

文章编号: 1001-4322(2002)01-0016-05

# 微电路 pn 结瞬态电离辐射响应二维数值模拟\*

郭红霞<sup>1,2</sup>, 张义门<sup>1</sup>, 陈雨生<sup>2</sup>, 周 辉<sup>2</sup>, 陈世斌<sup>2</sup>,  
龚仁喜<sup>1</sup>, 关 颖<sup>2</sup>, 韩福斌<sup>2</sup>, 龚建成<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学 微电子研究所, 陕西 西安 710071; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘 要:** 用增强光电流模型对微电路 pn 结瞬态电离辐射响应开展了数值模拟计算。该模型在 Wirth-Rogers 光电流模型的基础上, 增加考虑了高注入对过剩载流子寿命的影响以及衬底(准中性区)电场的效应, 这些效应对于高阻材料是不容忽视的。该模型对正确预估微电路 PN 结瞬态电离辐射响应提供了很好的评估手段。

**关键词:** 微电路; 增强光电流模型; Wirth-Rogers 光电流模型; 过剩少数载流子; 高阻材料

中图分类号: TN 99 文献标识码: A

瞬态  $\gamma$  射线、X 射线脉冲辐照, 会使器件的电性能发生瞬间变化。由于电离效应, 在器件中会产生光电流<sup>[1]</sup>。光电流的产生给电子系统引入附加信号使其功能改变, 严重者可对器件的引线烧毁造成永久性破坏。光电流的大小与射线的强度、脉冲持续时间、器件种类、偏置高低和负载大小等因素有关。因此抗瞬态辐射加固是电子系统抗辐射加固研究中的重要组成部分。

光电流由漂移电流和扩散电流两部分构成。漂移电流与偏置场强有关; 扩散电流与扩散长度和少子寿命有关。Wirth 和 Rogers 在 1964 年提出了光电流的一维解析模型<sup>[2]</sup>。包括耗尽区中产生的光电流瞬时分量漂移电流和 PN 结两侧一个少数载流子扩散长度内产生的光电流延迟分量。当辐射脉冲宽度为  $T$  时, 产生的光电流的数学表达式为

$$I_{pp}(t) = eK_g D^{\circ} A [W_j + L_n \operatorname{erf} \sqrt{t/\tau_n} + L_p \operatorname{erf} \sqrt{t/\tau_p}], \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

式中:  $A$  为结面积;  $W_j$  表示耗尽区宽度;  $L_n, L_p$  分别是电子、空穴的扩散长度;  $\tau_n, \tau_p$  分别为电子、空穴的寿命对于 Si 材料,  $K_g = 4.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ Gy}^{-1}$ 。

双极和 CMOS 微电路工艺中, 往往采用高阻衬底或在低阻衬底上外延高阻层。这样不仅提高了器件的耐击穿能力, 而且低掺杂浓度外延层可以使器件的集-基结电容减小, 提高双极器件的高速性能; 对 CMOS 工艺, 该外延层可用来防止器件闩锁。Wirth-Rogers 光电流模型假定忽略衬底高阻材料电场效应以及高注入对少子寿命的影响, 结两边必须是无限的均匀掺杂(相对于少子扩散长度而言), 且该模型与反向偏置电压无关。因此该模型对微电路已不再适用<sup>[3-5]</sup>。有实验数据表明, 对高阻衬底器件, Wirth-Rogers 模型预估的光电流与实测结果差 3 倍。增强光电流模型<sup>[6]</sup>在 Wirth-Rogers 基础上作了两个重要补充: 电场效应及高注入对少子寿命的影响。这两个效应都引起少子收集体积的增加。带外延晶体管外延层少子扩散长度  $L_p$  比外延层厚度  $w$  大得多, 外延晶体管的  $n^+$  外延衬底限制了少子扩散长度, 少子收集体积定义为所有过剩少数载流子被结收集的区域。高注入时, 随着过剩少子数量的增加, 根据 Shockley-Read 理论<sup>[7]</sup>, 在半带陷阱的过剩少子寿命将增加, 寿命的增加直接引起少子扩散长度的增加, 引起光电流增加。衬底电场效应使得少子向结漂移, 有效增加了光电流收集体积。

