓冲层作为千伏以上耐高压器件的强电场的阻止层是很不可靠的, 正如该文章作者自

\* 国家自然科学基金资助项目 (69836010)。

吴 郁 男, 1970 年出生, 副教授, 在读博士研究生, 目前主要从事功率半导体器件的研究和教学工作。

陆秀洪 男, 1977 年出生, 在读硕士研究生, 目前主要从事功率半导体器件的研究工作。

亢宝位 男, 1938 年出生, 博士生导师, 教授, 长期从事功率半导体器件的研究和教学工作。

2001-02-01 收到, 2001-05-10 定稿

©2001 中国电子学会

己所指出的,其击穿电压和漏电流不易有保证,所以不适合实际生产.本文提出的 LPL-IGBT 结构中的 n<sup>+</sup> 缓冲层是在制造 MOSFET 的结构之前高温长时间扩散形成的深扩散层的残留层,其厚度为几十 μm,不存在击穿电压和漏电流不易保证的问题,因而适合于实际生产.

## 2 LPL-IGBT 的结构与制造方法

IGBT 的基本结构由正面 MOSFET、n 型基区(包含 n<sup>-</sup> 基区和 n<sup>+</sup> 缓冲层两部分)和背面 p 型发射区三大部分组成,在原理上是一个由 n 沟 MOSFET 驱动纵向 PNP 双极管的复合器件.本文提出的 LPL-IGBT 结构如图 1 所示,为比较起见,图中也给出了 PT-IGBT、NPT-IGBT 和 FSIGBT 的结构.

图 1(a) 所示的 PT-IGBT 是在 p<sup>+</sup> 单晶上外延 n<sup>+</sup> 缓冲层和 n<sup>-</sup> 基区,再于 n<sup>-</sup> 层表面区制造 MOSFET 结构而成.由于受制造方法限制,其 p<sup>+</sup> 背发射区必须足够厚以保证不碎片,并且掺杂足够高以保证电阻小,所以 p<sup>+</sup> 发射区的空穴注入效率降不下来;在 PT-IGBT 中有可以很方便的用外延法制造的 n<sup>+</sup> 缓冲层,它能使承受高压的 n<sup>-</sup> 区的强电场在

n<sup>+</sup> 区中迅速降至接近于零而终止,因而 n<sup>-</sup> 区可以较薄.图 1(b) 所示的 NPT-IGBT 是在单晶片的正面先制造 MOSFET 结构,然后从背面减薄至击穿所需 n<sup>-</sup> 层厚度之后,再用离子注入法制造 p 型背发射区而成.由于制造工序限制,NPT-IGBT 无法制造 n<sup>+</sup> 缓冲层,n<sup>-</sup> 区的强电场不能被迅速终止,所以 n<sup>-</sup> 区较宽,背发射区由离子注入形成,可以加以控制使其浓度较低且厚度较薄,以降低空穴注入效率.图 1(c) 所示的 FSIGBT 是在 n<sup>-</sup> 单晶的正面先制造 MOSFET 结构,然后从背面减薄到所需厚度后,先离子注入 n 型杂质形成缓冲层,再离子注入 p 型杂质形成背 p 型发射区而成.显然,FSIGBT 既有 PT-IGBT 中的 n<sup>+</sup> 缓冲层可使 n<sup>-</sup> 区较薄,同时又有 NPT-IGBT 薄而轻掺杂的 p 型背发射区,兼具两者的优点.但是,正如前面所指出的,FSIGBT 中的缓冲层是在正面 MOSFET 结构形成后才制作的,不能进行高温长时间退火,其结深在 1μm 以内.用这么薄的 n<sup>+</sup> 层来终止 n<sup>-</sup> 区的强电场是不可靠的,稍有材料缺陷、加工损伤等都会造成 n<sup>+</sup> 缓冲层电场终止作用的失效,导致漏电大和击穿电压低.图 1(d) 所示为本研究提出的 LPL-IGBT,其在原理上和 FSIGBT 是相似的,但具体结构和制造方法不同.

