

## 二极管 p-n 结杂质浓度分布模型改进<sup>\*</sup>

李潮锐, 刘小伟

(中山大学物理科学与工程技术学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** 简化的突变结或线性缓变结模型已能很好地近似二极管 p-n 结杂质浓度分布规律, 但从精密的实验测量结果中发现传统模型存在局限性。基于随机选取常用产品的 C-V 实验数据, 利用泊松方程并结合提出的改进模型, 可以更准确地描述 p-n 结杂质浓度分布。虽然部分样品 C-V 关系可由指数 1/2 或 1/3 独立表示, 但数据拟合分析显示采用指数  $n=1/2$  和  $n=1/3$  两模型分量共同描述更合理。模型改进可获得更准确的 p-n 结杂质浓度分布规律及物理参数。

**关键词:** p-n 结; 杂质浓度; C-V 法; 泊松方程

**中图分类号:** O474 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 03-0037-05

二极管 p-n 结两侧正负电荷粒子形成电偶极矩而使 p-n 结具有电容特性, 且随偏置电场强度而变化。基于反向偏压载流子耗尽近似且认为杂质完全电离, 则空间电荷密度完全取决于杂质浓度, 从而 p-n 结电容量基本反映了 p-n 结间杂质浓度分布。p-n 结电容随偏置电场 (电压) 变化源于在电场作用下 (假想的) 电容平行板移动, 并由平行板所在处离子浓度和板间距所决定。进一步假设耗尽层压降等于外偏置电压, 即偏置电场完全作用于 p-n 结“电容器”两端。因此, 通过测量二极管 p-n 结 C-V 变化关系, 可以获取 p-n 结杂质浓度纵向分布信息<sup>[1-5]</sup>。

最简化的突变结模型提供了处理问题的物理思路和方法, 线性缓变结模型也成为高斯分布或余误差分布的最好近似。在过去几十年, 这两种方法已成为研究 p-n 结杂质分布的有效常用分析手段<sup>[6-12]</sup>。随着实验技术方法改进和测量精度及准确性提高, p-n 结 C-V 变化关系呈现了更多物理信息。尽管传统的突变结或线性缓变结模型已能很好地分析二极管 p-n 结杂质浓度分布问题, 但本文基于精密实验测量结果并采用改进的简化模型进行讨论分析有助于获得更准确物理参数。

### 1 原理与技术

在空间电荷区域, 电场、电势与电荷关系由泊松方程描述。对于二极管 p-n 结电荷区, 若仅考虑纵向分布, 可简化为一维问题。其泊松方程为

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_0$  和  $\epsilon_r$  分别为真空介电常数和半导体材料相对介电常数,  $\rho(x)$  和  $V(x)$  为空间中净电荷密度和电势, 它们均为  $x$  的函数。

根据耗尽层假设, 同时认为杂质完全电离。对于突变结模型, p-n 结两端总电势差与结电容 C 关系为

$$V_D - V_A = \frac{eA^2 \epsilon_0 \epsilon_r N^*}{2} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^2 \quad (2)$$

式中,  $V_A$  和  $V_D$  分别为 p-n 结两端外置偏压和接触电势差,  $e$  为基本电荷量,  $A$  为结面积,  $N^*$  为约化浓度。通常, p-n 结两侧掺杂浓度相差几个数量级, 约化浓度  $N^*$  可由轻掺杂的单边结浓度表示。根据 C-V 变化指数的定义, 由式 (2) 可得突变结  $n=1/2$ 。

对于线性缓变结模型, 则有

$$V_D - V_A = \frac{eA^3 (\epsilon_0 \epsilon_r)^2 \alpha}{12} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^3 \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为杂质浓度梯度, 其它参数的意义与式 (2) 相同。由式 (3) 可得线性缓变结 C-V 变化指数  $n=1/3$ 。

若将式 (2) 和 (3) 表示为通式

$$V_D - V_A \propto \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

则, 可以认为指数  $n=1/2$  和  $n=1/3$  分别描述突变结和线性缓变结模型的 C-V 变化关系, 由  $C^{-1} \rightarrow 0$