## 1 数值计算模型

器件模拟采用漂移-扩散理论<sup>[8-10]</sup>。漂移-扩散模型主要由泊松方程、载流子连续性方程、载流子输运

\* 收稿日期: 2001-05-29; 修订日期: 2001-08-07

作者简介: 郭红霞(1964-), 女, 在读博士, 副研究员, 主要从事半导体器件辐射损伤计算机仿真模拟; 西安市 69-13 信箱。

方程三组方程组成。另外,还考虑了衬底(准中性区)电场的效应、高注入对过剩载流子寿命的影响、SRH 复合载流子浓度对寿命的影响、载流子之间散射,包括迁移率随掺杂浓度、温度的变化。

(1) 泊松方程

$$\epsilon \nabla^2 \Psi = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2)$$

式中:  $n, p$  为电子、空穴密度;  $q$  为电子电量;  $N_D^+$  和  $N_A^-$  分别为电离的杂质浓度。

(2) 电子和空穴连续性方程

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_{\text{ion}} - R_n + \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n \quad \frac{\partial p}{\partial t} = G_{\text{ion}} - R_p + \frac{1}{q} \nabla \cdot J_p \quad (3)$$

$J_n, J_p$  分别为电子电流和空穴电流密度;  $R_n, R_p$  分别为电子和空穴复合率;  $G_{\text{ion}}$  为辐射电离产生率;  $t$  为时间。

(3) 电子和空穴电流密度方程

$$J_n = -q\mu_n n \nabla \Psi + kT\mu_n \nabla n, \quad J_p = q\mu_p p \nabla \Psi + kT\mu_p \nabla p \quad (4)$$

总电流密度为:  $J_t = J_n + J_p + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$ 。

(4) 衬底电场效应<sup>[11-14]</sup>: 对于反偏  $p^+n$  结, 光电流密度为  $J$ , 器件内电场由下式给定

$$E = \frac{J}{\sigma} - \frac{kT}{q} \left( \frac{\mu_n - \mu_p}{n\mu_n + p\mu_p} \right) \frac{d\delta\phi}{dx}$$

上式第一项是欧姆场, 第二项是内部产生的电场(也称 Dember 场)。在低剂量率辐照时, 光电流正比与剂量率, 只考虑欧姆场; 高剂量率注入时,  $J$  和电导率  $\sigma$  都正比于剂量率, 欧姆场开始饱和。掺杂浓度越低越容易饱和。在耗尽层边缘处, 光电流大小与载流子分布的斜率有关。

在准中性区, 欧姆场 Dember 共存的光电流可以通过求解包括电场效应的连续性方程得到。

(5) 载流子的产生及载流子复合:  $G_{\text{ion}}$  辐射电离产生率, 对于 Si 材料器件, 电子-空穴对生成能为 3.6eV, 每拉德吸收剂量产生的电子空穴对密度为  $4.12 \times 10^{13}$  (电子-空穴对/ $\text{cm}^3$ ); 复合过程主要是 SRH 复合和 Auger 复合

$$R_n = R_{\text{SRH}} + R_{\text{Aug}}, \quad R_p = R_{\text{SRH}} + R_{\text{Aug}} \quad (5)$$

$$R_{\text{SRH}} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p(n + n_i) + \tau_n(p + p_i)} \quad (6)$$

$$R_{\text{Aug}} = 2.81 \times 10^{-31}(pn^2 - nn_i^2) + 9.9 \times 10^{-32}(np^2 - pn_i^2) \quad (7)$$

以上式中:  $R_{\text{SRH}}$  为 SRH 复合率;  $R_{\text{Aug}}$  为俄歇复合;  $n_i$  为本征载流子浓度。

(6) 寿命、迁移率与载流子浓度的变化关系: 寿命与载流子浓度的关系

$$\tau_n = \frac{1 \times 10^{-7}}{1 + N_T / (7.1 \times 10^{15})}, \quad \tau_p = \frac{1 \times 10^{-6}}{1 + N_T / (7.1 \times 10^{15})} \quad (8)$$

迁移率与载流子浓度的关系

$$\mu_{0n} = 55.24 + \frac{1429.23 \left(\frac{T}{300}\right)^{-2.3} - 55.24}{1 + \left(\frac{T}{300}\right)^{-3.8} \left[\frac{N_{\text{total}}(x, y)}{1.072 \times 10^{17}}\right]^{0.73}}, \quad \mu_{0p} = 49.70 + \frac{479.37 \left(\frac{T}{300}\right)^{-2.2} - 49.70}{1 + \left(\frac{T}{300}\right)^{-3.7} \left[\frac{N_{\text{total}}(x, y)}{1.606 \times 10^{17}}\right]^{0.7}} \quad (9)$$

