

# MLD 结构快恢复二极管 $t_{rr}$ - $T$ 特性的理论分析\*

潘飞蹊 陈星弼

(电子科技大学微电子与固体电子学学院, 成都 610054)

**摘要:** 对少数载流子寿命横向非均匀分布(minority-carrier life time lateral nonuniform distribution, MLD)结构的快恢复二极管进行了理论研究. 首先利用 MLD 二极管 n 型基区内部少数载流子在横向上的分布形态, 给出了 MLD 结构提高快恢复二极管的反恢时间-温度( $t_{rr}$ - $T$ )稳定性的一个定性解释, 然后利用“平均寿命”对 MLD 二极管的  $t_{rr}$ - $T$  特性进行了讨论. 模拟结果证明了理论分析的正确性.

**关键词:** 反恢时间; 温度稳定性; 平均寿命

**PACC:** 2320C; 7115; 7220J

**中图分类号:** TN303 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)01-0126-07

## 1 引言

快恢复二极管作为一类重要的开关器件在各种电子设备中使用广泛. 作为双极器件, 它存在着速度与功耗之间的矛盾, 所有指标之间必须折中考虑进行优化. 为了减小快恢复二极管反恢时间  $t_{rr}$ , 通常用掺金、掺铂和电子辐照的方法来缩短少子寿命, 但这会相应地增大二极管的正向压降  $V_F$  和反向漏电流  $I_R$ . 在文献[1]中, Temple 等提出了一种优化的纵向少子寿命分布结构, 通过在器件基区中引入一层或多层平行于 pn 结面的薄的高复合区, 来改善高速器件各项特性之间的兼容性. 近年来, 这种局部寿命控制的方法得到了广泛的关注<sup>[2~5]</sup>.

基于局部寿命控制的思想, 在我们以前的研究工作中, 提出了一种新的快恢复二极管结构<sup>[6]</sup>: 少数载流子寿命横向非均匀分布结构(minority-carrier life time lateral non-uniform distribution, MLD). 其基本思想如图 1 所示, 在二极管 n 型基区中引入横向非均匀分布的深能级杂质, 使得二极管 n 型基区形成一种由“短寿命区”(  $-a_1 \sim 0$  )和“长寿命区”(  $0 \sim a_2$  )相间隔组成的结构. 和以前的方法不同, 新结构中的局部

寿命控制区垂直于 pn 结面. 对于这种新结构的快恢复二极管的特性, 我们报道过相关研究结果, 其中最显著的是, 和普通均匀掺入深能级杂质的快恢复二极管相比, 新的快恢复二极管表现出非常良好的反恢时间-温度( $t_{rr}$ - $T$ )稳定特性. 另一方面, 这种新的快恢复二极管正向压降-反恢时间( $V_F$ - $t_{rr}$ )兼容特性略差, 并且反向漏电流大约大一个量级<sup>[6]</sup>.

本文在以前工作的基础上对 MLD 二极管的  $t_{rr}$ - $T$  稳定特性进行了理论研究. 首先利用少子分布形态在不同温度下的变化, 给出了 MLD 二极管  $t_{rr}$ - $T$  稳定特性的一个定性解释. 进一步, 利用“平均寿命”的概念对 MLD 二极管的  $t_{rr}$ - $T$  特性进行了讨论, 并提出了 MLD 二极管基区中, 长、短寿命区宽度取值的优化原则.

## 2 理论分析及讨论

在我们以前报道的实验结果中<sup>[6]</sup>, 用反向恢复时间随温度的变化比例  $\beta = t_{rr}(100^\circ\text{C}) / t_{rr}(27^\circ\text{C})$  来表征快恢复二极管的  $t_{rr}$ - $T$  稳定特性, 其中均匀掺 Pt 管的  $\beta$  值为 3 左右, 均匀掺 Au 管的  $\beta$  值为 2 左右, 而掺 Pt 的 MLD 样管的  $\beta$  值仅为 1.4 左右, 掺 Au 的

\*国家自然科学基金资助项目(批准号:69836010)

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.