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10675175); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20050558034)

作者简介: 李潮锐 (1962 年生), 男, 博士, 副教授; E-mail: zdstler@mail.sysu.edu.cn

可获得接触电势差  $V_D$ 。

假设杂质浓度分布为

$$\rho(x) = \rho_0 + \alpha ex \quad (5)$$

式中,  $\rho_0$  可理解为浓度分布基底,  $\alpha$  为杂质浓度梯度,  $e$  为基本电荷量。由式 (1) 并采用突变结或线性缓变结模型求解思路, 考虑轻掺杂单边结近似, 可以简单地获得

$$V_D - V_A = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \rho_0 A^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^2 + \frac{\alpha e A (\varepsilon_0 \varepsilon_r)^2 A^3}{3} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^3 \quad (6)$$

式中参数的意义与式 (2)、(3) 和 (5) 相同。由此可见, 二极管 p-n 结  $C-V$  关系由指数  $n=1/2$  和  $n=1/3$  分量共同描述。采用与式 (2) 或 (3) 类似处理方法, 由  $C^{-1} \rightarrow 0$  可以得到接触电势差  $V_D$ 。

本文采用锁相技术测量二极管 p-n 结电容  $C$  随反向偏压  $V$  变化关系。由 DS360 低畸变信号源提供 1 kHz 交流源信号, 使用 SR830 双通道数字锁相放大器检测 p-n 结阻抗从而获得样品微分电容; Keithley2400 恒压源提供实验所需的反向偏压, 并使用 Fluke45 多用电表监测 p-n 结两端压降。实验系统由计算机实时测控/数据采集并结果分析/显示。随机抽取市售稳压二极管 2CW911、整流二极管 1N5400、1N5401、1N5402、1N5404、1N5406、1N5408、变容二极管 MV2109 和 M207-3 各一件, 共 9 件二极管样品。为提高实验测量准确性, 二极管样品 (包括自制测试盒) 放置于屏蔽保护箱中以免受外界电磁信号干扰和环境温度变化影响。

## 2 结果及分析

实验数据显示, 所有二极管样品 p-n 结电容  $C$  均随反向偏压  $V$  增加而减小。尽管从  $C-V$  实验数据难以发现二极管样品间明显的个性差异, 但是从它们的  $C^2-V$  或  $C^{-3}-V$  和  $C^{-1}-V$  曲线关系可以看出, 这些样品  $C-V$  测量结果可分为三类, 说明实验所用样品 p-n 结杂质浓度分布分别遵从三种不同规律。

### 2.1 指数情形

图 1 为变容二极管 MV2109 的  $C-V$  实验数据、 $C^2-V$  和  $C^{-3}-V$  曲线关系。从图 1 (b) 可见,  $C^2-V$  近似为直线, 且由  $C^{-1} \rightarrow 0$  可获接触电势差  $V_D = 1.285$  V; 而图 1 (c) 的  $C^{-3}-V$  关系非直线。由此可见, 该样品 p-n 结杂质浓度分布符合指数模型, 即为突变结模型。

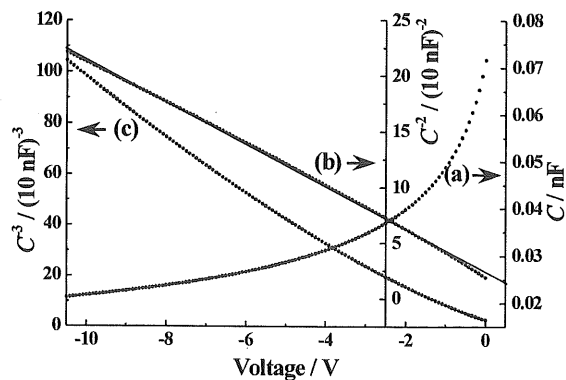


图 1 变容二极管 MV2109 (a)  $C-V$  实验数据、(b)  $C^2-V$  和 (c)  $C^{-3}-V$  曲线关系

Fig. 1 (a)  $C-V$  experimental data, (b)  $C^2-V$  and (c)  $C^{-3}-V$  relations on diode MV2109

