

# 少数载流子寿命横向非均匀分布的快恢复二极管特性\*

潘飞蹊<sup>1</sup> 黄 林<sup>2</sup> 廖天康<sup>2</sup> 游志朴<sup>2</sup>

(1 电子科技大学微电子所, 成都 610054)

(2 四川大学物理系, 成都 610064)

**摘要:** 提出了一种快恢复二极管新结构: 少数载流子寿命横向非均匀分布(minority-carrier life time lateral non-uniform distribution, MLD) 结构。利用普通的 p<sup>+</sup>nn<sup>+</sup> 二极管芯片, 通过掩蔽扩散选择性地掺入深能级杂质, 制备出了掺 Au、Pt 的 MLD 快恢复二极管。测试结果表明, 虽然这种快恢复二极管正向压降-反恢复时间兼容特性略差, 且反向漏电流较大, 但是具有十分良好的反恢复时间-温度的稳定特性, 可以用于对反恢复时间变化要求严格的领域。

**关键词:** 少数载流子寿命; V<sub>F</sub>-t<sub>rr</sub> 兼容特性; 反向漏电流; t<sub>rr</sub>-T 稳定特性

**PACC:** 7220J; 8140R

中图分类号: TN 32

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)03-0297-05

## 1 引言

快恢复二极管是一类很重要的开关器件, 目前已在各种电子设备特别是开关电源中广泛应用。随着器件工作频率的不断提高, 对快恢复二极管的各项指标的要求也不断提高。由于快恢复二极管本身存在着速度与功耗之间的矛盾, 因而在所有指标之间必须折中考虑进行优化, 其中对正向压降-反恢复时间(V<sub>F</sub>-t<sub>rr</sub>) 兼容特性、反向漏电流-温度(I<sub>R</sub>-T) 特性的研究最为广泛<sup>[1~6]</sup>, 而对反恢复时间-温度(t<sub>rr</sub>-T) 稳定特性的关注较少。近年来, 由于开关电源的工作频率的不断提高, 快恢复二极管工作时温度上升导致t<sub>rr</sub>值升高的问题也逐渐引起了人们的重视。国外的一些产品手册中, 除了给出室温下的t<sub>rr</sub>值外, 已经对100℃下的t<sub>rr</sub>值作出了限制<sup>[11]</sup>。很明显, 良好的t<sub>rr</sub>-T稳定特性将有助于提高相关整机的可靠性。

实际生产中, 常利用掺 Au、Pt 及辐照引入深能级复合中心来控制少数载流子寿命<sup>[5~10]</sup>。在关于不同的深能级杂质对器件特性的影响问题上, Baliga

发展了最佳寿命控制杂质的选择理论<sup>[3~6]</sup>, 此外, 人们也探索和研究了各种器件结构来改善快恢复二极管的性能, 如 Baliga 等人提出的 MPS 结构<sup>[12]</sup>, Shimizu 等人提出的 SSD 结构<sup>[13]</sup>及 Temple 等人提出的优化的纵向少数载流子寿命分布结构<sup>[14]</sup>。

Temple 等人提出的优化纵向少数载流子寿命分布结构<sup>[14]</sup>, 通过在器件基区内部引入一层或多层薄的高复合区来改善高速器件的V<sub>F</sub>-t<sub>rr</sub>兼容特性。受这方面工作的启发, 我们提出了一种新的结构, 即少数载流子寿命横向非均匀分布(minority-carrier life time lateral non-uniform distribution, MLD) 结构。我们设想, 如果在二极管的n型基区中引入横向非均匀分布的深能级杂质, 应该对快恢复二极管的各项特性产生影响。与纵向少数载流子寿命优化<sup>[14]</sup>不同, 我们通过对深能级杂质的选择性掩蔽扩散, 在p<sup>+</sup>nn<sup>+</sup>型二极管的n型基区内部引入横向非均匀分布的深能级复合中心, 从而制备出了具有少数载流子寿命横向非均匀分布结构的快恢复二极管。