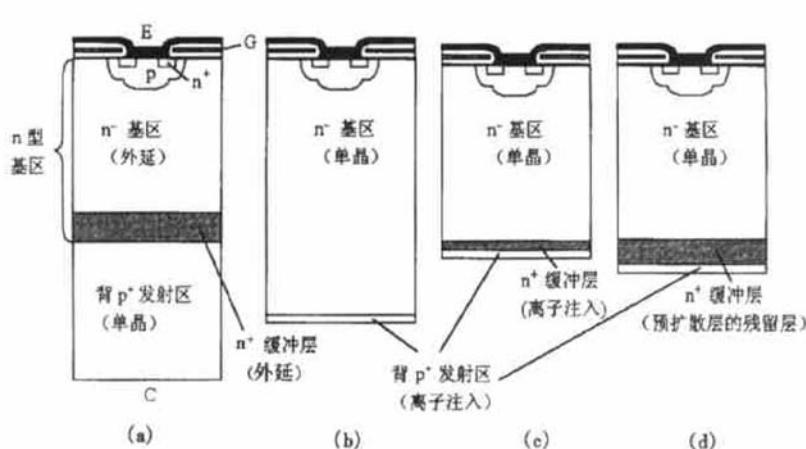


图 1 本研究提出的 LPL-IGBT 与其它已有 IGBT 的结构比较 (a) PT-IGBT; (b) NPT-IGBT; (c) FSIGBT; (d) LPL-IGBT.

FIG. 1 Schematic Structures of the LPL-IGBT and Other Previously Proposed IGBTs (a) PT-IGBT; (b) NPT-IGBT; (c) FSIGBT; (d) LPL-IGBT.

LPL-IGBT 的制造过程如下:第一步,在单晶片的两面同时制造深扩散的 n<sup>+</sup> 型预扩散层;第二步,将单面 n<sup>+</sup> 扩散层去掉,露出 n<sup>-</sup> 区;第三步,在 n<sup>-</sup> 区的表

面制造 MOSFET 结构;第四步,从 n<sup>+</sup> 扩散层的表面把片子减薄,留下适当厚度的预扩散层,我们称之为预扩散层的残留层,对残留层的厚度加以控制使

其满足作为缓冲层的要求, 约为几十微米; 最后, 再于预扩散残留层的表面用离子注入法制造背 p 型发射区。LPL-IGBT 中缓冲层具有几十微米的厚度, 克服了 FSIGBT 中缓冲层过薄的缺点, 适合于实际生产中应用, 而且 LPL-IGBT 背面 n<sup>+</sup> 缓冲层中的杂质分布造成一个从背 p 型发射区指向内部的自建场, 它有利于缩短关断过程的拖尾时间。

### 3 LPL-IGBT 的仿真

为了估价 LPL-IGBT 在性能上是否真正具有优越性以及优越性有多大, 我们对 LPL-IGBT、PT-IGBT 和 NPT-IGBT 进行了仿真, 以比较其功率损耗。

#### 3.1 仿真所用的器件结构参数

为了正确比较 LPL-IGBT 与其它类型 IGBT 之间性能的相对优劣, 在确定仿真时用的器件结构参数时以下面两点作为前提:

- (1) 各类 IGBT 的耐压都相同;
- (2) 各类 IGBT 的正面 MOSFET 结构参数都相同。

我们分别研究了耐压 2000V、1200V 的各类 IGBT。2000V 耐压的 IGBT 仿真中所取 MOSFET 结构如图 2 所示, 此结构与 Siemens 公司的产品结构大致相同。

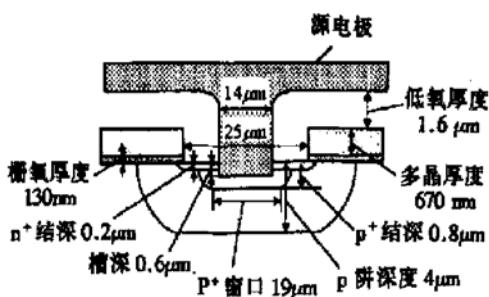


图 2 仿真中所用的耐压 2000V 的 IGBT 正面 MOSFET 结构参数

FIG. 2 Structure Parameters of Top MOSFET Used in Simulation for 2000V-IGBTs

为了仿真方便, 正面结构中的 p 阵、p<sup>+</sup>、n<sup>+</sup> 都设为由扩散形成。图中各区杂质浓度分别为: p 阵表面浓度  $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , p<sup>+</sup> 表面浓度  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , n<sup>+</sup> 表面浓度  $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 多晶硅均匀掺杂, 浓度为 5