陈星弼 男, 1931 年出生, 中国科学院院士, 研究方向为器件物理, 功率器件和 IC 设计.

2003-11-28 收到, 2004-03-26 定稿

MLD 样管的  $\tau$  值仅为 1.2 左右. 为了解释 MLD 结构的这种效应, 按以下的思路进行考虑: 普通快恢复二极管的反恢时间取决于其基区内部小注入时的少子寿命<sup>[7,8]</sup>. 对于 MLD 二极管, 基区由“短寿命区”和“长寿命区”间隔组成, 虽然并不存在统一的少子寿命, 但是在宏观上可以用“平均寿命”这一概念对两个区域内的少子复合率进行统一的描述. 因此可以进一步认为, MLD 二极管的反恢时间取决于宏观上的“平均寿命”, 相应地, 其  $t_{rr}-T$  稳定特性也可以用“平均寿命”随温度的变化特性来进行解释.

在此只考虑二维的情况, 如图 1 所示, 取 MLD 二极管的一个结构单元来进行分析并建立坐标系, 仅考虑小注入条件下的情况, 并做如下简化假设:

- (1) 近似地认为两个区域内的少子寿命是均匀的. 由于少子的复合主要在“短寿命区”内进行, 因此设“短寿命区”内的少子寿命为  $\tau_1$ , 而“长寿命区”内的少子寿命为无穷大.
- (2) “短寿命区”和“长寿命区”的宽度分别为  $a_1$  和  $a_2$ , 并且结构单元是重复对称的.
- (3) 不考虑深能级杂质掺入后对费米能级的影响.

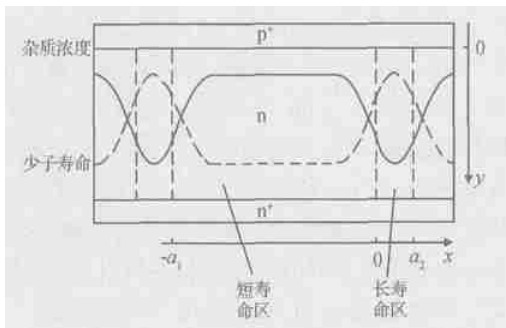


图 1 MLD 二极管的结构  
Fig. 1 MLD diode structure

这里简化的假设同实际情况有一定差别, 但是有利于分析的简化. 采用以上假设条件后, 通过求解少子的连续性方程得到少子浓度在横向 ( $x$  方向) 上的分布形态 (具体推导见附录), 如图 2 所示, 由于有两个寿命区域存在, 在  $x$  方向上少数载流子形成了一种“波浪”型的浓度分布: 在“长寿命区”内浓度分布是正弦形态, 在“短寿命区”内浓度分布则是近似指数衰减. 利用这种分布形态, 可以给出 MLD 结构提高二极管  $t_{rr}-T$  稳定特性原因的一个直观定性解释: 当温度升高时, 两个区域内少子的寿命增加, 扩散长度增加, 这时相应的“波浪”型浓度分布会趋于

平缓. 从少子的数量变化上来看, 高温时短寿命区内将集中更多的少子, 因而可以有更多的少子被复合, 这种浓度分布的变化在一定程度上补偿了少子寿命随温度的增加, 使得宏观上少子的复合率 (或“平均寿命”) 随温度的变化更为缓慢, 从而相应地提高了快恢复二极管  $t_{rr}-T$  稳定特性.

