

门极换向晶闸管阳极透过率的优化设计

王 颖, 朱长纯, 吴春瑜, 刘兴辉

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用数值模拟方法研究了缓冲层和透明阳极的结构参数对阳极透过率的影响. 结果表明: 透明阳极在较小的电流密度情况下具有较低的透过率, 随着电流密度的增大透过率显著提高, 即透明阳极的透过率依赖于阳极的电流密度; 降低透明发射极或提高缓冲层掺杂水平, 透过率也会提高; 减小阳极的结深, 透过率也会提高. 因此, 可以通过恰当地选择缓冲层和透明阳极的结构参数来调整阳极透过率, 使之达到期望值, 进而提高器件的关断性能.

关键词: 门极换向晶闸管; 缓冲层; 透明阳极; 透过率

中图分类号: TN342.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)02 - 0167 - 03

Optimal Design of Transparency of Anode Emitter in Gate Commutate Thyristor

Wang Ying, Zhu Changchun, Wu Chunyu, Liu Xinghui

(School of Electronics and Information Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: Numerical simulations have been employed to investigate the effect of the material parameters of the buffer layer and transparent emitter on the transparency of the transparent emitter of gate commutate thyristor. The results obtained show that the transparent emitter is a p-n junction with the transparency depending on the current density. The transparency is low at lower current density while it drastically increases with the current density. With the doping level increasing of the buffer layer or decreasing of the transparent emitter under the condition that keeping other parameters constant, the transparency increases. And the transparency becomes larger when the junction depth of transparent emitter width decreases. Based on the simulation results, the transparency can be controlled and adjusted to the desired level by varying the material parameters of the buffer layer and transparent emitter properly.

Key words: gate commutate thyristor; buffer layer; transparent emitter; transparency

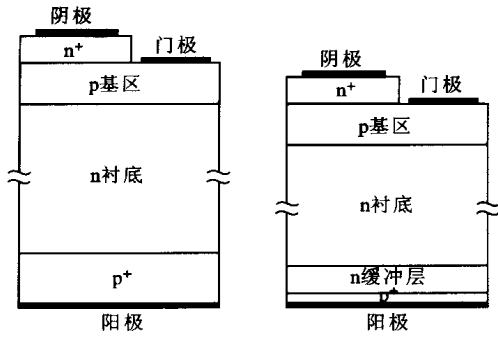
门极换向晶闸管(GCT)是在汲取门极可关断晶闸管(GTO)和绝缘栅双极晶体管(IGBT)较为成熟的发展经验基础之上发展起来的一种新型功率半导体器件,在工业应用中有望成为 GTO 的替代产品^[1].图 1 给出了 2 种器件的单元结构示意图,从图中可看出缓冲层和透明阳极相结合是 GCT 所采用的有别于 GTO 的一项关键技术^[2].其中,缓冲层的引入不仅可以降低器件的峰值电场,而且在相同的耐压水平下可使硅片的厚度大大减小,从而降低器件的导通和开关损耗.透明阳极是掺杂均匀且掺杂

水平较低的薄发射极,这种结构使得部分电子在金属接触界面复合而不引起空穴的注入^[3].透明阳极的透过率在一定程度上决定了器件的关断能力,因此研究缓冲层和透明阳极的结构参数对阳极透过率的影响就显得十分必要.

1 数学方法

半导体器件的电学特性通常由泊松方程、电流连续性方程和电流密度方程来描述.在模型方程和边界条件中包含的一些物理参量,如载流子迁移率、

收稿日期: 2003 - 06 - 17. 作者简介: 王 颖(1977 ~),男,博士生;朱长纯(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60036010;60176020).



(a) 第 1 种 (b) 第 2 种
图 1 2 种器件的单元结构示意图

有效本征载流子浓度等在一般情况下并不是常数, 它们往往与载流子浓度、杂质分布以及电场有关, 所以必须对这些物理量使用较精确的模型. 采用有限差分法对半导体器件进行一维稳态模拟的过程, 实际上是采用迭代方法对矩阵矢量方程进行求解的过程, 即在内部电子、空穴和电势初值 n_0 、 p_0 、 ϕ_0 的基础上, 对其不断进行迭代与修正, 直到相应的变化量 n 、 p 、 ϕ 均小于设定的收敛精度. 运用有限差分近似求解这些描述器件的电学特性偏微分方程, 得到一组高阶稀疏方程, 可将其表示成矩阵的形式