$\times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。由于篇幅所限, 1200V 耐压 IGBT 仿真中所用 IGBT 的正面 MOSFET 结构参数不再列出。

在相同 MOSFET 结构的基础上, 要求 CE 间击穿电压相同, 则各类 IGBT 的基区(耐压层)将不尽相同。对于 NPT-IGBT 和 PT-IGBT, 其 n 基区连同背 p 区的结构参数, 我们直接参考了国外典型产品的结构参数数据, 并通过仿真验证从而最终确定; 对于 LPL-IGBT 则主要通过仿真计算而获得。例如对于耐压达到 2000V 的 IGBT, 所确定出的参数如下: (1) n<sup>-</sup> 基区参数: 掺杂浓度均为  $4.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , PT-IGBT、NPT-IGBT 和 LPL-IGBT 中的 n<sup>-</sup> 区厚度(从芯片上表面开始算起)分别为 220、350 和 220μm; (2) n<sup>+</sup> 缓冲层参数: PT-IGBT 的 n<sup>+</sup> 缓冲层厚 15μm, 掺杂浓度在  $1\text{--}8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  之间改变, 以得到不同的通态压降; LPL-IGBT 的 n<sup>+</sup> 型缓冲层为呈高斯分布的预扩散层的残留层, 杂质浓度由背面向内部逐渐降低, 与背面 p<sup>+</sup> 层交界处浓度为  $3.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 厚度为 25μm; NPT-IGBT 中无缓冲层。(3) 背 p 型发射区结构参数: PT-IGBT 中浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 厚度为 100μm, NPT-IGBT 和 LPL-IGBT 中背 p 型发射区都是离子注入形成, 结深 0.4μm, 背面 p 区的浓度在一定范围内变化, 以得到不同的通态压降。上述参数所对应的击穿特性见图 3, 由图可见其击穿电压都在 2000V 以上, 且基本相等。

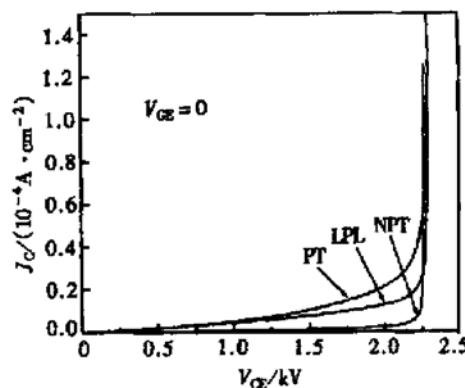


图 3 文中所述结构参数的各类 IGBT 的击穿特性

FIG. 3 Simulated Breakdown Characteristics of Different IGBTs with Structure Parameters Described in This Paper

#### 3.2 仿真选取的模型

我们的仿真所用的是美国 Avanti 公司的仿真

工具 MEDICI<sup>[7]</sup>, Avanti 的软件包中有许多应用模型可以选取. 我们按照器件的实际需要选取了以下模型: 考虑了通过复合中心复合的 SRH 复合模型 CONSRH(包含了与掺杂浓度的关系); 考虑了重掺杂的禁带变窄模型 BGN; 俄歇复合模型 AUGER 和隧穿模型 R. TUNNEL; 考虑了掺杂和温度作用的费米-狄拉克分布 FERMI-DIRAC 和不完全电离模型 IM COMPLETE; 考虑了掺杂浓度和温度影响的迁移率模型 ARORA; 分别考虑与电流方向垂直的电场和与电流方向平行的电场对迁移率的影响的迁移率模型 PRPMOB 和 FLDMOB; 碰撞电离模型 IMPACT. I.