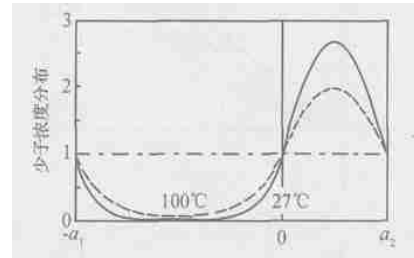


图 2 MLD 二极管中  $x$  方向少子浓度分布  
Fig. 2 Minority distribution along  $x$  direction in MLD diode

进一步的讨论可以通过对“平均寿命” $\bar{\tau}$  的具体计算来进行 (具体推导见附录). 为了简化计算, 避免讨论深能级杂质浓度、能级位置等诸多因素对少子寿命的复杂影响, 计算中不针对某一种特定的深能级杂质, 而是假设有某一种深能级杂质, 在 300K 和 400K 这两个特定的温度, 使少子寿命按固定的比例变化, 即:  $\tau = \tau_{300K} \cdot (400K / 300K)$ . 相应地, 对 MLD 二极管而言, 假设“短寿命区”内掺入了这种深能级杂质, 则“短寿命区”内的少子寿命将按相同比例变化; 同时, 计算出 MLD 二极管内少子在不同温度下的“平均寿命”, 然后用“平均寿命”随温度的变化比例  $\bar{\tau}_{ave} = \bar{\tau}_{400K} / \bar{\tau}_{300K}$  来衡量 MLD 结构对二极管  $t_{rr}-T$  稳定特性的改善.

图 3 是“平均寿命”的计算值与“长寿命区”宽度  $a_2$  之间的关系图. 图 4 中计算画出了假设  $\tau$  取值为 4 和 8 时,  $\bar{\tau}_{ave}$  与 MLD 结构尺寸 ( $a_1, a_2$ ) 之间的关系, 从这些图中, 可以得到以下三个方面有关 MLD 二极管优化的定性原则.

(1) 从图 4 中可以看到,  $a_1, a_2$  的取值增加时,  $\bar{\tau}_{ave}$  值减小. 说明要提高二极管的  $t_{rr}-T$  稳定性, 可以增大 MLD 结构尺寸  $a_1, a_2$ . 但是, 从图 3 中可以看到, 当  $a_2$  增加时, “平均寿命”值也迅速增加, 意味着二极管的反恢时间也会增加, 因此对 MLD 二极管而言, 应当是在反恢时间允许的前提下, 尽量增加“长寿命区”宽度  $a_2$ , 以提高其  $t_{rr}-T$  稳定性.

(2) 短的少子寿命导致产生大的反向电流, 显然, MLD 二极管的“短寿命区”宽度值  $a_1$  越小, 反向

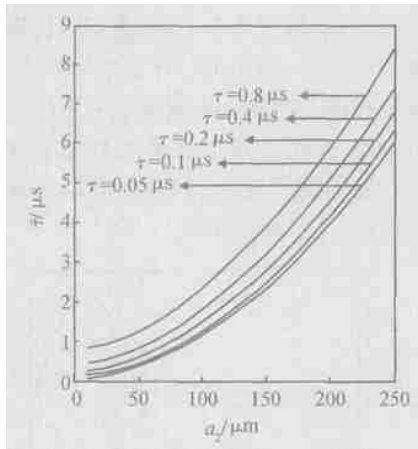


图 3  $a_1 = 500\mu\text{m}$  时, 300K 下“平均寿命”与  $a_2$  的关系

Fig. 3 Relationship between “average lifetime” and  $a_2$  at 300K  $a_1 = 500\mu\text{m}$

