

横向高压DMOS单粒子辐照瞬态响应

李泽宏, 李肇基, 杨 舰

(电子科技大学微电子与固体电子学院 成都 610054)

【摘要】基于单粒子辐照的等离子体输运机理,提出了横向高压DMOS单粒子辐照的瞬态响应模型。借助对横向高压DMOS的关态和开态的不同能量粒子辐照瞬态响应的二维数值分析,获得了横向高压DMOS在双结、单结和无结情况下的瞬态响应特性。其计算结果表明,横向高压DMOS的开态漏端峰值电流比关态的漏端峰值电流小,且漏端峰值电流和峰值电流出现的时间随入射粒子能量的增大而增加。

关键词 横向高压DMOS; 单粒子效应; 等离子体; 瞬态响应

中图分类号 TN386 文献标识码 A

Transient Response of Single Ion Radiate the Lateral High-Voltage DMOS

Li Zehong, Li Zhaoji, Yangjian

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Based on the transport mechanism of the single ion radiate plasma, the transient response model of single ion radiate the lateral high-voltage DMOS is proposed. The transient response characters of DMOS at non-junction, single junction and double junction are obtained by the transient response numerical analysis result of the open and close state of the DMOS at different energy ion radiation. Indicated that the peak value drain current of the turn-on state is bigger than that of the turn-off state, the peak value drain current and the arisen time of the peak value drain current are increased while the energy of the ion is increased.

Key words lateral high-voltage DMOS; single event effect; plasma; transient response

横向高压双扩散MOS(Double-diffusion MOS, DMOS)是智能功率集成电路(Smart Power Integrated Circuits, SPIC)的核心器件^[1]。SPIC在太空中的应用,必将受到太空辐射的影响(包括电离辐射和单粒子辐射等)。太空辐射可能造成SPIC的永久衰退、瞬间失效和烧毁。在太空辐射对功率器件的分析研究中,单粒子效应的研究目前均集中在垂直高压双扩散MOS(Vertical Double-diffusion MOS, VDMOS)器件的单粒子栅穿和单粒子烧毁实验分析方面^[2-7]。迄今未见有学者借助二维仿真器MEDICI数值分析横向高压DMOS的单粒子辐照瞬态特性,也未见在SPIC中广泛使用的横向高压DMOS器件单粒子瞬态响应的研究报道。

本文首先提出单粒子辐照横向高压DMOS的瞬态响应模型,该模型基于单粒子辐照的等离子体输运机理。借助二维仿真器MEDICI对横向高压DMOS单粒子辐照瞬态响应进行了数值分析,获得了横向高压DMOS在无结、单结和双结情况下的瞬态响应特性。最后基于模型对单粒子辐照横向高压DMOS的瞬态响应进行了研究。

收稿日期:2003-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60076030、60276040)

作者简介:李泽宏(1970-),男,博士生,主要从事功率MOS器件的机理及基本参数辐照理论方面的研究。

1 瞬态响应模型

横向高压DMOS器件结构及其单粒子辐照如图1所示。从图中得知高能粒子入射横向高压DMOS器件，粒子与硅原子碰撞造成晶格损伤的同时，能量传递给硅原子(线性传输能LET)产生大量的电子-空穴对(对硅而言，电子-空穴对的产生能量为3.6 eV)，在其径迹上的硅外围电子获得足够的能量逃脱硅原子的束缚，产生一个半径为几百纳米的电子-空穴对等离子体。该等离子体的密度比掺杂浓度高出几个数量级。



图1 横向高压DMOS器件结构

横向高压DMOS器件漏端加上正电压，单粒子入射器件的漏区和漂移区。高能粒子注入产生大量的电子-空穴对，直接产生一个电流通路，在电场作用下，电子往漏端漂移，同时电子-空穴对通过多种方式复合，漏端电流逐渐恢复到原来大小。假设条件如下：1) 载流子的复合是通过单一级和Auger复合；2) 等离子体电子-空穴对数量远远大于本征载流子浓度；3) N型和P型载流子浓度变化、产生电流大小相同。忽略漏端 n^+n 结对漏端电流的影响，通过电流连续性方程得到漏端电流近似计算式为

$$\begin{aligned} I_D(t) &= I_D(0) + aI_{SEE}e^{\frac{t}{t_r}} & 0 < t < t_r \\ I_D(t_r) &= I_{D,max} & t = t_r \\ I_D(t) &= I_D(0) + bI_{SEE}e^{-\frac{t}{t_f}} & t_r < t < t_f \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $I_D(0)$ 为单粒子辐照前的漏端电流大小， $I_{SEE} \equiv Q/T$ 为辐射产生的电流平均值， t_r 、 t_f 分别为单粒子辐照产生电流的上升时间和下降时间， a 、 b 为修正因子。电子-空穴对的产生率为： $G_n = G_p = Q/(qT)$ ，其中 Q 为等离子体电荷量的大小，为时间的函数。 T 为等离子体维持时间。