### 3.3 仿真所用的数值方法

仿真所用的数值方法是通用的方法, 即将器件结构离散化, 在各个网格点附近求解泊松方程和连续性方程, 用牛顿法反复迭代求解. 器件的左、右边界取为反射边界条件, 即假定非接触边界处为镜像反射.

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 功率损耗的仿真结果

由于 IGBT 结构参数可以改变通态压降和开关时间, 其中一个减小时另一个就必然同时增大. 因此, 在比较两类器件的性能时, 通常是以通态压降  $V_{CEon}$  和关断损耗  $E_{off}$  之积来表示其总功耗的大小, 更直观的是以  $V_{CEon}$  和  $E_{off}$  作为坐标轴的关断损耗-通态压降曲线来表示.

用图 4 所示的电路对耐压 2000V 各类 IGBT 的关断损耗进行了仿真, 仿真结果示于图 5. 1200V 耐压 IGBT 仿真中所用电路与上图相似, 只是电路中栅极电阻改为  $47\Omega$ ,  $V_{DD}$  改为 600V, 由于篇幅所限不再详细画出.

从图中可以看出 PT-IGBT 和 NPT-IGBT 的关断损耗大体相同, 只是一个适于低耐压区, 另一个适于高耐压区. 而本文提出的 LPL-IGBT 的关断损耗远低于 PT 型和 NPT 型 IGBT. 例如, 在  $V_{CEon} = 3V$  时, PT 型、NPT 型和 LPL 型 IGBT 的  $E_{off}$  分别为 6.79、6.32 和 3.5mJ. 也就是说, LPL 型分别为 PT 型和 NPT 型的 51.5% 和 55.4%. 可以粗略地说, LPL-IGBT 的关断损耗只为 PT-IGBT 和 NPT-IGB-

BT 型的一半左右.