$$[A][\psi] = [B]$$

式中: $[A]$ 为由差分节点间距组成的三对角系数矩阵; $[\psi]$ 为差分节点的静电势; $[B]$ 包含了施主杂质、受主杂质、电子和空穴浓度^[4]. 再运用 LU 分解法求解高阶稀疏方程组, 同时解出内部电势、电子和空穴浓度, 进而求得空穴电流密度 J_p 和电子电流密度 J_n . 将透明阳极的透过率定义为

$$T = \frac{J_n}{J_p + J_n}$$

式中: J_n 为阳极发射极的电子电流密度; $J_p + J_n$ 为阳极发射极电流密度.

2 模拟结果与分析

运用上述求解方法, 得到了透过率与阳极发射极电流密度对应的关系. 表 1 列出了在模拟中用到的基本参数.

通常用双晶体管模型来分析 GCT 的工作过程. 当 GCT 关断时, 通过打开一个与阴极串联的开关 (通常是金属 - 氧化物 - 半导体场效应晶体管 (MOSFET)), 使 p 基极与 n 发射极形成的结反偏, 从而迅速阻止阴极注入电荷, 整体的阳极电流便迅速转化为门极电流 (通常在 1 μ s 内), 把 GCT 转化为一个无接触基区的 pnp 晶体管, 阴极发射极的正

反馈作用被阻止, 当 n 型区的剩余载流子消失后, GCT 也就均匀关断了.

表 1 缓冲层和透明阳极的基本结构参数

	峰值掺杂浓度/ cm^{-3}	结深/ μm
缓冲层	5×10^{16}	15.0
透明阳极	1×10^{19}	2.0
传统阳极	1×10^{20}	20.0

图 2 所示为透明阳极和传统阳极的透过率随发射极电流密度的变化关系. 从比较中可以看到, 在较小的电流密度情况下, 透明阳极和传统阳极均具有较低的透过率, 这使得 GCT 在开通时的门极触发电流大大降低. 随着电流密度的增大, 透明阳极的透过率迅速提高. 因此, 当 GCT 关断时, 电子会通过透明阳极而得到有效地抽取, 大大缩短了拖尾过程. 对于透明阳极而言, 由于阳极附近的电子具有较大的浓度梯度, 加之存在的强电场, 使得电子更容易到达阳极电接触^[5,6]. 实际上, 传统的 GTO 采用阳极短路结构来达到相同的效果, 但这会增大门极触发功率. 图 3 所示为以透明阳极结深为参量的透过率与发射极电流密度的关系. 在其他基本参量不变的条件下, 随着发射极结深从 2.0 μm 减小到 1.0 μm , 透过率逐渐增大, 但透过率下降的幅度不大, 这说明在一定的透明阳极结深范围内, 透过率受阳极结深的调制作用较小.

透明阳极的掺杂浓度对透过率的影响如图 4 所示. 在其他基本参数不变的情况下, 透明阳极的峰值掺杂浓度分别取 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 和 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$. 从图中可以看到, 随着阳极掺杂水平的提高, 透过率显著降低. 对于结深较浅、掺杂水平较低的阳极发射极, 会发生阳极端的欧姆接触向整流接触的转变^[7]. 因此, 透过率不易取过大, 而应根据