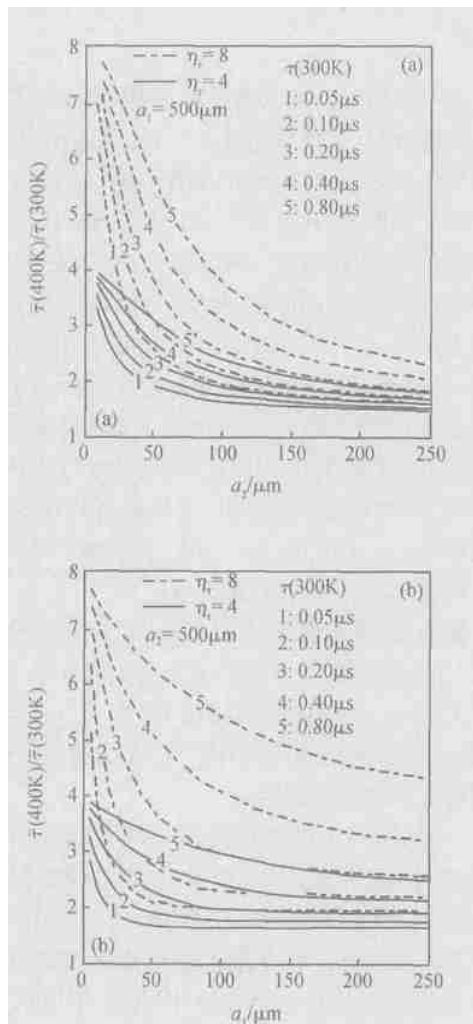


图 4 “平均寿命”比例与 MLD 结构尺寸的关系

Fig. 4 Relationship between the ratio of “average lifetime” and the scales of MLD structure

漏电流也越小. 因此, 进一步的考虑应该是缩短  $a_1$  的值. 从图 4(b) 中可以看到, 当  $a_1$  大于一定值后, 基本不再影响  $\tau_{\text{ave}}$  值的变化. 因此对 MLD 二极管而言, 在不影响  $t_{\text{rr}}-T$  稳定性的前提下, 应当尽量缩短“短寿命区”宽度值  $a_1$ .

(3) 从图 4 中还可以看到, 在结构尺寸取值相同时, 降低“短寿命区”的少子寿命值, 也可以使  $\tau_{\text{ave}}$  值减小, 提高二极管的  $t_{\text{rr}}-T$  稳定性.

按照上面三个原则对 MLD 二极管中长、短寿命区进行优化取值, 可以使 MLD 二极管的  $t_{\text{rr}}-T$  稳定特性达到最佳, 而反向漏电流较小.

图中的计算虽然只选取了部分特定的参数来进行, 但是对于其他参数取值, 也可以得到相同的结论. 并且反恢时间  $t_{\text{rr}}$  的变化和“平均寿命”变化之间的关联性, 可以通过 Medici 模拟来加以验证.

### 3 模拟结果和讨论

#### 3.1 模拟参数的设定

模拟中二极管的基区掺杂浓度取  $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 基区宽度为  $80\mu\text{m}$ ,  $n^+$  和  $p^+$  层为  $10\mu\text{m}$ . 反恢时间的测试电路按图 5 设置, 二极管芯片的面积假设为  $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ , 正向注入电流为  $50\text{mA}$ , 反向抽取电压为  $10\text{V}$ , 在反向抽取过程中, 当二极管正向端电压 ( $V_D$ ) 为  $-9\text{V}$  时读取  $t_{\text{rr}}$  值. 载流子的迁移率与衬底浓度和温度的关系采用 Arora 模型, 载流子复合模型采用 SRH 模型. 模拟中针对 Pt 杂质, 采用其主要能级, 即导带下  $0.23\text{eV}$  的受主能级<sup>[9~11]</sup>.

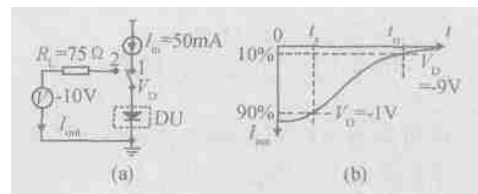


图 5 反恢时间测试电路

Fig. 5 Circuit of  $t_{\text{rr}}$  measurements

SRH 模型的公式为:

$$U = \frac{np - n_i^2}{p(T) [n + n_i \exp(\frac{E_t - E_i}{k_0 T})] + n(T) [p + n_i \exp(\frac{E_i - E_t}{k_0 T})]} \tag{1}$$