单粒子入射横向高压DMOS器件的栅区：穿透pn单结和源区：穿透 n^+pn 双结，高能粒子注入产生的大量电子-空穴对，栅区pn和源区 n^+pn 的反偏结空间电荷区的消失，漏端电压产生的电场直接被拉到注入径迹的末端，直接形成反偏结的电流通路。随着等离子体密度的减少，结耗尽层又开始形成，首先是等离子体的外表面，然后到中心。电子被拉向正电极，而空穴脱离纵向电场，一直到耗尽层完全恢复。由于这种效应发生在一个或两个相邻的pn结，在单结或两个结之间存在一个类欧姆电阻的小直径通路。假设条件：1) 流入基区的电流受到围绕径迹通路扩展电阻的限制；2) 粒子分流效应假定叠加在这些电流和电荷上；3) 沿径迹存在恒定一致的初始载流子浓度。这样可以由pn结正常的光电流收集过程来加以说明。得到单粒子入射漏端电流大小为

$$I_D(t) = I_D(0) + \frac{dQ_c}{dt} \quad (2)$$

式中 Q_c 为收集电荷，其大小为： $Q_c = \int_0^T qn(v_n + v_p)A dt$ 。其中 n 为径迹内的载流子浓度， A 为径迹面积， v_n 和 v_p 分别为电子、空穴的速度。由于 n 、 v_n 和 v_p 都与时间和沿径迹的位置有关，因此 Q_c 的求解相当复杂。假设用均值 \bar{n} 和 $\overline{(v_n + v_p)}$ 替代 n 和 $v_n + v_p$ 。则得到

$$Q_c = qn(v_n + v_p)t_A A \quad (3)$$

式中 t_A 为粒子径迹存在的平均时间，其大小为： $t_A = \int_0^T n dt / \bar{n}$ 。

假设载流子速度与电场成线性关系，则漏端电流可表示为

$$I_D(t) = I_D(0) + \frac{d}{dt} \left[\frac{Qt_A \bar{m}(V_D - V_{S,G})}{L_T L_R} \right] \quad (4)$$

式中 \bar{m} 为电子和空穴的平均迁移率之和， L_R 为电阻性径迹的长度， L_T 为总的粒子径迹长度， V_D 为漏端电压， $V_{S,G}$ 分别为源端和栅端电压。式(1)和式(4)即为单粒子辐照横向高压DMOS的无结区和有结区的漏端电流的拟合式。通过实验或数值分析就能得到不同粒子辐照DMOS器件不同区域的漏端电流变化。

2 结果与讨论

数值分析单粒子辐照横向高压DMOS器件的瞬态响应,必须先知道不同能量、不同粒子入射器件产生的等离子体电荷量的大小、等离子体的半径大小、注入深度和等离子体维持时间等参数。一般来讲,对重粒子而言,产生的等离子体的半径为200 nm左右,维持时间十个皮秒左右^[8,9]。等离子体电荷量的大小和注入深度通过J.F Ziegler的实验数据编制程序来模拟获得^[10]。100 MeV的Ar粒子垂直入射硅材料,其LET如图2所示。从图中可知,LET的平均值为420 eV/0.1 nm,等效平均电荷量为:0.171 pc;注入深度 d 为25.12 μm 左右。80 MeV Ar粒子垂直入射硅材料产生的等效平均电荷量为:0.179 pc,注入深度为20.20 μm 。50 MeV Ar粒子垂直入射硅材料产生的等效平均电荷量为:0.192 pc,注入深度为13.25 μm 。