本文报道了对这种新的快恢复二极管的实验研究结果。实验发现, 普通均匀掺 Au、Pt 的快恢复二

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69676034)

潘飞蹊 男, 1970 年出生, 博士研究生, 主要从事半导体器件及电路设计研究。

游志朴 男, 1940 年出生, 教授, 主要从事半导体材料、杂质、缺陷及器件的研究。

2003-03-06 收到, 2003-04-30 定稿

© 2004 中国电子学会

极管的反向恢复时间  $t_{rr}$  值随温度的升高而大幅度上升,但是具有 MLD 结构的快恢复二极管的  $t_{rr}$  值仅有少量的增加,从而显示出良好的温度稳定性。由于功率二极管工作时经常处于较高的结温之下,因此本工作的结果可用于研制具有高温度稳定性的快恢复二极管中。

## 2 实验

### 2.1 样品制备

实验的原始材料选取电阻率为  $30\sim 50\Omega \cdot \text{cm}$  的 n 型直拉(CZ) 硅单晶磨片, 直径为 76mm, 厚度为  $250\pm 5\mu\text{m}$ 。采用高纯磷(P40)、硼(B15) 纸片源, 在  $1250^\circ\text{C}$  下一次扩散形成  $\text{p}^+ \text{nn}^+$  二极管芯片结构, 其中 n 型基区宽度约为  $80\mu\text{m}$  左右。

然后对制得的二极管芯片硼面进行喷砂处理, 清洗后一部分芯片直接在  $860\sim 900^\circ\text{C}$  下扩散 Au 或 Pt, 制成不同  $t_{rr}$  值的普通均匀掺杂的快恢复二极管芯片。另一部分则先在  $1200^\circ\text{C}$  下用干氧-湿氧-干氧的方法氧化生成约  $1\mu\text{m}$  厚的氧化层; 再利用光刻技术在二极管芯片的硼面生成尺寸如图 1 所示的等间距圆形掩蔽图形, 去胶清洗后再在  $900\sim 950^\circ\text{C}$  下扩散 Au 或 Pt, 制成不同  $t_{rr}$  值的 MLD 二极管芯片。所有的扩散都在高纯氮气的保护下进行。

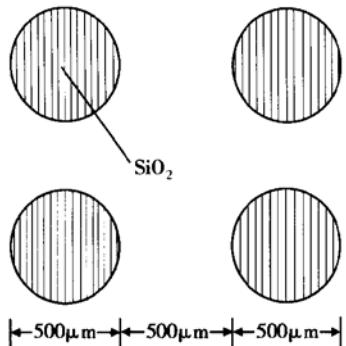


图 1  $\text{SiO}_2$  掩蔽层图形

Fig. 1  $\text{SiO}_2$  lithographic layout

为了验证  $\text{SiO}_2$  对 Au、Pt 的掩蔽能力, 我们还用整块覆盖有  $\text{SiO}_2$  氧化层的二极管芯片进行了对比扩散, 证实  $\text{SiO}_2$  氧化层对 Au、Pt 均能产生良好的掩蔽作用。

尽管 Au、Pt 等重金属杂质在硅中的扩散速度很快, 可以产生很强的横向扩散作用, 但是因为留下

的掩蔽  $\text{SiO}_2$  氧化层具有较大的宽度, 因而 Au、Pt 杂质不会在二极管芯片内部形成完全均匀的分布。这样, 便可以制得如图 2 所示的在横向(x 方向)深能级杂质浓度非均匀分布的二极管芯片, 实现了少数载流子寿命在横向非均匀分布。为了简单起见, 我们可以将样品芯片看成由“短寿命区”( $-a_1\sim 0$ ) 和“长寿命区”( $0\sim a_2$ ) 相间隔组成, 并近似地认为两个区域内的少子寿命分别是均匀的。