对方程组进行归一化处理, 消去方程组的一些常数因子, 减少变量间量级相差太大引起的较大截断误差。本文采用 Newton 数值全耦合算法。器件两端均采用欧姆接触, 即满足 Dirichlet 条件, 在欧姆接触处电压降很小<sup>[5,6]</sup>, 可以忽略, 不产生明显的附加阻抗, 不会使半导体内部的平衡载流子发生显著的变化。载流子浓度及电位分布为零偏压时平衡载流子浓度及电位分布。程序提供器件结构指定语句来确定几何结构参数。外延层厚度、外延掺杂浓度、 $n^+$  结峰掺杂等几何参数都可以根据需要进行改变。γ射线脉冲采用 Gaussian 分布。

$$T(t) = 2\exp\left[-\left(\frac{t-T_0}{T_c}\right)^2\right] / T_c \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}\left(-\frac{T_0}{T_c}\right) \quad (10)$$

这里,  $T_0$  对应脉冲峰值时刻, 通过调整  $T_c$  值得到不同脉宽, 但必须满足  $\operatorname{erfc}(-T_0/T_c) = 2$ .

## 2 计算结果及讨论分析

器件采用两种结构: 结构 1 在  $p^-$  衬底上作  $n^+$  埋层, 我们称为  $p^- n^+$ , 结构 2 在  $p^+$  衬底上作  $p^-$  外延层在外延层上再作  $n^+$  埋层, 称为  $p^+ p^- n^+$ , 截面示意图如图 1 所示.

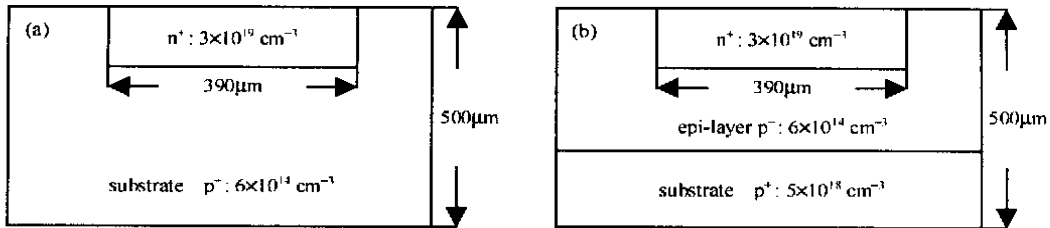


Fig 1 Cross sections of two structures

图 1 两种结构器件截面示意图

图 2 给出不同剂量率下增强光电流模型和 Wirth-Rogers 模型的计算的光电流峰值结果比较, 其中器件外延厚度为  $20\mu\text{m}$ , 结深  $1\mu\text{m}$ ,  $T_c = 75\text{ns}$ ,  $T_0 = 25\text{ns}$ , 偏置电压为  $-5\text{V}$ , 对 Wirth-Rogers 模型, 随剂量率的增大, 光电流线性增加, 增强光电流模型随剂量率增加呈现非线性变化, 剂量率较小时, 线性增加, 在剂量率为  $10^5 \sim 10^9 \text{rad}(\text{Si})/\text{s}$  之间时, 高注入效应和衬底效应引起光电流收集体积的增加, 光电流增加加快. 但当过剩少子寿命达到理论极限时, 光电流随剂量率增加继续线性增加. 随着剂量率的增加, 两种模型计算的结果差异增加<sup>[6, 7, 11]</sup>.

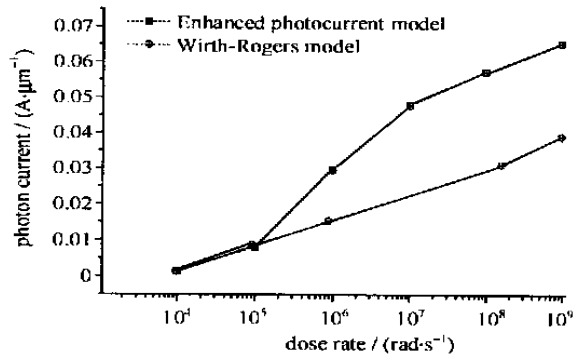


Fig 2 Comparison of enhanced photocurrent model and Wirth-Rogers model

图 2 增强光电流模型和 Wirth-Rogers 模型计算结果比较

图 3 是用增强光电流模型计算  $p^+ p^- n^+$  结构,  $p^- n^+$  结构对应不同剂量率光电流峰值计算结果比较, 图 4 两种结构计算的光电流波形比较.  $p^+ p^- n^+$  结构外延层厚度远远小于少子扩散长度, 外延层限制了少子扩散长度, 图 4 明显看出  $p^+ p^- n^+$  结构光电流波形的后沿扩散成份持续时间小于  $p^- n^+$  结构, 而且低阻衬底上外延高阻层形成的高/低结有效地限制