变容二极管 M207-3 实验结果与 MV2109 类似, 可以由指数模型独立描述, 并由  $C^{-1} \rightarrow 0$  得到接触电势差, 结果列于表 1 中。可以认为, 变容二极管 MV2109 和 M207-3 的杂质浓度分布均属突变结模型。

### 2.2 指数 $n=1/3$ 情形

图 2 为稳压二极管 2CW911 的  $C-V$ 、 $C^2-V$  和  $C^{-3}-V$  曲线关系。从图 2 (b) 可见,  $C^2-V$  关系非直线; 只有图 2 (c) 的  $C^{-3}-V$  关系近似为直线。由此可见, 该样品 p-n 结杂质浓度分布符合指数  $n=1/3$  模型, 即为线性缓变结, 且由  $C^{-1} \rightarrow 0$  得到接触电势差为 0.859 V。

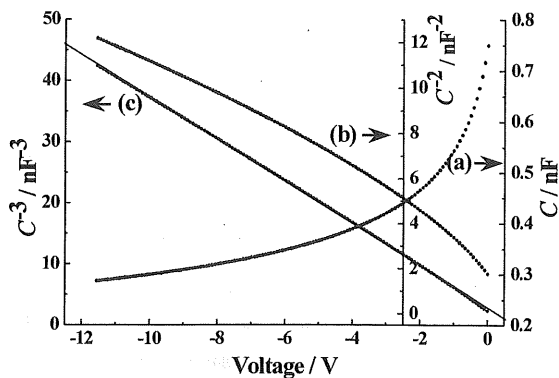


图 2 稳压二极管 2CW911 (a)  $C-V$ 、(b)  $C^2-V$  和 (c)  $C^{-3}-V$  曲线关系

Fig. 2 (a)  $C-V$  experimental data, (b)  $C^2-V$  and (c)  $C^{-3}-V$  relations on diode 2CW911

整流二极管 1N5401 和 1N5406 实验结果与 2CW911 类似, 它们均可以由指数  $n=1/3$  模型独立描述, 并由  $C^{-1} \rightarrow 0$  得到接触电势差, 结果列于表 1 中。由此可见, 稳压二极管 2CW911、整流二

极管 1N5401 和 1N5406 的杂质浓度分布均属线性缓变结模型。

2.3 指数和共存

上述分析结果表明，部分二极管样品 p-n 结 C—V 关系可以由指数  $n=1/2$  或  $n=1/3$  独立描述，即可以简单地采用突变结模型或线性缓变结模型近似。基于锁相技术的精密实验观测显示，本研究所抽取的部分二极管样品 p-n 结 C—V 关系较为复杂，它们不能由上述单一模型给予准确描述。图 3 所示整流二极管 1N5402 实验结果体现了单一突变结模型或线性缓变结模型的局限性。尽管表面上图 3 (a) C—V 与图 1 (a) 和图 2 (a) 曲线关系类似，但是由图 3 (a) 实验数据分析所得到的图 3 (b)  $C^{-2}$ —V 和图 3 (c)  $C^{-3}$ —V 曲线均不存在简单的直线关系。这些事实说明，不管是指数还是指数都不能独立准确地描述图 3 所示的实验结果。从图 3 (b)  $C^{-2}$ —V 和图 3 (c)  $C^{-3}$ —V 变化可以看出，样品 p-n 结 C—V 关系既存在指数  $n=1/2$  模型分量又包含着  $n=1/3$  模型分量。为了进一步分析实验结果，由图 3 (a) 原始数据可以得到图 4 所示的  $V$ — $C^{-1}$  关系曲线。拟合分析结果显示，采用式 (6) 可以准确地描述图 4 数据关系。可以认为，实验所用整流二极管 1N5402 杂质浓度分布并