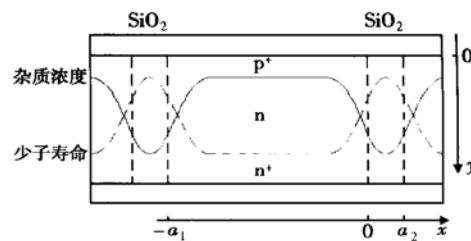


图 2 MLD 二极管结构

Fig. 2 MLD diode structure

当 Au、Pt 扩散完毕后, 对样品芯片再进行双面喷砂处理, 在镀 Ni 合金, 再镀 Ni 后制成完整的快恢复二极管芯片。然后划片制为  $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$  的样管芯片, 经引线烧结和封装后制成完整的快恢复二极管样管。

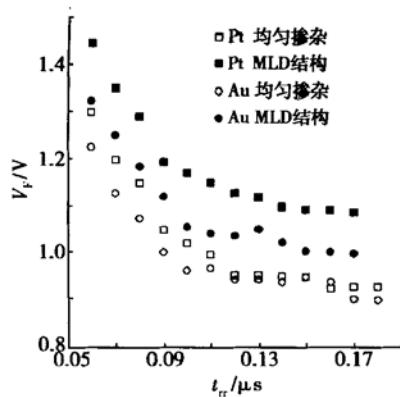
### 2.2 测试

反向恢复时间  $t_{rr}$  的测试用 BS4321 型二极管恢复时间测试仪测量, 精度为  $\pm 5\text{ns}$ , 测试条件为正向注入电流  $50\text{mA}$ , 反向抽取电压  $10\text{V}$ , 串联  $75\Omega$  的负载电阻。正向压降  $V_F$  的测试用 BS4121 二极管正向压降测试仪测量, 精度为  $\pm 0.01\text{V}$ 。反向漏电流的测试系统由高压电源和 JED-12 型高精度数字电流计组成, 测试条件为  $V_R=600\text{V}$ 。温度控制用自制的变温槽进行, 控温精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

## 3 结果及讨论

### 3.1 $V_F-t_{rr}$ 兼容特性

二极管的正向压降  $V_F$  决定了二极管导通工作时的功耗, 因而快恢复二极管的  $V_F-t_{rr}$  兼容特性一直是评价其性能的一项重要指标。我们在制得的均匀掺杂样管和 MLD 样管中, 选取室温下( $27^\circ\text{C}$ ) 具有不同  $t_{rr}$  值的样管, 在正向电流  $I_F=1.5\text{A}$  的条件下进行了测试, 得到如图 3 所示的  $V_F-t_{rr}$  兼容特性图。

图 3  $V_F-t_{rr}$  兼容特性Fig. 3  $V_F-t_{rr}$  trade-off

从图中可以看到,无论是掺 Au 还是掺 Pt 的 MLD 二极管,与其相对应的均匀掺杂二极管相比, $V_F-t_{rr}$  兼容特性的总体水平都略差一些。以掺 Pt 管为例,对于  $t_{rr}$  值同为  $0.06\mu s$  的管子,MLD 管的  $V_F$  为  $1.44V$ ,而均匀掺杂管的  $V_F$  为  $1.30V$ 。另一方面,可以看到,掺 Au 的快恢复二极管在整体上的  $V_F-t_{rr}$  兼容特性优于掺 Pt 的快恢复二极管,这与 Baliga 的最佳寿命控制杂质的选择理论<sup>[3]</sup>是相一致的。