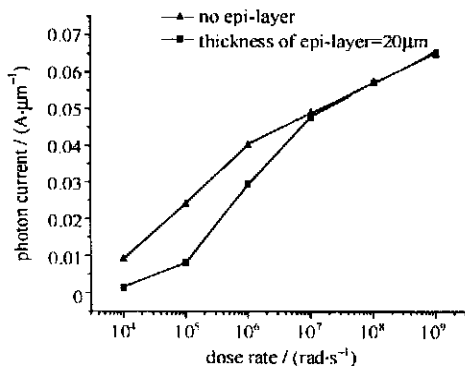


Fig 3 Photocurrent for two structures with enhanced photocurrent model

图 3 用增强光电流模型计算两种结构光电流

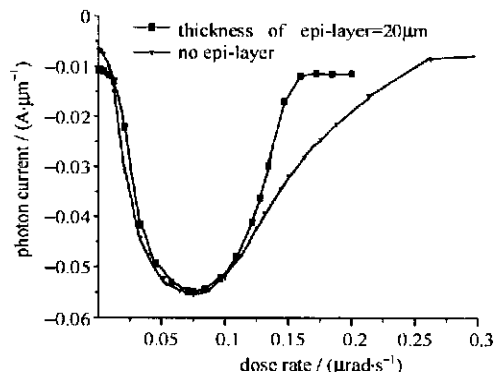


Fig 4 Comparison of photocurrent prediction for two structures

图 4 两种结构光电流波形比较

了光电流收集体积的大小,  $p^+$  衬底的过剩少子寿命要短得多, 对光电流没有贡献, 从理论模拟结果看出, 在  $\gamma$  剂量率不太大时,  $p^+p^-n^+$  结构的光电流小于  $p^-n^+$  结构, 高注入时, 光电流趋于一致<sup>[12, 13]</sup>。

图 5 给出光电流峰值随反向偏压的变化关系, 衬底掺杂浓度  $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 外延层掺杂浓度  $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 外延层厚度  $2 \mu\text{m}$ , 结掺杂浓度  $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 结深  $0.3 \mu\text{m}$ , 剂量率为  $1.4 \times 10^8 \text{ rad/s}$ 。脉冲峰值  $T_0 = 75 \text{ ns}$ , 脉冲宽度  $T_c = 25 \text{ ns}$ , 随着反向偏压增加, 耗尽区宽度不再随反向偏压的增加而改变, 光电流逐渐趋于饱和。图 6 给出在辐照总剂量相同时, 不同脉冲宽度光电流变化关系, 可以看出, 在辐照总剂量相同时, 随着脉冲半宽度增加, 光电流峰值指数减少。

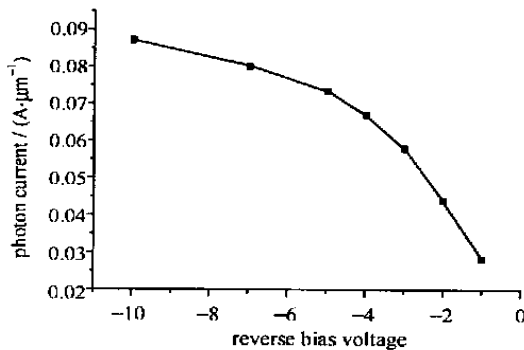


Fig. 5 Peak photocurrent variation as a function of reverse bias voltage

图 5 光电流峰值随反向偏压的变化关系

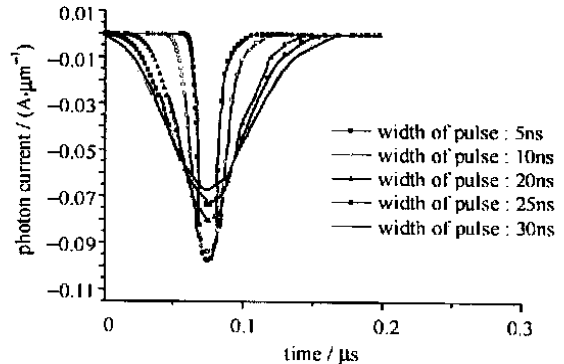


Fig. 6 Photocurrent prediction variation as a function of different width of pulse