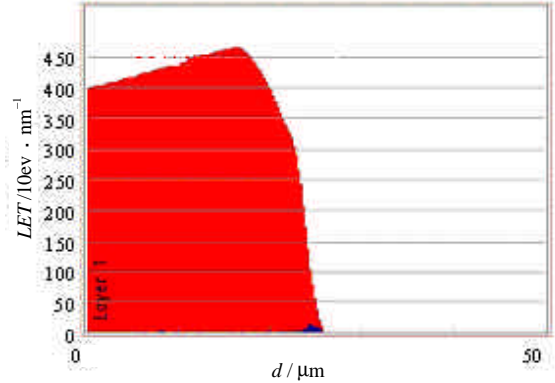


图2 100 MeV的Ar粒子注入硅中的LET

横向高压DMOS的栅、源电极和衬底接零电位,漏端接1 200 V电压。不同能量Ar粒子分别垂直入射DMOS的栅、源和漏区时,得到漏端电压随时间的变化关系分别如图3所示。从图中可看出,Ar粒子入射器件的不同区域,瞬间漏端电压被拉低,降为0 V。原因在于垂直入射Ar粒子,产生电子-空穴对的等离子体,瞬间等离子体周围的pn(栅区入射)或 n^+pn (源区入射)结耗尽层被中和,失去了屏蔽作用,电场推进到零电位。漏端电压也就降为0 V。

横向高压DMOS处于开态(栅电极接5 V,源电极、衬底接零电位,漏端接100 V电压)和关态(栅、源电极和衬底接零电位,漏端接1 200 V电压)两种情况下,不同能量Ar粒子分别垂直入射DMOS的源、栅和漏区时,漏端电流随时间的变化关系分别如图4、图5和图6所示。从图中分别看出当Ar粒子入射DMOS的源、栅区时,Ar粒子的入射穿过了双结,辐射粒子穿透两个结的瞬间,结耗尽层消失,粒子轨迹形成一个类欧姆电阻,这时漏端电流 I_D 很快增加,在很短的时间达到一最大值。同时,等离子体存在径向和纵向的电荷分离,开始由于等离子体密度很高,以径向分离为主。在径向电场的作用下,空穴被驱逐到低电位处,而电子被留在等离子体内;在纵向电场作用下,那些分离的电子向高电位漂移,被正电极收集。等离子体逐渐消失,耗尽层逐渐在形成,首先是等离子体的外表面,然后到中心。当耗尽层完全形成,漏电流回复原来大小,从图4和图5中得知。当Ar粒子入射DMOS的漏区和漂移区时,漏端电流变化如图6所示。高能粒子注入产生大量的电子-空穴对,直接产生一个电流通路,在电场作用下,电子往漏端漂移,同时电子-空穴对通过多种方式复合,漏端电流逐渐回复到原来大小。这个过程也是在很短的时间内完成。