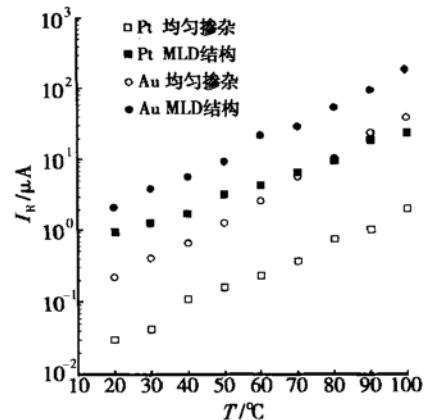
对于这一结果,可以做如下的定性解释:在实验中,为了获得相同的反恢复时间,MLD 二极管在进行 Au、Pt 扩散时所使用的扩散温度比均匀掺杂二极管所使用的扩散温度要高出大约  $50^{\circ}C$ ,因而 MLD 二极管内的“短寿命区”中的深能级杂质浓度远高于普通均匀掺杂二极管,相应的少子寿命远低于普通均匀掺杂二极管。同时,由于 Au、Pt 杂质的强烈横向扩散,所形成的“短寿命区”的宽度( $a_1$ )也会较宽。这样,MLD 二极管在正向大注入时的电导调制效应被削弱,因而  $V_F-t_{rr}$  兼容特性显得略差一些。

### 3.2 $I_R-T$ 特性

硅快恢复二极管的反向漏电流特性取决于空间电荷区的产生电流,它不仅与掺入的深能级杂质种类有关,也与掺入的深能级杂质总量有关。

测试中,我们在制得的均匀掺杂样管和 MLD 样管中,选取室温下( $27^{\circ}C$ )  $t_{rr}$  值都为  $0.09\mu s$  的四种样管进行了测试,得到如图 4 所示的  $I_R-T$  特性图。从图中可以看到,MLD 二极管在整体上的反向漏电流较普通均匀掺杂管大约大一个量级左右。另外也可以看到,掺 Pt 的 MLD 样管在低温时的反向漏电流虽然比均匀掺 Au 的样管大,但是在高温下,两者

的反向漏电流基本处于同一水平。

图 4  $I_R-T$  特性Fig. 4  $I_R-T$  characteristic

由于杂质能级本身的特性,掺 Au 的快恢复二极管的  $I_R$  大于掺 Pt 管<sup>[2,3]</sup>。在我们的实验中,普通均匀掺 Au 管的  $I_R$  比均匀掺 Pt 管也是大一个量级左右,因此,从这一角度出发,可以认为,掺 Pt 的 MLD 二极管和普通均匀掺 Au 管具有近似相同的反向漏电流和  $I_R-T$  特性。

在前面已经提到,MLD 二极管在进行 Au、Pt 扩散时的扩散温度比均匀掺杂二极管的扩散温度要高出大约  $50^{\circ}C$ ,其“短寿命区”中的深能级杂质浓度远高于普通均匀掺杂二极管,同时所形成的“短寿命区”的宽度也会较宽,因此 MLD 二极管内部的深能级杂质总量也会高于普通均匀掺杂二极管,使得 MLD 二极管具有较大的反向漏电流。

尽管 MLD 二极管的反向漏电流较大,但是对比参考文献[11]中对部分快恢复二极管反向漏电流所提供的数据来看,MLD 二极管的反向漏电流依然处于使用容许的范围之内。

### 3.3 $t_{rr}-T$ 特性

温度是影响半导体器件性能的基本因素之一。当器件的温度升高时,费米能级( $E_F$ )将会移向禁带中央,复合中心能级与费米能级之间的相对能量差增加,使得复合中心的复合率降低,少数载流子的寿命增加。由于 Au 的能级较深,靠近禁带中央,因此掺 Au 快恢复二极管的  $t_{rr}$  值随温度的变化较为缓慢;而 Pt 的能级较浅,掺 Pt 快恢复二极管的  $t_{rr}$  值与温度有强烈的依赖关系。

选取在室温下  $t_{rr}$  值相近的均匀掺杂样管和

MLD 样管, 测量得到如图 5 所示的  $t_{rr}-T$  特性图.