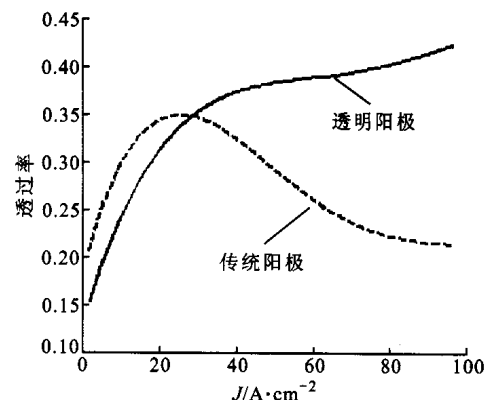


图 2 传统阳极与透明阳极透过率比较

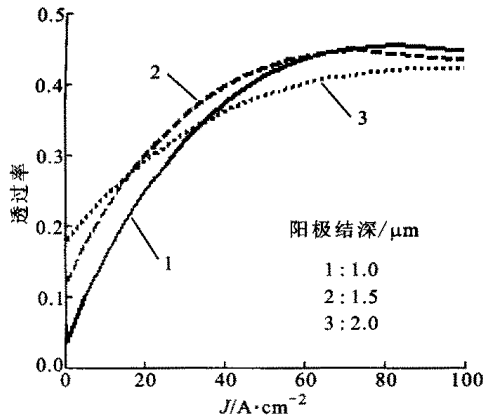


图3 阳极结深对透过率的影响

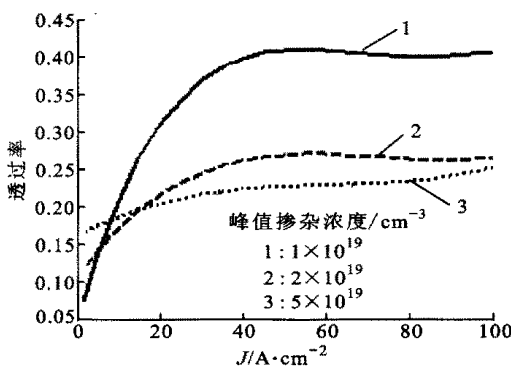


图4 阳极峰值掺杂浓度对透过率的影响

实际情况调整在一个合适的值。

缓冲层表面的掺杂水平对透过率的影响如图5所示。缓冲层峰值掺杂浓度分别取 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，在其他基本参数不变的情况下，分别以这3种掺杂浓度为参量进行模拟。结果表明，透过率随掺杂水平的提高而提高，具有较高掺杂水平的缓冲层降低了注入到漂移区的空穴量，这就减少了器件在导通时漂移区内的存储电荷。同时，通过增加缓冲层的掺杂量，可使该区的载流子寿命大大降低。在器件的关断过程中，缓冲层成为有效的电子-空穴复合中心，大大提高了器件的关断速度，但同时也增大了门极触发功率和通态损耗。所以，在选择缓冲层掺杂水平时要兼顾正向压降和关断时间。

通常，由于缓冲层的厚度由器件的耐压水平及通态压降决定，所以对透明阳极的透过率的调节作用较弱，但可以采用双层缓冲区结构，靠近阳极侧的缓冲层较薄且掺杂水平较高，主要起调节透过率的作用，同时与靠近n基区的缓冲层共同阻挡耗尽区的扩展。缓冲层的杂质分布和峰值掺杂浓度随着透明阳极的杂质分布及结深而变化。在建立阳极电压

后，缓冲层阻挡了空间电荷区的进一步扩展，而在缓冲层中余下的没有空间电荷区的空间内存在少量的存储电荷，由于这部分区域的电场较小，很难漂移到阳极的电接触处，所以只能通过复合而消失。随着缓冲层结深的增加，这部分存储电荷增多，延长了拖尾过程，不利于器件的关断。

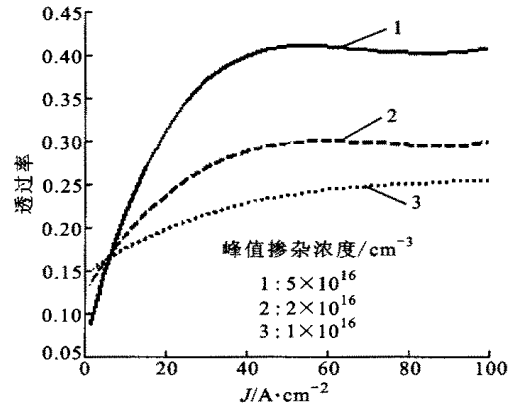


图5 缓冲层峰值掺杂浓度对透过率的影响

3 结论

本文采用数值模拟的方法研究了缓冲层和透明阳极的结构参数对阳极透过率的影响。模拟结果表明：透明阳极和传统阳极在较小的电流密度情况下均具有较低的透过率，随着电流密度的增大透过率显著提高，即透明阳极的透过率依赖于阳极的电流密度；降低透明发射极或提高缓冲层掺杂水平，透过率也会随之提高；减小阳极的结深，透过率也会随之提高。因此，可以通过恰当地选择缓冲层和透明阳极的结构参数来达到调整阳极透过率至期望值的目的。采用透明阳极和缓冲层相结合的结构，使得器件在关断时，剩余载流子将通过透明阳极到达阳极电接触处复合而消失，缩短了缓慢的拖尾过程，提高了器件的关断能力。

参考文献：

- [1] Apeldoorn O, Carroll E, Nagel A, et al. IGCT technology baseline and future opportunities [A]. Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE/ PES, Atlanta, USA, 2001.
- [2] Eicher S, Bauer F, Weber A, et al. Punchthrough Type GTO with buffer layer and homogeneous low efficiency anode structure [A]. The 8th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, Maui, USA, 1996.