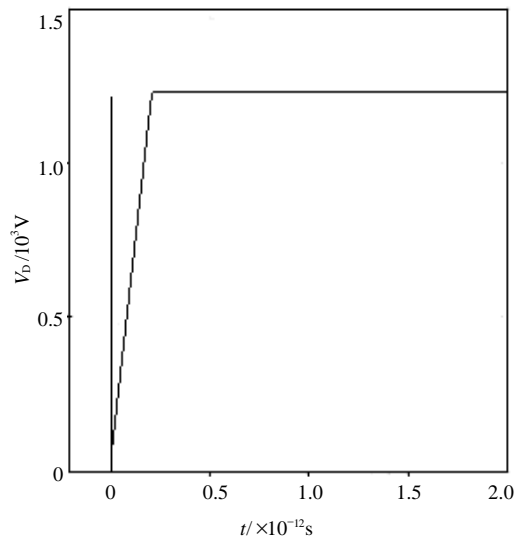


图3 Ar粒子入射DMOS漏端电压与时间的关系

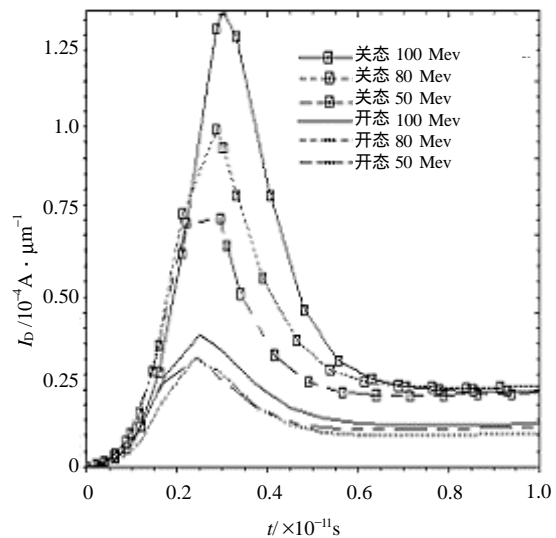


图4 Ar粒子入射DMOS源区 I_D 与时间的关系

从图4中得知, 横向高压DMOS器件处于关态的情况下, 100 MeV Ar粒子入射源区, 在3 ps时, 漏端峰值电流 $I_{D,max}$ 为 1.45×10^{-4} A/ μm ; 80 MeV Ar粒子入射源区, 在2.8 ps时, 漏端峰值电流 $I_{D,max}$ 为 1.08×10^{-4} A/ μm ; 50 MeV Ar粒子入射源区, 在2.5 ps时, 漏端峰值电流 $I_{D,max}$ 为 0.85×10^{-4} A/ μm 。LDMOS器件处于关态的情况下, 100 MeV Ar粒子入射源区, 在2.4 ps时, 漏端峰值电流 $I_{D,max}$ 为 0.42×10^{-4} A/ μm ; 80 MeV Ar粒子入射源区, 在2.3 ps时, 漏端峰值电流 $I_{D,max}$ 为 0.35×10^{-4} A/ μm ; 50 MeV Ar粒子入射源区, 在2.3 ps时, 漏端峰值电流 $I_{D,max}$ 为 0.35×10^{-4} A/ μm 。由以上数据可知, 漏端峰值电流随入射粒子能量的增加而增加, 且峰值电流出现的时间随入射粒子能量的增加而增大。在横向高压DMOS处于不同工作状态下, 开态峰值电流比关态的峰值电流小。由式(4)可知, 粒子入射器件的栅区和源区时, 漏端电流的变化与漏端、栅端和源端所加的电压有关。关态时在某一时刻 t_1 漏端电流大小可表示为与收集电荷的一阶导数为

$$I_D(t_1) \propto \left. \frac{Q(V_D)}{dt} \right|_{t_1} \quad (5)$$

式中 $Q(V_D)$ 收集电荷是漏端电压的函数, 随漏端电压增大, 收集电荷同时增大。开态情况下, 式(5)中的 V_D 由 $(V_D - V_G)$ 替代, 由此可见开态情况下收集电荷减少。也就是开态的峰值电流比关态的峰值电流小。图5漏端电流的变化分析如同图4。

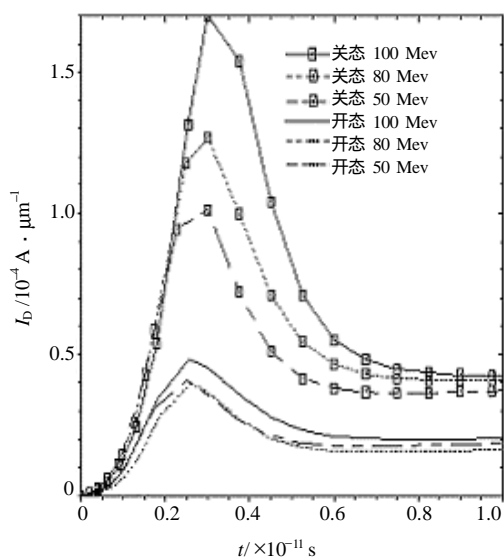


图5 Ar粒子入射DMOS栅区 I_D 与时间的关系

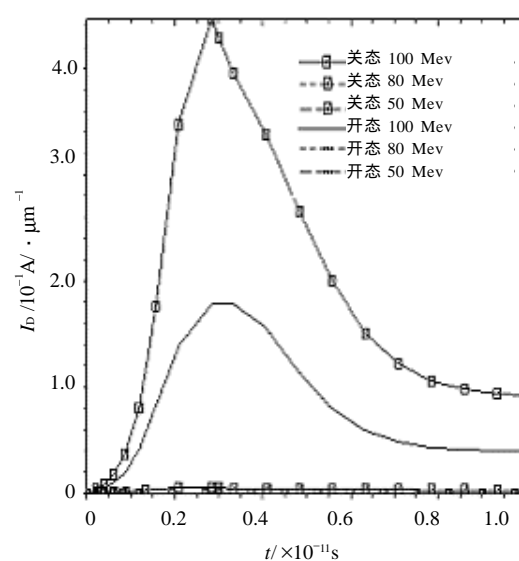


图6 Ar粒子入射DMOS漏区/漂移区 I_D 与时间的关系

图6中的数据分析可以直接得到在不同能量的Ar粒子辐照情况下的漏端电流变化的拟合公式。由式(1)得到横向高压DMOS关态情况下, 100 MeV的Ar粒子入射漏区的拟合公式为