其中  $p(T)$  和  $n(T)$  是重掺  $n$  型和  $p$  型材料中(即每个深能级上都俘获有一个电子或一个空穴时的)

少子寿命,模拟中需要分别设定.它们之间的关系以及它们与温度之间的关系由以下推导关系来设定:

$p(T)$  和  $n(T)$  取决于能级的俘获截面 ( $\sigma_p, \sigma_n$ ) 和载流子的热运动速度 ( $v_{pT}, v_{nT}$ ):

$$p(T) = (N_t \sigma_p v_{pT})^{-1}, \quad n(T) = (N_t \sigma_n v_{nT})^{-1} \tag{2}$$

假设能级的俘获截面不随温度而变化,则可以得到:

$$n(T) = \frac{m_p^*}{m_n^*} \times \left(\frac{m_n^*}{m_p^*}\right)^{\frac{1}{2}} \times p(T) \tag{3}$$

$$p(T) = p(300\text{K}) \times \left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

其中  $m_n^*, m_p^*$  是电子和空穴的有效质量.从(3)式中可以看到,  $p(T)$  和  $n(T)$  始终是成比例的,根据文献[9~12]的实验数据和经验,在模拟中采用:

$$n(T) = 10 p(T) \tag{5}$$

这样,在模拟中只需要给定室温下  $p(300\text{K})$  的值,就可以由(4),(5)两式计算出任意温度时的  $p(T)$  和  $n(T)$ ,并在模拟中设定相应的值.

在前面的理论分析和计算中,假设了 MLD 二极管“长寿命区”中少子寿命趋于无穷大,模拟时“长寿命区”内统一设置为  $p(300\text{K}) = 100\mu\text{s}$ ,以下文中  $p(300\text{K})$  指 MLD 二极管中“短寿命区”区内的设置和均匀掺杂二极管中的设置.

### 3.2 $t_{rr}$ - $T$ 稳定特性的模拟比较

图 6 和图 7 中的曲线在模拟中采用的各参数的取值例于表 1 中.

按照上述的 Pt 杂质能级设置方案,首先对均匀掺杂二极管和 MLD 二极管的  $t_{rr}$ - $T$  特性进行了模拟和比较,结果示于图 6 中,可以看到,和以前的实验结果<sup>[6]</sup>一样,MLD 二极管显示出更为稳定的  $t_{rr}$ - $T$  特性.

表 1 图 6 和图 7 中曲线模拟参数的取值

Table 1 Simulation parameter values of the curves in Figs. 6 and 7

曲线	“短寿命区”宽度 $a_1$ / $\mu\text{m}$	“长寿命区”宽度 $a_2$ / $\mu\text{m}$	$p(300\text{K})$ / $\mu\text{s}$
1(均匀掺杂)	—	—	0.032
2(均匀掺杂)	—	—	0.016
3(MLD 结构)	200	100	0.003
4(MLD 结构)	200	75	0.002
5(MLD 结构)	200	50	—
6(MLD 结构)	200	75	—