图 6 不同脉宽光电流的变化

### 3 结束语

从以上计算结果可以看出, 由于高注入效应和衬底效应均引起光电流收集体积的增加, 随着剂量率的增加, 增强光电流模型计算的光电流与 Wirth-Rogers 模型相比结果差异愈来愈大。低阻衬底上外延高阻层形成的高/低结有效地减小了光电流收集体积, 后沿扩散持续时间缩短。辐照剂量率一定时, 随着反向偏压的增大, 光电流增加并逐渐趋于饱和。辐照总剂量相同时, 随脉冲半宽的增加, 光电流峰值指数减少。增强光电流模型在 Wirth-Rogers 光电流模型的基础上, 增加考虑了高注入对过剩载流子寿命的影响以及衬底(准中性区)电场的效应。这些效应对于高阻材料是不容忽视的。已有实验数据结果表明, 该模型预估的结果与实验数据吻合很好<sup>[14, 15]</sup>。该模型对正确预估新一代微电路 pn 结瞬态电离辐射响应提供了很好的评估手段。

### 参考文献:

- [1] 赖祖武 抗辐射电子学-辐射效应及加固原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998 (Lai ZW. Radiation Hardening Electronics-Radiation Effects and Hardening Techniques Beijing: National Defense Industry Press, 1998)
- [2] Wirth J I, Rogers S C. Transient response of transistors and diodes to ionizing radiation[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1964, **NS-11**: 24
- [3] BEUTLER D E. Comparison of photocurrent enhancement and enhancement in CMOS devices in a medium-energy X-ray environment[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1990, **NS-37**: 1541.
- [4] Pavan P. A complete radiation reliability software simulator[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1994, **NS-41**: 2619.
- [5] Sigfridsson B. Transient radiation effects in CMOS structures related to geometrical dimensions and nuclear radiation pulse forms[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1990, **NS-37**: 1744.
- [6] Enlow E W. Photocurrent modeling of modern microcircuit PN junctions[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1988, **NS-35**: 1467.
- [7] Ma T P. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits[M]. Printed in the United States of America, 1989.
- [8] 何野, 魏同立 半导体器件的计算机模拟方法[M]. 北京: 科学出版社, 1989 (He Y, Wei T L. Methods of computer Simulation in Semiconductor Devices Beijing: Science Press, 1989)
- [9] 张义门, 任建民 半导体器件计算机模拟[M]. 北京: 电子工业出版社, 1991 (Zhang Y M, Ren J M. Computer Simulation in Semiconductor Devices Beijing: Electronic Industry Press, 1991)

- [10] 吉利久 计算微电子学[M]. 北京: 科学出版社, 1990 (Ji L J. Computational Microelectronics Beijing: Science Press, 1990)
- [11] 宋钦岐 外延晶体管瞬时光电流计算[J]. 微电子学, 1988, **18**(6): 43 (Song Q Q. Transient Photocurrent Simulation for Epitaxial Transistor. *Microelectronics*, 1988, **18**(6): 43)
- [12] Massengill L W. Transient radiation upset simulation of CMOS memory circuits[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1984, **NS-31**: 1337.
- [13] Long D M. Transient response model for epitaxial transistors[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1983, **NS-30**: 4131
- [14] Ishaque A N. Photocurrent modeling at high dose rates[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1989, **NS-36**: 2092
- [15] Raymond J P. Analysis and Testing of radiation-induced effects in microcircuits[A]. Conf Short course Notes Monterey[C]. CA. 1981.

## Two-dimensional numerical simulation of microcircuit pn junctions transient radiation response

GUO Hong-xia<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi-mei<sup>1</sup>, CHEN Yu-sheng<sup>2</sup>, ZHOU Hui<sup>2</sup>, CHEN Shi-bin<sup>2</sup>,  
GONG Ren-xi<sup>1</sup>, GUAN Ying<sup>2</sup>, HAN Fu-bin<sup>2</sup>, GONG Jian-cheng<sup>2</sup>

(1. *Microelectronics Institute of Xidian University, Xi'an 710071, China;*

2. *Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China)*

**Abstract** Transient radiation response for microcircuit pn junctions with enhanced photocurrent models are calculated using two-dimensional numerical simulation. On the basis of Wirth-Rogers photocurrent models, the enhanced models include two additional effects as high injection effects on excess minority carrier lifetime and electric fields in the substrate (quasi-neutral regions). These effects are most pronounced in high resistivity material. An excellent evaluation approach is provided for accurate prediction of transient response of modern microcircuit pn junctions to ionizing radiation.

**Key words** microcircuit; enhanced photocurrent models; Wirth-Rogers photocurrent models; excess minority carrier; high resistivity material