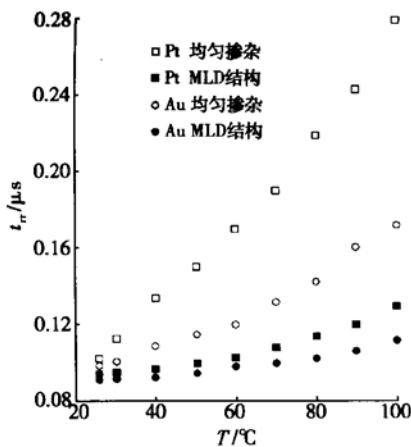


图 5  $t_{rr}-T$  特性

Fig. 5  $t_{rr}-T$  characteristic

为了便于比较, 我们用变化比例  $\eta = \frac{t_{rr}(100^{\circ}\text{C})}{t_{rr}(27^{\circ}\text{C})}$  来表征样管的  $t_{rr}-T$  稳定特性. 从图中可以看到, 均匀掺 Pt 样管的  $t_{rr}-T$  稳定特性最差, 相应的  $t_{rr}$  值由室温时  $0.103\mu\text{s}$  的变化到  $100^{\circ}\text{C}$  时的  $0.279\mu\text{s}$ ,  $\eta$  值为 2.71; 均匀掺 Au 样管优之,  $t_{rr}$  值变化为  $0.098\mu\text{s}$  到  $0.172\mu\text{s}$ ,  $\eta$  值为 1.76; 而掺 Pt 的 MLD 样管的  $t_{rr}-T$  稳定特性不仅较均匀掺 Pt 样管有提高, 而且超过了均匀掺 Au 样管,  $t_{rr}$  值变化为  $0.093\mu\text{s}$  到  $0.128\mu\text{s}$ ,  $\eta$  值为 1.38; 掺 Au 的 MLD 样管的  $t_{rr}-T$  稳定特性最佳,  $t_{rr}$  值变化为  $0.091\mu\text{s}$  到  $0.112\mu\text{s}$ ,  $\eta$  值仅为 1.23. 可以看到, 无论是掺 Au 还是掺 Pt, MLD 结构都能够大幅度地改善快恢复二极管的  $t_{rr}-T$  稳定特性.

在参考文献[11]中, 对部分可以在高温下应用的超快恢复二极管分别给出了  $25^{\circ}\text{C}$  时和  $100^{\circ}\text{C}$  时的  $t_{rr}$  值, 相应的  $\eta$  值范围为 1.40~1.67. 而对于我们实验中的 MLD 二极管, 无论是掺 Au 还是掺 Pt,  $\eta$  值都低于这一范围, 因此, MLD 二极管特别适用于高温的环境.

对于 MLD 二极管这一特性的物理机理, 目前正在研究之中.

## 4 小结

本文提出了一种新的快恢复二极管结构: 横向少子寿命非均匀分布结构. 我们利用普通的  $p^+nn^+$  二极管芯片, 通过  $\text{SiO}_2$  屏蔽层对深能级杂质进行选

择性地扩散, 制备出了掺 Au、Pt 的 MLD 快恢复二极管, 并对其特性进行了测试研究. 实验结果表明, 虽然这种新的快恢复二极管和普通的均匀掺杂快恢复二极管相比, 其  $V_F-t_{rr}$  兼容特性略差, 并且反向漏电流大约大一个量级, 但是这种新结构十分显著地提高了快恢复二极管  $t_{rr}-T$  的稳定特性. 对 MLD 二极管这些特性的进一步了解, 需要详细的理论研究, 目前这一工作正在进行中. 通过优化设计, 选取适当的“短寿命区”和“长寿命区”宽度值以及合理控制两个区域内的少子寿命, 可以提高 MLD 二极管的各项性能指标.

这种新的快恢复二极管可以用于一些对反恢时间变化要求严格的领域. 另一方面, 这种新的少数载流子复合层结构也可望用于其他的双极器件上, 制备出具有优良温度稳定性的高速开关功率器件.