$$\begin{aligned} I_D(t) &= 3 \times 10^{-4} (\text{A}/\mu\text{m}) e^{\frac{t}{3 \times 10^{-12} \text{s}}} & 0 < t < 3 \text{ps} \\ I_D(t_r) &= 4.5 \times 10^{-4} (\text{A}/\mu\text{m}) & t = 3 \text{ps} \\ I_D(t) &= 3 \times 10^{-4} (\text{A}/\mu\text{m}) e^{-\frac{t}{8 \times 10^{-12} \text{s}}} & 3 \text{ps} < t < 8 \text{ps} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)可以直接用于分析横向高压DMOS关态时, 100 MeV的Ar粒子入射漏区的漏端电流的计算。通过拟合公式的建立, 可以直接预测辐照粒子对被辐射器件的性能参数的影响, 提出抗辐照措施, 缩短抗辐照器件或电路的研制成本和周期。

3 结束语

本文通过对单粒子辐照横向高压DMOS的瞬态响应的分析, 提出了瞬态响应模型。同时, 通过二维仿真软件对横向高压DMOS关态和开态的不同能量粒子辐照瞬态响应进行了数值分析。

参 考 文 献

- [1] Grant D A, Gowar J. Power MOSFET theory and applications [M]. New York: Pergamon Press, 1989
- [2] Musseau O, torres A. Medium-energy heavy-ion single-event-burnout imaging of power MOSFETs[J]. IEEE Trans Nuclear Science, 1999, 46(6): 1 415-1 420
- [3] Allenspach M, Dachs C, Johnson G H, *et al.* SEGR and SEB in N-channel power MOSFETs [J]. IEEE Trans Nuclear Science, 1996, 43(6): 2 927-2 931
- [4] Wheatley C F, Titus J L, Burton D I. Single-event gate rupture in vertical power MOSFET; an original empirical expression[J]. IEEE Trans Nuclear Science, 1994, 41(6): 2 152-2 159
- [5] Mouret I, Calve M C, Calvel P, *et al.* Experimental evidence of the temperature and angular dependence in SEGR [J]. IEEE Trans Nuclear Science, 1996, 43(3): 936-943
- [6] Mouret I, Calvet M C, Allenspach M, *et al.* Measurement of a cross-section for single-event gate rupture in power MOSFETs[J]. Electron Device Letters, 1996, 17(4): 163-165
- [7] Oberg D L, Wert J L, Normand E, *et al.* First observations of power MOSFET burnout with high energy neutrons [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(6): 2 913-2 920
- [8] Mclean P B, Oldham T R. Charge funneling in n- and p- type Si substrate [J]. IEEE Trans Nuclear Science, 1982, 29(6): 2 018-2 023
- [9] Messenger G C. Collection of charge on junction nodes from ion tracks [J]. IEEE Trans Nuclear Science, 1982, 29(6): 2 024-2 028
- [10] Ziegler J F. The stopping and range of ions in solids [M]. New York: Pergamon Press, 1985

编辑 刘文珍

(上接第124页)

4 结论与讨论

本文证明了周期PN序列与非周期PN序列的抗单频干扰能力有很大不同,对周期PN序列而言,单频干扰经过解扩处理后得到序列的幅值在时间上按照正弦规律变化。讨论了两种特殊情况:当单频干扰完全对准载波时它经过解扩后对判决没有任何影响;当单频干扰偏离载波频率在整数倍符号速率上时,它经过解扩处理后的得到一个直流。仿真和实际系统验证进一步证明了结论的正确性。结论对于重新认识采用有限长周期PN序列的DSSS系统对抗单频干扰的能力有重要意义。

虽然给出的模型是基于零中频结构的,但是前面的分析对于非零中频结构的实现同样适用。

作者衷心感谢张邦宁教授、凌聪博士、王华力博士和李少谦教授的指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] Proakis J G.. Digital communications[M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995
- [2] Torrieri D J. Performance of direct-sequence systems with long pseudonoise sequences[J]. IEEE JSAC, 1992, 10(4): 770-781
- [3] 托里埃里 D J著. 军事通信系统原理[M]. 蒋锦星, 应新瑜译. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985
- [4] Simon M K, Omura J K, Scholtz R A, *et al.* Spread spectrum Communications[M]. New York: Computer Science Press, 1985
- [5] 吕海寰, 蔡剑铭, 甘仲明, 等. 卫星通信系统[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1994
- [6] 朱近康. CDMA通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001
- [7] Scholtz R A. The spread spectrum concept[J]. IEEE Trans. Communications, 1977, 25(8): 748-755

编辑 漆蓉