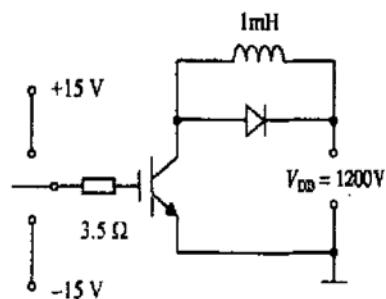


图 4 IGBT 开关特性仿真中所用电路图

FIG. 4 Circuit Scheme Used in Switch Characteristic Simulations

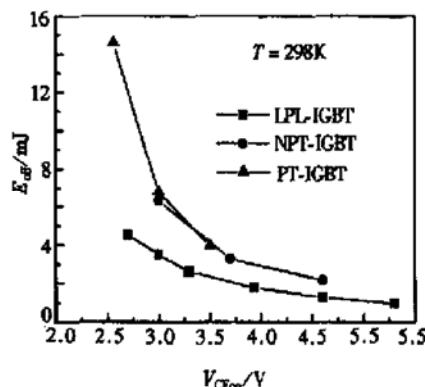


图 5 耐压 2000V 的各类 IGBT 功耗仿真结果比较

FIG. 5 Plots of  $E_{off}$  Versus  $V_{CEon}$  for Different 2000V-IGBTs

为了观察这一结论的普遍性, 我们对耐压 1200V 的 IGBT 的关断损耗也进行了仿真, 结果示于图 6. 由图可见, LPL-IGBT 型的关断损耗不论是

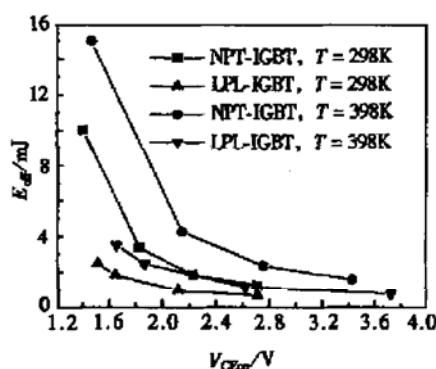


图 6 耐压 1200V 的 LPL-IGBT 与 NPT-IGBT 功耗的仿真结果比较

FIG. 6 Plots of  $E_{off}$  Versus  $V_{CEon}$  for Different 1200V-IGBTs

在 298K 下还是在 398K 下都远低于 NPT-IGBT。例如, 在  $T = 298\text{K}$ ,  $V_{\text{CEon}} = 2\text{V}$  时, LPL-IGBT 与 NPT-IGBT 的  $E_{\text{off}}$  分别约为  $1.2\text{mJ}$  和  $2.7\text{mJ}$ ; 在  $T = 398\text{K}$ ,  $V_{\text{CEon}} = 2.2\text{V}$  时 LPL-IGBT 与 NPT-IGBT 的  $E_{\text{off}}$  分别为  $2.1\text{mJ}$  和  $4.3\text{mJ}$ 。也就是说, 无论在  $T = 298\text{K}$  还是在  $T = 398\text{K}$  下, LPL-IGBT 的关断损耗都只是 NPT-IGBT 的一半甚至更小。

#### 4.2 仿真结果的分析

为了深入理解各类 IGBT 在功耗性能方面的差别, 下面对仿真过程中的一些中间结果进行分析。

图 7 给出了耐压 2000V 的 IGBT 在导通状态下(通态压降同为 3V) n 型区(包含  $n^-$  区和  $n^+$  缓冲层)中过剩载流子  $\Delta n$ 、 $\Delta p$  ( $\Delta n$ 、 $\Delta p$  分别为电子和空穴浓度与热平衡浓度之差, 按电中性条件应有  $\Delta n = \Delta p$ ) 的分布。需要注意, 对于 PT-IGBT、LPL-IGBT 和 NPT-IGBT 耐压 2000V 所要的  $n^-$  区的厚度是不同的, 它们分别为 235、245 和 350μm。LPL-IGBT 和 NPT-IGBT 不需高能粒子辐照, 所以过剩载流子寿命长, 载流子浓度分布平坦; PT-IGBT 需高能粒子辐照因而载流子寿命短, 载流子浓度梯度大。从图中可以看出, n 型区中积累的过剩载流子总量以 LPL-IGBT 最少。所以, 在关断过程中需要流出和复合掉的少子总量以 LPL-IGBT 为最少, 这是 LPL-IGBT 关断时间短和关断损耗小的原因之一。