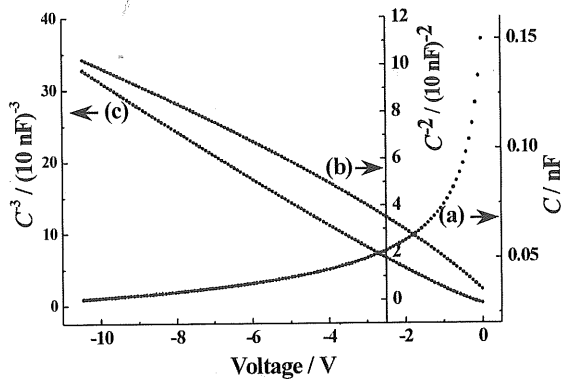


图 3 整流二极管 1N5402 (a) C—V、(b)  $C^{-2}$ —V 和 (c)  $C^{-3}$ —V 曲线关系

Fig. 3 (a) C—V experimental data, (b)  $C^{-2}$ —V and (c)  $C^{-3}$ —V relations on diode 1N5402

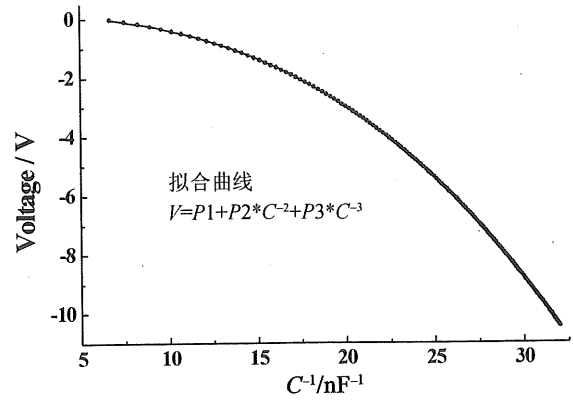


图 4 由图 3 (a) 实验数据所得到的  $V$ — $C^{-1}$  关系及拟合曲线

Fig. 4  $V$ — $C^{-1}$  relation and its curve fitting with data from Fig. 3 (a)

非简单突变结或简单线性缓变结，而必需由式 (5) 所表示的改进模型描述。采用类似于图 1 (b) 和图 2 (c) 方法，由  $C^{-1} \rightarrow 0$  得到接触电势差或直接从曲线拟合结果可获得  $V_D = 0.201V$ 。

整流二极管 1N5400、1N5404 和 1N5408 实验结果与 1N5402 类似。根据上述分析可知，它们均属指数  $n=1/2$  和  $n=1/3$  两分量共存模型，杂质浓度分布可由式 (5) 表示。直接从曲线拟合结果可获得它们的接触电势差，这些结果列于表 1 中。

事实上，尽管图 1 (b) 和图 2 (c) 分别描述了突变结模型和线性缓变结模型的实验结果，但是基于精密测量数据可以看出这种表示方法并不完整，它仅能做为一般精度实验测量时对理论模型的近似。进一步拟合分析表明，对图 1 和图 2 实验数据采用指数  $n=1/2$  和  $n=1/3$  模型共同描述可以得到更准确的实验结果。因此，可以认为相对于单一突变结模型或单一线性缓变结模型，基于式 (5) 杂质浓度分布模型所体现式 (6) 的  $V$ — $C^{-1}$  关系更具普适性。表 1 给出了由单一指数  $n=1/2$  或  $n=1/3$  模型部分样品及采用指数  $n=1/2$  和  $n=1/3$  两模型分量共同描述所得到全部二极管样品的接触电势差。

表 1 不同模型所获得的接触电势差  $V_D$

Tab. 1 The contact potential differences obtained with various models

| 样品           | MV2109 | M207-3 | 2CW911 | 1N5400 | 1N5401 | 1N5402 | 1N5404 | 1N5406 | 1N5408 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $n=1/2$      | 1.285  | 1.318  |        |        |        |        |        |        |        |
| $n=1/3$      |        |        | 0.859  |        | 0.391  |        |        | 0.336  |        |
| $n=1/2, 1/3$ | 0.867  | 0.839  | 0.481  | 0.036  | 0.146  | 0.201  | 0.174  | 0.235  | 0.541  |