## 参 考 文 献

- [1] Valdinoci M, Colalongo L, Pellegrini A, et al. Analysis of conductivity degradation in gold/platinum-doped silicon. IEEE Trans Electron Devices, 1996, 43(12): 2269
- [2] Miller M D. Differences between platinum- and gold-doped silicon power devices. IEEE Trans Electron Devices, 1976, 23(12): 1279
- [3] Baliga B J, Sun E. Comparison of gold, platinum, and electron irradiation for controlling lifetime in power rectifiers. IEEE Trans Electron Devices, 1977, 24(6): 685
- [4] Baliga B J, Krishna S. Optimization of recombination levels and their capture cross section in power rectifiers and thyristors. Solid-State Electron, 1977, 20: 225
- [5] Baliga B J. Technological constraints upon the properties of deep levels used for lifetime control in the fabrication of power rectifiers and thyristors. Solid-State Electron, 1977, 20: 1029
- [6] Baliga B J. Recombination level selection criteria for lifetime reduction in integrated circuits. Solid-State Electron, 1978, 21: 1033
- [7] Kassing R, Cohausz L, Van Staa P, et al. Determination of the entropy-factor of the gold donor level in silicon by resistivity and DLTS measurements. Annl Phys., 1984, A 34(1): 41
- [8] Miller M D, Schade H, Nuese C J. Lifetime-controlling recombination centers in platinum-diffused silicon. J Appl Phys, 1976, 47(6): 2569
- [9] Weng Y M, Ohta E, Sakata M. On the behavior of interaction of a Pt-related center with radiation-induced defects and the trace platinum detection. J Appl Phys, 1989, 65(2): 515
- [10] Bergholz W, Damgaard S, Petersen J W, et al. Reactions of cobalt in silicon with electron-irradiation-induced defects.

- Phys Status Solid, 1984, A81(1): 239
- [11] General Instrument Corporation. Product Catalog 12th Edition General Instrument Power Semiconductor Division, 1996
- [12] Baliga B J, Sun E. Pinch rectifier: a low-forward-drop high-speed power diode. IEEE Electron Device Lett, 1984, 5(6): 194
- [13] Shimizu Y, Masayoshi N, Susumu M, et al. High-speed low-loss p-n diode having a channel structure. IEEE Trans Electron Devices, 1984, 9(13): 14
- [14] Temple V A K, Holroyd F W. Optimizing carrier lifetime profile for improved trade-off between turn-off time and forward drop. IEEE Trans Electron Devices, 1983, 30(7): 782

## Minority-Carrier Life Time Lateral Non-Uniform Distribution Fast Recover Diode<sup>\*</sup>

Pan Feixi<sup>1</sup>, Huang Lin<sup>2</sup>, Liao Tiankang<sup>2</sup> and You Zhipu<sup>2</sup>

(1 Research Institute of Microelectronics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

(2 Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** A new fast recover diode structure, the minority-carrier life time lateral non-uniform distribution (MLD) structure, is proposed. Based on the  $p^+nn^+$  diode wafer, the MLD fast recover diode with Au or Pt doped is fabricated by diffusing deep level impurity selectively. The characteristics of this new kind of diode are measured and the results show that the new diode has a little worse  $V_F-t_{rr}$  trade-off and higher reverse current, but the  $t_{rr}-T$  stability of the new diode can be improved significantly. This new diode can be used in some special regions, where recover time is strictly required.

**Key words:** minority-carrier life time;  $V_F-t_{rr}$  trade-off; reverse current;  $t_{rr}-T$  stability

**PACC:** 7220J; 8140R

**Article ID:** 0253-4177(2004)03-0297-05

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 69676034)

Pan Feixi male, was born in 1970, PhD candidate. His research interests are in device and circuit design.

You Zhipu male, was born in 1940, professor. His research fields include materials, defects, impurities, and devices.