(下转第 185 页)

表 1 掺杂硅与未掺杂硅的镁铝水滑石试样的 DSC 热分析结果

镁铝水滑石试样	第 1 次分解		第 2 次分解	
	吸热温度/ /J g ⁻¹	DSC 吸热值 /J g ⁻¹	吸热温度/ /J g ⁻¹	DSC 吸热值 /J g ⁻¹
未掺杂硅	170.9 ~ 223.1	284.3	296.2 ~ 442.4	1 865.7
掺杂硅	170.1 ~ 227.5	218.0	305.5 ~ 468.5	1 848.8

表 2 掺杂硅与未掺杂硅的镁铝水滑石试样的 TG 分析结果

	掺杂硅	未掺杂硅
第 1 次质量损失率/ %	12.10	12.9
第 2 次质量损失率/ %	26.31	31.0

3 结 论

(1) 以铝酸钠为铝源,可以在制备镁铝水滑石的工艺过程中进行硅离子的掺杂,得到纯度大于 98% 的镁铝水滑石试样. 硅掺杂后,硅离子进入到镁铝水滑石带正电荷的基本层中的羟基八面体空间,成功制备出了一种新的含[SiO₆]八面体的镁铝水滑石化合物.

(2) 掺杂硅后的镁铝水滑石试样的晶粒粒度减小,试样颜色由白色变为淡蓝色. 掺杂硅后所得的镁铝水滑石试样的第 2 次热分解过程的热分解温度范围得到拓宽,最终热分解物的残余量得到提高,从而

提高了镁铝水滑石阻燃剂的热稳定性.

参考文献:

- [1] 付步芳. 新型阻燃剂发展概况[J]. 广西化工, 1999, 28 (3): 29 ~ 31.
- [2] Ren Qingli, Luo Qiang, Wu Hongcai, et al. The preparation and thermal property of the acicular Mg, Al-hydroxalcalite[J]. Key Engineering Materials, 2002, 224 - 226: 237 ~ 241.
- [3] Ren Qingli, Luo Qiang, Liu Daizhi, et al. Mechanism of forming the nanocrystalline Mg, Al-hydroxalcalite and its crystal processing under hydrothermal conditions[J]. Materials Science Forum, 2003, 423 - 425: 151 ~ 156.
- [4] Angelo V. Preparation and catalytic properties of cationic and anionic clays[J]. Catalysis Today, 1998, 41: 53 ~ 71.
- [5] 黎鲍 F. 硅酸盐结构化学: 结构、成键和分类[M]. 席耀忠, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [6] 赵杏媛, 张有瑜. 粘土矿物与粘土矿物分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [7] Hernandez Moreno M J, Ulibarri M A, Rendon J L, et al. IR characteristics of hydroxalcalite-like compounds[J]. Phys Chem Minerals, 1985, 12: 34 ~ 38.
- [8] 仲维卓, 华素坤. 晶体生长形态学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [9] 许乾慰, 阮金望. Al₂O₃·3H₂O 和 Mg(OH)₂ 在 HDPE 中阻燃机理的热分析研究[J]. 高分子材料科学与工程, 1990, 6(2): 61 ~ 66.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 169 页)

- [3] Steimer P K, Gruning H E, Werninger J, et al. IGCT - a new emerging technology for high power, low cost inverters [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1999, 5(4): 12 ~ 18.
- [4] Christopher M S. Introduction to semiconductor device modeling [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 1986. 76 ~ 79.
- [5] Eicher S, Bauer F, Zelle H R, et al. Design considerations for a 7 kV/3 kA GTO with transparent anode and buffer layer [A]. The 27th Annual IEEE on Power Electronics Specialists Conference, Baveno, Italy, 1996.

- [6] Bauer F, Dettmer H, Fichtner W, et al. Design considerations and characteristics of rugged punch-through (PT) IGBTs with 4.5 kV blocking capability [A]. The 8th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, Maui, USA, 1996.
- [7] Bauer F, Fichtner W, Dettmer H, et al. A comparison of emitter concepts for high voltage IGBTs [A]. The 7th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, Yokohama, Japan, 1995.

(编辑 刘 杨)