### 3 结 论

宏观上貌似相同的二极管样品  $p-n$  结  $C-V$  关系却隐含着微观上杂质浓度分布个性差异。准确描述杂质浓度分布规律存在困难,但是在耗尽层和杂质完全电离假设的基础上,大量实验研究数据显示采用突变结模型和线性缓变结模型是很好的理论近似。基于锁相技术的精密实验观测数据发现:使用独立指数  $n=1/2$  或  $n=1/3$  模型并不能准确地描述  $p-n$  结电容随反向偏压变化实质。本文提出了基于式(5)的杂质浓度分布模型并得到式(6)所表示的  $V-C^{-1}$  关系,它准确地描述了既非突变结模型又非线性缓变结模型  $p-n$  结实验结果。从上述分析过程中可以看出,即使对于可由突变结模型或线性缓变结模型独立表示也只是一近似分析方法,单一  $(C^{-1})^{\frac{1}{n}}-V$  曲线拟合并非完全为直线关系。采用式(6)指数  $n=1/2$  和  $n=1/3$  两模型分量共同描述,可以得到更准确的实验结果表示方法,从而也有助于准确获取二极管  $p-n$  结杂质浓度分布规律及物理参数。

#### 参考文献:

- [1] 叶新民. 变容二极管  $C-V$  特性的控制技术[J]. 电子技术, 1999, 27(1): 39-43.  
XIE Xinmin. Control technology of  $C-V$  characteristics for variable capacitance diode [J]. Microelectronic Technology, 1999, 27(1): 39-43.
- [2] 林树治, 宋毅. 半导体杂质分布曲线的直接描绘[J]. 固体电子学研究与进展, 1982, 2(1): 34-38.  
LIN Shuzhi and SONG Yi. Directly plotting impurity profile of semiconductor [J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 1982, 2(1): 34-38.
- [3] 成立. PN 结压变电容特性的应用研究[J]. 半导体杂志, 1999, 24(1): 8-13.  
CHENG Li. New research and progress on the characteristic  $C_j=f(U_j)$  of any PN junction [J]. Semiconductor, 1999, 24(1): 8-13.
- [4] 何德湛.  $C-V$  技术及其在半导体工艺检测上的应用[J]. 半导体技术, 2000, 25(3): 29-31, 33.  
HE Dezhan.  $C-V$  techniques and its application for semiconductor process detection [J]. Semiconductor Technology, 2000, 25(3): 29-31, 33.
- [5] 贺莉, 纪跃芝, 刘国彩. 混合掺杂半导体载流子浓度的数值计算[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2007, 28(2): 165-168.  
HE Li, JI Yuezhi, LIU Guocai. Calculation for the concentration of mix-impurity semiconductor carrier [J]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 28(2): 165-168.
- [6] 傅兴华, 陈军宁. 一种反求杂质浓度的数值方法—基于 CV 数据的逐点反求多次循环法[J]. 电子学报, 1992, 20(5): 33-38.  
FU Xinghua and CHEN Junning. A point by point multiple sweeps numerical algorithm for dopant profiling based on CV data [J]. Acta Electronica Sinica, 1992, 20(5): 33-38.
- [7] 翁寿松, 毛立平. 超突变结变容二极管的杂质浓度分布及  $n$  值[J]. 半导体技术, 2000, 25(1): 31-32, 38.  
WENG Shousong and MAO Liping. Distribution of impurity concentration and  $n$  value for hyperabrupt varactor [J]. Semiconductor Technology, 2000, 25(1): 31-32, 38.
- [8] 屈盛, 刘祖明, 廖华, 等. 晶体硅扩散层有效杂质的浓度分布[J]. 太阳能学报, 2006, 27(3): 295-299.  
QU Sheng, LIU Zuming, LIAO Hua, et al. Study of the effective doping concentration profile in crystalline silicon diffusion layer [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(3): 295-299.
- [9] 任红霞, 荆明娥, 郝跃. 杂质浓度对槽栅 PMOSFET 抗热载流子特性的影响[J]. 固体电子学研究与进展, 2002, 22(2): 174-180.  
REN Hongxia, JING Ming, HAO Yue. Influence of doping density on hot-carrier-effect in grooved gate PMOSFET [J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2002, 22(2): 174-180.
- [10] 哈力木拉提, 阿拜, 拜山, 等.  $p-n$  结二极管结区边界附近的交流电特性[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 1161-1165.  
HALIMULATL, ABAI, BAISHAN, et al. Boundary alternating current characteristics of an ideal  $p-n$  junction diode [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(2): 1161-1165.
- [11] 彭承, 盛麓, 孙恒慧. 单边分子束外延硅  $pn$  结  $C-V$  关系的新特点[J]. 物理学报, 1988, 37(6): 1025-1029.  
PENG Cheng, SHENG Chi, SUN Henghui. New  $C-V$  characteristic of Si  $pn$  diodes prepared by molecular beam epitaxy [J]. Acta Physica Sinica, 1988, 37(6): 1025-1029.
- [12] 林金庭, 徐稼迟, 王因生, 等. 双掺硅单晶及其  $pn$  结研究[J]. 固体电子学研究与进展, 1994, 4(4): 1-8.  
LIN Jintong, XU Jiachi, WANG Yinsheng, et al. An investigation on dual-dopant Si and its  $p-n$  junction [J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 1994, 4(4): 1-8.