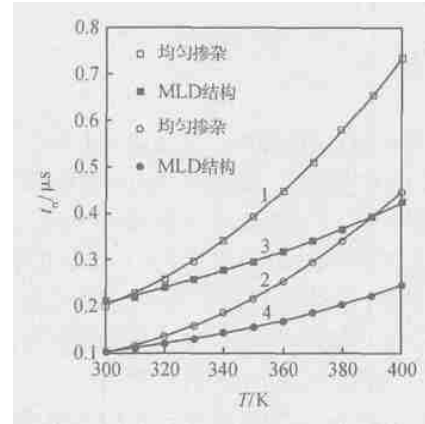


图 6  $t_{rr}$ - $T$  特性的模拟结果

Fig. 6 Simulation results of  $t_{rr}$ - $T$  characteristics

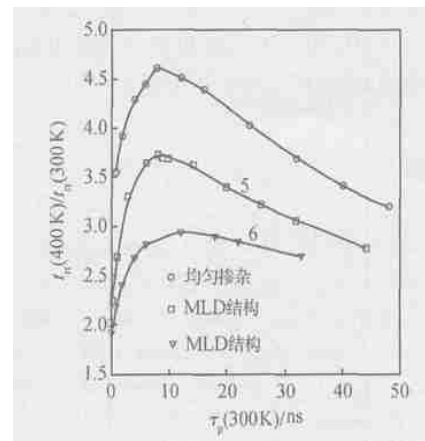


图 7  $t_{rr}$  变化比例的模拟结果

Fig. 7 Simulation results of the ratio of  $t_{rr}$

图 7 是在不同“短寿命区”少子寿命取值时,MLD 二极管的  $t_{rr}$  变化比例 ( $t_{rr}(400\text{K}) / t_{rr}(300\text{K})$ ) 与均匀掺杂二极管的比较,从图中可以看到 MLD 二极管  $t_{rr}$  变化比例较小,另外:(1)当“短寿命区”少子寿命取值减小时,MLD 二极管的  $t_{rr}$  变化比例减小,  $t_{rr}$ - $T$  稳定特性增强;(2)对比曲线 5 和 6,当“长寿命区”宽度  $a_2$  值增大时,MLD 二极管的  $t_{rr}$ - $T$  稳定特性也会增强.这一变化趋势和前面的理论分析中,图 4 中所示的“平均寿命”相应的变化规律是一致的,因此可以说明,MLD 二极管的反恢时间是由“平均寿命”决定的,“平均寿命”随温度的变化规律决定了反恢时间随温度的变化规律.

以上模拟结果说明在理论中引入“平均寿命”的概念来解释 MLD 二极管的  $t_{rr}$ - $T$  稳定特性是正确的.

## 4 小结

利用 MLD 二极管内少子在横向上的分布形态和“平均寿命”的概念,解释了 MLD 结构提高快恢复二极管  $t_{rr}$ - $T$  稳定性特性的原因,并提出了 MLD 二极管基区中长、短寿命区宽度取值的优化原则,模拟结果证实了理论分析的正确性.虽然采用的是二维解析分析,同时在分析中没有具体考虑深能级杂质的分布,简单认为两个不同的寿命区内少子寿命是均匀的,这些都与实际情况有所差别,但是这种简化的分析给出了 MLD 二极管  $t_{rr}$ - $T$  稳定特性的直观物理图象和简单理论解释.

另一方面,对 MLD 二极管的进一步研究还必须综合考虑少子寿命的合理取值问题以及  $V_F$ - $t_{rr}$  的兼容特性问题,目前这些工作正在进行中.