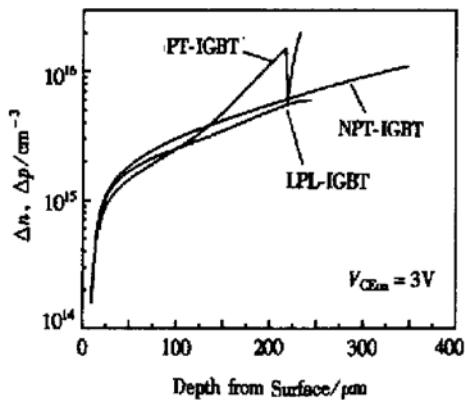


图 7 在导通状态下各类 IGBT 的 n 型区中过剩载流子浓度分布

FIG. 7 Carrier Profiles in n-Type Regions of Different IGBTs in on-State

图 8 是关断过程中 n 型区过剩载流子浓度分布随时间变化的仿真结果。在关断过程中过剩空穴很容易从正面流出, 所以电子-空穴对的消失速率实际

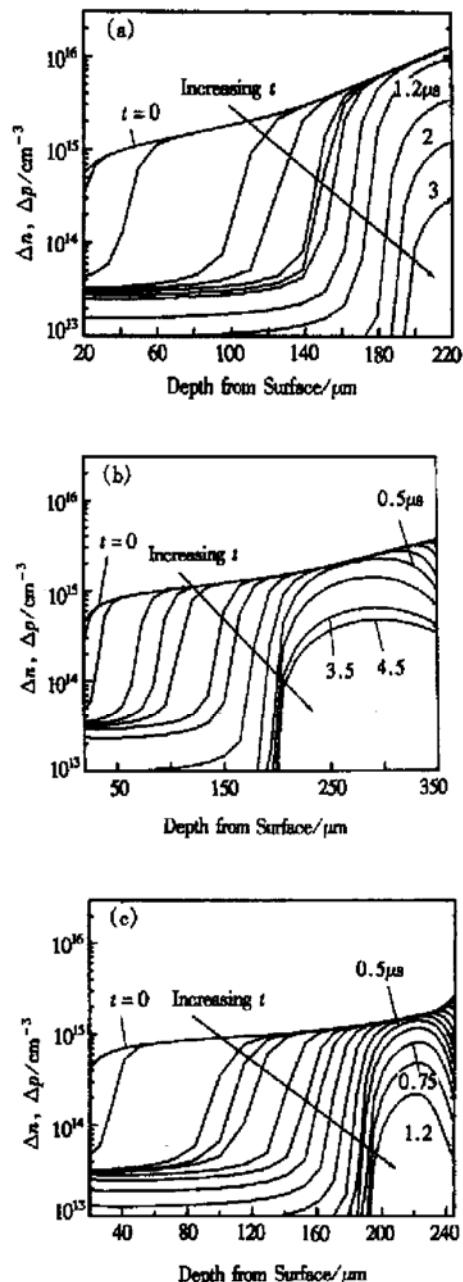


图 8 关断过程中 n 型区过剩载流子浓度分布随时间的变化 (a) PT-IGBT; (b) NPT-IGBT; (c) LPL-IGBT

FIG. 8 Carrier Profile Variations with Time During Turn-Off for Different IGBTs  
(a) PT-IGBT; (b) NPT-IGBT; (c) LPL-IGBT

上取决于电子的消失速率。由图看出, PT-IGBT 中 n 型区过剩载流子浓度梯度始终指向器件正面, 而在其他两种 IGBT 中邻近背发射区处的浓度梯度与之相反, 也就是说, 对于 PT-IGBT, 由于背发射区发射效率极高, 关断时只是依靠电子空穴的原地复合来消失, 而在其他两种 IGBT 中, 由于背发射区效率

低, 电子流成分大, 在关断过程中, 有明显的附加电子扩散流帮助电子从背发射区流出, 从而加速了导通时 n 型区积累的过剩电子-空穴对的消失, 缩短了关断时间.

图 9 是关断过程中集电极电流随时间变化的仿真结果. 由图可见, LPL-IGBT 比 PT-IGBT 的电流下降速度快得多, 因而关断时间和关断损耗都小得多. 这主要是由于前述的 LPL-IGBT 中过剩电子可以从背面流出而消失, 而 PT-IGBT 中只能依靠原地复合来消失, 消失速率较慢. 另外, LPL-IGBT 在导通时存储的过剩电子-空穴对少, 也是开关时间短的一个次要的原因.

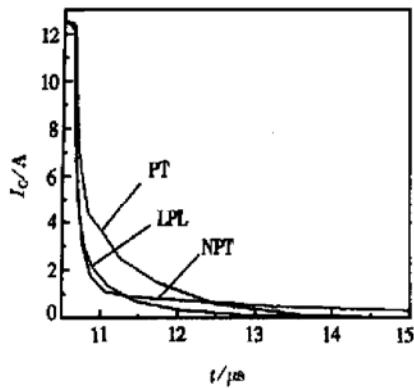


图 9 关断过程中电流随时间变化的比较

FIG. 9 Current Variations with Time During Turn-Off for Different IGBTs

从图中同时可以看到, LPL-IGBT 比 NPT-IGBT 的拖尾电流和拖尾时间小得多, 其原因是 LPL-IGBT 中 n<sup>-</sup> 区存储的过剩载流子比 NPT-IGBT 中少, 而且位置更靠近 p 型背发射区; 此外, LPL-IGBT 中缓冲层中杂质缓变分布形成的自建电场对电子的流出是一个加速场, 这也是促使电流拖尾变短的一个原因.