(下转第46页)

工出版社, 1989.

- [10] SRAROVSKY L. Solid-Liquid separation [M]. Ind Ed Butterworths, 1981.
- [11] 郭金基, 陈海, 张应元, 等. 烟火粉尘旋流分离性能的计算及其环保应用 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2000, 39(1): 18-22.

GUO Jinji, CHEN Hai, ZHANG Yingyuan, et al. The separating characteristic computation of the swirl fluid dust and its application in environmental treatment [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2000, 39(1): 18-22.

## The Environmental Application and Separation Performance Analysis of the Fluid - Solid (Gas) Swirl-Liquid Separator

ZHANG Zuo-ping<sup>1</sup>, CHEN Hai<sup>2</sup>, GUO Jin-ji<sup>2</sup>, ZHANG Kai-cheng<sup>3</sup>, YAO Yun<sup>3</sup>, LI Hang-fei<sup>3</sup>, HE Wei<sup>3</sup>

(1. Guangdong Province Construction Science Academy, Guangzhou 510500, China;

2. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Zhongshan Shengxing Limited-Liability Company, Zhongshan 528412, China)

**Abstract:** The structural property of the fluid-solid (gas) swirl-liquid separator for environmental protection and chemical industry is described. Their flow field structure is analyzed, then the flow line and mobile phenomenon are observed. According to a series of experiment data, the velocity function of quasi-free-vortex in cylinders are calculated. Using the 2D axisymmetric cylindrical vortex model, this pressure distribution of quasi-free-vortex in cylinders are studied. By the principle of fluid-solid (gas) liquid swirl, the separation particle diameter and efficiency are discussed. Through experimental technique the fluid flow of the fluid-solid (gas) swirl-liquid separator are explained. Finally, the examples of environmental projects are introduced, and the application prospects are discussed.

**Key words:** fluid-solid (gas) swirl-liquid; separators; velocities; flow line; pressure; separation particle diameter.

(上接第 40 页)

## An Improved Model for Analysis on Impurity Distribution in Diode p - n Junction

LI Chao-rui, LIU Xiao-wei

(School of Physics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The impurity concentration distribution in diode p - n junction can be presented with the simplified models, named as abrupt junction and the linearly graded junction, but precise measurements show there existing limitation in these tradition models. Based on capacity-voltage experiment data from the most common commercial diodes, the impurity distribution in p - n junction will be described more accurately with use of improved model. Though  $C - V$  relation of some samples can be independently expressed with unique component of  $n = 1/2$  or  $n = 1/3$ , others must be explained by the modified model with both of  $n = 1/2$  and  $1/3$  components. The new model provides the method to get more accurate physics parameters for diode p - n junction.

**Key words:** p - n junction; impurity concentration; capacity-voltage method; Passion equation