## 参考文献

- [ 1 ] Temple V A K, Hbroyd 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
- [ 2 ] Vobecky J, Hazdra P, Homola J. Optimization of power diode characteristics by means of ion irradiation. IEEE Trans Electron Devices, 1996, 43(12) :2283
- [ 3 ] Napoli E, Srollo A GM, Spirito P. Numerical analysis of local lifetime control for high-speed low-loss P+N diode design. IEEE Trans Power Electron, 1999, 14(4) :615
- [ 4 ] Wu He, Wu Yu, Kang Baowei, et al. Simulation of power fast recovery diodes using local lifetime controlling technique. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(5) :520 (in Chinese) [ 吴鹤, 吴郁, 亢宝位, 等. 用局域寿命控制技术改善功率快恢复二极管性能的仿真研究. 半导体学报, 2003, 24(5) :520 ]
- [ 5 ] Jia Yunpeng, Kang Baowei, Wu Yu, et al. Lifetime control in high-voltage semiconductor power devices. Power Electronics, 2003, 37(6) :89 (in Chinese) [ 贾云鹏, 亢宝位, 吴郁, 等. 高压半导体功率器件的寿命控制工程述评. 电力电子技术, 2003, 37(6) :89 ]
- [ 6 ] Pan Feixi, Huang Lin, Liao Tiankang, et al. Minority-carrier life time lateral non-uniform distribution fast recover diode. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(3) :297 (in Chinese) [ 潘飞蹊, 黄林, 廖天康, 等. 少数载流子寿命横向非均匀分布的快恢复二极管特性. 半导体学报, 2004, 25(3) :297 ]
- [ 7 ] Sze S M. Physics of semiconductor devices. 2nd Edition. New York : John Wiley, 1981
- [ 8 ] 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
- [ 9 ] Pals J A. Properties of Au, Pt, Pd, and Rh levels in silicon measured with a constant capacitance technique. Solid-State Electron, 1974, 17: 1139
- [ 10 ] Miller M D, Schade H, Nuese C J. Lifetime-controlling recombination centers in platinum-diffused silicon. J Appl Phys, 1976, 47(6) :2569
- [ 11 ] Kwon Y K, Ishikawa T, Kuwano H. Properties of platinum associated deep levels in silicon. J Appl Phys, 1987, 61(3) :1055
- [ 12 ] 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
- [ 13 ] Arora N D, Hauser J R, Roulston D J. Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature. IEEE Trans Electron Devices, 1982, 29(2) :292

## 附 录

### 1 少数载流子浓度分布

利用文中的假设条件,按照图 1 中建立的坐标系,取 MLD 二极管的一个结构单元来进行分析,当二极管处于小注入状态时,不考虑电场作用,其内部的少数载流子(空穴)分布由连续性方程决定,可以分别写为:

短寿命区内:

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} = D_p \left( \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_1}{\partial y^2} \right) - \frac{P_1}{\tau_1} \quad (A1)$$

长寿命区内:

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} = D_p \left( \frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_2}{\partial y^2} \right) \quad (A2)$$

其中  $P_1$  和  $P_2$  分别表示两个区内少数载流子的浓度;  $P_1$ ,  $P_2$  分别表示非平衡少数载流子的浓度,并有如下的边界条件:

$$P_1 /_{x=0} = P_2 /_{x=0} = P_1 /_{x=-a_1} = P_2 /_{x=a_2} \quad (A3)$$

$$D_p \times \frac{\partial P_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = D_p \times \frac{\partial P_2}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (A4)$$

对于(A1), (A2)两个方程,利用分离变量法假设:

$$P_1(x, y, t) = P_1(x) P_1(y, t) \quad (A5)$$

$$P_2(x, y, t) = P_2(x) P_2(y, t) \quad (A6)$$

并将其相应地化为一维方程组求解,可得  $x$  方向少子的浓度分布:

$$P_1(x) = \frac{e^{-\frac{x}{l}}}{e^{-\frac{a_1}{l}} + 1} + \frac{e^{-\frac{x}{l}}}{e^{-\frac{a_1}{l}} + 1} \quad (A7)$$

$$P_2(x) = \frac{\cos(\frac{x}{l} - \frac{a_2}{2l})}{\cos(\frac{a_2}{2l})} \tag{A8}$$

对于  $y$  方向的少数载流子分布形态  $P_1(y, t)$  和  $P_2(y, t)$ , 则由相同的一维连续性方程决定:

$$\frac{1}{D_p} \times \frac{\partial P_1(y, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_1(y, t)}{\partial y^2} - \frac{P_1(y, t)}{(l)^2} \tag{A9}$$

$$\frac{1}{D_p} \times \frac{\partial P_2(y, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_2(y, t)}{\partial y^2} - \frac{P_2(y, t)}{(l)^2} \tag{A10}$$

其中  $l = \sqrt{D_p}$  是短寿命区内少子的扩散长度.