综上所述, LPL-IGBT 的功率损耗小于 NPT-IGBT 和 PT-IGBT 的原因可以归纳为: (1) LPL-IGBT 的 n<sup>-</sup> 区较薄, 在导通时存储于其中的过剩载流子数量较少, 关断时消失所需时间短; (2) 背发射效率低, 关断过程中电子可以从背发射区流出, 不只是依靠原地复合来恢复平衡态; (3) 缓冲层中杂质分

布形成的自建场有助于在关断末期的拖尾阶段加速电子从背发射区流出, 加大了拖尾阶段的流出电流, 减小了拖尾时间. 以上三个优点是其它现有各种 IGBT 所不能同时具备的, 因而 LPL-IGBT 的功率损耗低于现有各种类型的 IGBT.

## 5 结论

本文提出了一种新结构的 IGBT——低功耗 IGBT, 通过计算机仿真证明它的关断损耗明显低于现有的 NPT-IGBT 和 PT-IGBT, 大约减小一半, 并且通过对仿真过程中载流子分布变化和电流变化的分析, 基本上理清了功率损耗小的原因是: 较窄的 n<sup>-</sup> 区使导通时存储于其中的电荷总量少, 低注入效率背发射区使关断时电子可从背发射区流出, 以及缓冲层中缓变杂质分布形成的自建场能加速拖尾阶段电子的抽出.

致谢 感谢 Avanti 公司的 TCAD 仿真工具对于我们工作的帮助.

## 参考文献

- [ 1 ] LI Ru-chun, CHEN Qu-fei and CHEN Qi-xiu, Chinese Journal of Semiconductors, 1995, **16**(11): 869—873 (in Chinese)  
[ 李如春, 陈去非, 陈启秀, 半导体学报, 1995, **16**(11): 869—873].
- [ 2 ] HE Jin, WANG Xin and CHEN Xing-bi, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21**(9): 877—881 (in Chinese) [ 何进, 王新, 陈星弼, 半导体学报, 2000, **21**(9): 877—881].
- [ 3 ] B. J. Baliga, Modern Power Devices, Wiley, 1987: 354.
- [ 4 ] H. Yilmaz et al., IEEE Trans. Ind. Appl., 1986, **22**(3), 466—470.
- [ 5 ] G. Miller, J. Sack, A New Concept for a Non Punch Through IGBT with MOSFET Like Switching Characteristics, IEEE PESC, Record 1, 1989: 21—25.
- [ 6 ] T. Laska, M. Munzer, F. Pfirsch, C. Schaeffer, P. Lschmidt, The Field Stop IGBT (FSIGBT)—A New Power Device Concept with Great Improvement Potential, Proc. of the 12th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, 2000: 355—358.
- [ 7 ] MEDICI version 1999.4 User's Manual, 2000.

## A Novel Low Power Loss IGBT (LPL-IGBT) and Its Simulation<sup>\*</sup>

WU Yu, LU Xiu-hong, KANG Bao-wei, WANG Zhe, CHENG Xu and GAO Yan

(Department of Electronic Science & Technology, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

**Abstract:** A new structure IGBT, named Low Power Loss IGBT (LPL-IGBT) is proposed. It keeps the advantages of NPT-IGBTs because of its very thin and lightly doped p-type back emitter formed using ion implantation. Meanwhile, it also takes the advantages of PT-IGBTs due to its n-type buffer layer which is the residual layer of the pre-diffused n<sup>+</sup> region at the back-side of the n<sup>-</sup> substrate. Simulation results show that its turn-off power loss is almost a half of that of the PT-IGBT or NPT-IGBT. Furthermore, its structure is more suitable for practical production than FSIGBT.

**Key words:** PT-IGBT; NPT-IGBT; on-state voltage; turn-off power loss

**EEACC:** 2560; 2550; 1210

**Article ID:** 0253-4177(2001)12-1565-07

\* Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69836010.

WU Yu male, was born in 1970. He is a associate professor. His research interests is in power semiconductor devices and ICs.

LU Xiu-hong male, was born in 1977. He is a postgraduate student. His research interests is in power semiconductor devices.

KANG Bao-wei male, was born in 1938. His research interests are in power semiconductor devices and high speed devices.