和  $\tau$  是两个待定常数, 它们之间的关系由如下两个方程决定:

$$\tau^{-2} + l^{-2} = 1 \tag{A11}$$

$$\text{th}(\frac{a_1}{2l}) = \text{tg}(\frac{a_2}{2l}) \tag{A12}$$

少数载流子在  $y$  方向上分布, 由边界条件 (A3) 和方程 (A9), (A10) 可知, 无论在长寿命区还是在短寿命区, 分布形态是相同的, 有  $P_1(y, t) = P_2(y, t)$ , 在此不作具体求解. 需要指出的是, 在此的  $x$  方向的少子浓度分布  $P_1(x)$  和  $P_2(x)$  是对长、短寿命区交界处少子浓度归一化处理后的表达式.

## 2 平均寿命 $\bar{\tau}$ 的计算

MLD 二极管在宏观上对外所呈现的“平均寿命”定义为其内部总载流子在单位时间内的复合率.

因为无论在“长寿命区”还是在“短寿命区”, 少子浓度在  $y$  方向上的分布形态是相同的, 因而计算中可以只考虑少子浓度在  $x$  方向的分布. 假设在“短寿命区”内的少数载流子总量为  $Q_1$ , “长寿命区”内的少数载流子总量为  $Q_2$ , 则可以定义“平均寿命” $\bar{\tau}$  有:

$$\frac{Q_1 + Q_2}{\bar{\tau}} = \frac{Q_1}{\tau_1} + \frac{Q_2}{\tau_2} \tag{A13}$$

其中  $Q_1$  和  $Q_2$  可以根据已求得的载流子浓度分布 (A7), (A8) 式通过在  $x$  方向上的积分来计算, 并得到:

$$\bar{\tau} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1/\tau_1 + Q_2/\tau_2} \tag{A14}$$

这样, 只要假定给出了短、长寿命区宽度  $a_1, a_2$  和“短寿命区”内的少子寿命  $\tau_1$  这三个参数值, 就可以由 (A11), (A12) 两式求解出  $\tau$  和  $l$  的值, 从而具体计算出“平均寿命” $\bar{\tau}$  的值. 另外在具体的计算中, 少子的扩散长度  $l$  是一个关键参数, 因此必须确定扩散系数  $D_p$  和温度、材料掺杂浓度之间的关系. 扩散系数与温度之间的关系可以用爱因斯坦关系和迁移率的如下经验公式<sup>[13]</sup>来计算:

$$\mu_p = 54.3 T_n^{-0.57} + \frac{407 T_n^{-2.33}}{1 + (\frac{N}{2.35 \times 10^{17}} \times T_n^{2.4})} \tag{A15}$$

其中  $N$  是衬底材料总掺杂浓度;  $T_n = \frac{T}{300}$ ;  $\tau_1 = 0.88 \times T_n^{-0.146}$ ;  $T$  是绝对温度. 文中计算时, 衬底材料总掺杂浓度假定为  $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

## Theory Analysis of $t_{rr}$ -T Characteristic of Fast Recover Diode with MLD Structure \*

Pan Feixi and Chen Xingbi

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract :** The fast recover diode with minority-carrier lifetime lateral non-uniform distribution(MLD) structure is analyzed theoretically. Based on the minority lateral distribution in the n-type base region of the MLD diode ,an explanation of the recover time-temperature ( $t_{rr}$ -T) stability which can be improved by the MLD structure is given. The stability is also discussed by the concept of average lifetime. Furthermore ,the simulation results verify the correctness of the theory analysis.

**Key words :** recovery time ; temperature stability ; average lifetime

**PACC :** 2320C ; 7115 ; 7220J

**Article ID :** 0253-4177 (2005) 01-0126-07

---

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 69836010)

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

Chen Xingbi male ,was born in 1931 ,academician of Chinese Academy of Sciences. His research fields include power devices ,smart power IC 's ,and device physics.

Received 28 November 2003 ,revised manuscript received 26 March 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics