

二极管非超突变结 C - V 幂律分析*

李潮锐, 唐 强, 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: 基于杂质浓度分布的突变结或线性缓变结模型, 二极管 p - n 结(电)容-(电)压关系可简单地由 C - V 幂律描述。精密的实验测量数据显示, 采用指数 $n = 1/2$ 或 $n = 1/3$ 不足以全面描述非超突变结 C - V 关系。通过引入杂质浓度幂函数分布规律并利用泊松方程, 从而获得二极管 p - n 结 C - V 幂律通式, 而指数 $n = 1/2$ 或 $n = 1/3$ 仅是新模型的特例。运用合理的数据处理技术, 由一系列实验结果说明该幂律分析方法更具普适性。

关键词: p - n 结; 杂质浓度; C - V 幂律; 泊松方程

中图分类号: O474 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 04-0020-04

Power-law for Analysis of Impurity Distribution in Non-hyperabrupt Junction

LI Chaorui, TANG Qiang, LIU Xiaowei

(School of Physics & Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Power-law can present the relation of capacity-voltage for diode abrupt p - n junction and the linearly graded p - n junction, but precise measurements show there existing limitation in these tradition models. Based on experiment data from the most common commercial diodes, the power-law with $n = 1/2$ or $n = 1/3$ can not well described the non-hyperabrupt junction. The universal form of power-law is formulated from Poisson equation for impurity concentration distribution in diode p - n junction. With improved C - V power-law, data from non-hyperabrupt junction can be expressed accurately with this modified model but the component of $n = 1/2$ or $n = 1/3$ as the simple cases. The improved C - V power-law develops the new method to get more accurate physics parameters for diode p - n junction.

Key words: p - n junction, impurity concentration, C - V power-law, Poisson equation

二极管 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 结电容随偏置场变化关系反映了 p - n 结间杂质浓度分布。因此, 通过测量研究二极管 p - n 结 C - V 数据, 可以获取 p - n 结杂质浓度纵向分布信息^[1-5]。尽管最简化的突变结和线性缓变结模型已成为分析 p - n 结杂质分布的有效常用手段^[6-12], 但是精密实验测量显示指数 $n = 1/2$ 或 $n = 1/3$ 不能全面描述非超突变结 C - V 关系。本文提

出杂质浓度幂函数分布规律并考虑轻掺杂单边结近似, 获得二极管 p - n 结 C - V 幂律通式并分析了实验数据处理方法。通过一系列实验结果说明幂函数分布规律的科学性。

1 原理与技术

二极管 p - n 结电荷区, 其电场、电势与电荷关系由泊松方程描述, 即

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

* 收稿日期: 2008-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10505033; 10675175)

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

式中, ε_0 和 ε_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。对于突变结和线性缓变结模型, p-n 结两端总电势差与结电容 C 关系可表示为通式

$$V_D - V_A \propto \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

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。根据 C - V 变化指数 n 的定义, 式 (2) 中 n 取值 $1/2$ 和 $1/3$ 分别描述突变结和线性缓变结模型。且由 $C^{-1} \rightarrow 0$ 可获得接触电势差 V_D 。

上述仅考虑杂质分布的两种特殊情形。一般情况, 假设杂质浓度分布为

$$\rho(x) = \alpha x^\beta \quad (3)$$

式中, α 和 β 均为杂质浓度分布参数。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, 可得

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

式中, k 为指数, 其它参数的意义与式 (2) 相同。当式 (3) 中 $\beta = 0$ 和 $\beta = 1$ 时, 对应于式 (4) 指数 k 分别为 $k = n = 1/2$ 和 $k = n = 1/3$, 即与突变结或线性缓变结模型一致。由此可见, 式 (2) 是式 (4) 的特例。可以认为, 由式 (3) 所描述的杂质浓度分布具有更广泛的适用性。

引入参数 p_0 、 p_1 和 p_2 , 且用 V 代表 V_A , 则式 (4) 可改写为

$$V = p_0 + p_1 \cdot (C^{-1})^{p_2} \quad (5)$$

其中, $p_0 = V_D$, p_1 为比例常数, $p_2 = 1/k$ 。以 C^{-1} 为自变量, 求上式微分, 即

$$\frac{dV}{d(C^{-1})} = p_1 \cdot p_2 (C^{-1})^{(p_2-1)} \quad (6)$$

由式 (5) 和 (6) 可得

$$V = p_0 + \frac{1}{p_2} \cdot \frac{dV}{d(C^{-1})} \cdot (C^{-1}) \quad (7)$$

将参数 $p_0 = V_D$ 和 $p_2 = 1/k$ 代入上式, 得

$$V = V_D + k \cdot \frac{dV}{d(C^{-1})} \cdot (C^{-1}) \quad (8)$$

由实验精密测量 p-n 结 C - V 数据可获取 V - C^{-1} 关系并运用数值计算进一步得到 $\frac{dV}{d(C^{-1})}$ 和

$\frac{dV}{d(C^{-1})} \cdot C^{-1}$ 。通过 $V = \frac{dV}{d(C^{-1})} \cdot C^{-1}$ 曲线拟合, 其斜率为指数 k , 而截距为 V_D 。

为了检验上述模型及数据处理方法的科学性和可应用性, 精密测量了随机抽取市售 9 件二极管样品的 C - V 数据。实验技术方法已于文献 [13] 中详细说明。

2 结果及分析

图 1~3 显示了变容二极管 M207-3、整流二极管 1N5406 和 1N5408 的 C - V 实验数据, 以及它们的 C^{-2} - V 或 C^{-3} - V 关系。可以看出, 图 1 (b) C^{-2} - V 近似为直线, 而图 1 (c) 的 C^{-3} - V 关系非直线, 即变容二极管 M207-3 符合指数 $n = 1/2$ 的突变结模型; 图 2 (b) C^{-2} - V 关系非直线, 图 2 (c) C^{-3} - V 关系近似为直线, 即整流二极管 1N5406 符合指数 $n = 1/3$ 的线性缓变结模型; 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, 说明整流二极管 1N5408 不能由简单突变结或线性缓变结模型描述。

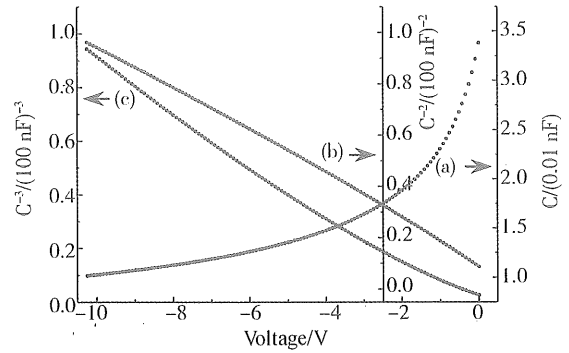


图 1 变容二极管 M207-3 (a) C - V 实验数据、(b) C^{-2} - V 和 (c) C^{-3} - V 曲线关系

Fig. 1 (a) C - V experimental data, (b) C^{-2} - V and (c) C^{-3} - V relations on diode M207-3

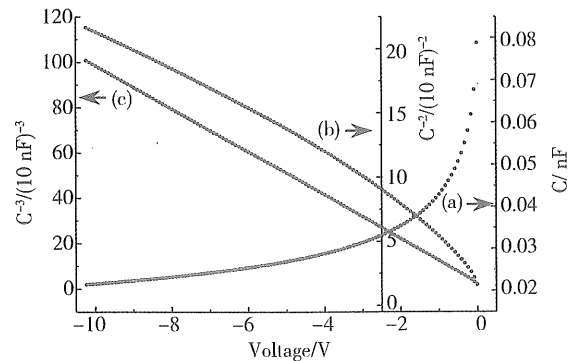


图 2 整流二极管 1N5406 (a) C - V 、(b) C^{-2} - V 和 (c) C^{-3} - V 曲线关系

Fig. 2 (a) C - V experimental data, (b) C^{-2} - V and (c) C^{-3} - V relations on diode 1N5406

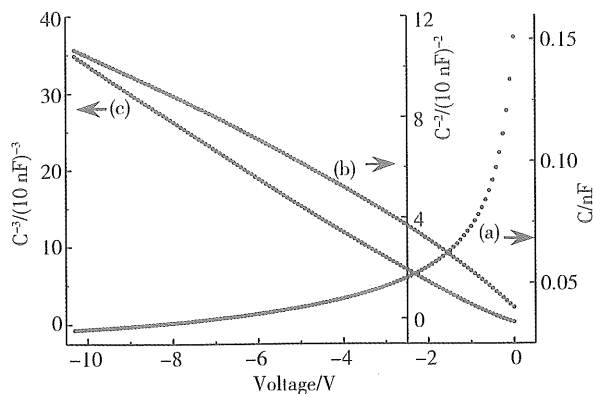


图3 整流二极管1N5408 (a) $C-V$ 、
(b) $C^{-2}-V$ 和(c) $C^{-3}-V$ 曲线关系

Fig. 3 (a) $C-V$ experimental data, (b) $C^{-2}-V$
and (c) $C^{-3}-V$ relations on diode 1N5408

由图3(a)原始数据,采用式(8)分析方法可得图4实验结果。由此可见,尽管不能简单地由突变结模型或线性缓变结模型单独分析图3实验数据,但采用本文提出的式(3)模型则很好地描述了这一物理过程。基于精密测量数据拟合可得幂指数为0.376,介于突变结模型的1/2或线性缓变结的1/3之间。使用式(3)模型对图1和2数据依据式(8)关系进行处理分析,结果显示它们的指数分别很接近1/2和1/3,从而也说明新模型具有更普遍适用性。可以认为,突变结模型或线性缓变结模型仅是一般精度实验测量时对理论模型的合理近似。从精密测量数据分析可以看出,采用式(3)模型描述可以得到更准确的实验结果。

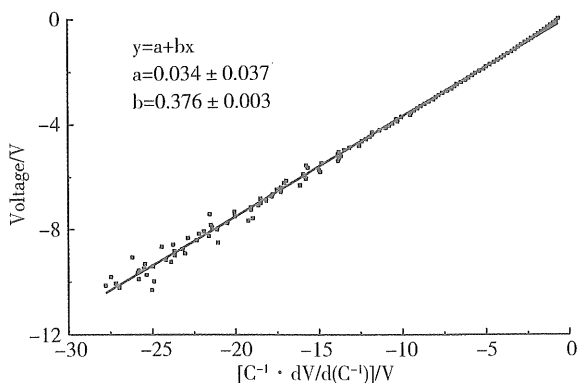


图4 由图3(a)实验数据所得到的
 $V - C^{-1} \cdot dV/d(C^{-1})$ 关系及拟合直线

Fig. 4 $V - C^{-1} \cdot dV/d(C^{-1})$ relation and its
curve fitting with data from Fig. 3 (a)

3 结论

从精密测量数据分析可见,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。尽管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,采用突变结模型和线性缓变结模型依然是很好的理论近似。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 $n=1/3$ 模型并不能完全描述p-n结电容 C 随反向偏压 V 变化实质。采用本文所提出的式(3)杂质浓度分布通用模型并得到式(8)所表示的 $C-V$ 关系,它不仅完整地描述突变结模型或线性缓变结模型,而且准确地描述了既非突变结又非线性缓变结的p-n结实验结果。上述分析说明,式(3)模型更具普适性。

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, 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, 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, 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 Energetica 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.
- HALIMULATI, 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, 盛箴, 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 Jinting, 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.
- [13] 李潮锐, 刘小伟. 二极管 $p-n$ 结杂质浓度分布模型改进[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(3): 37 - 40, 46.
- LI Chaorui, LIU Xiaowei. An improved model for analysis on impurity distribution in diode $p-n$ junction [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(3): 37 - 40, 46.

(上接第 19 页)

参考文献

- [1] THURSTON W P. The finite Riemann mapping theorem [C]. Invited Talk at the International Symposium on the Occasion of the Bieberbach Conjecture, 1985.
- [2] RODIN B, SULLIVAN D. The convergence of circle packings to the Riemann mapping [J]. J Differential Geometry, 1987, 26: 349 - 360.
- [3] MARDEN A, RODIN B. On Thurston's formulation and proof of Andreev's theorem [J]. Lect Notes Math, 1990, 1435: 103 - 115.
- [4] BEARDON A F, STEPHENSON K. The uniformization theorem for circle packings [J]. Indiana Univ Math J, 1990, 39: 1383 - 1425.
- [5] HE Z X. Rigidity of infinite disk patterns [J]. Ann of Math, 1999, 149: 1 - 33.
- [6] HE Z X, SCHRAMM O. The C^∞ -convergence of hexagonal disk packings to the Riemann map [J]. Acta Math, 1998, 180: 219 - 245.
- [7] SCHRAMM O. Circle patterns with the combinatorics of the square grid [J]. Duke Math J, 1997, 86: 347 - 389.
- [8] LAN S Y, DAI D Q. The C^∞ -convergence of SG circle patterns to the Riemann mapping [J]. J of Math Anal and Appl, 2007, 332: 1350 - 1363.
- [9] AGAFONOV S I, BOBENKO A I. Discrete z' and Painlevé equations [J]. Internat Math Res Notes, 2000, 4: 165 - 193.
- [10] BOBENKO A I, HOFFMANN T, SURIS YU B. Hexagonal circle patterns and integrable systems: patterns with the multi-ratio property and Lax equations on the regular triangular lattice [J]. Internat Math Res Notices, 2002, 3: 111 - 164.
- [11] BOBENKO A I, HOFFMANN T. Hexagonal circle patterns and integrable systems: patterns with constant angles [J]. Duke Math J, 2003, 116(3): 525 - 566.
- [12] AGAFONOV S I, BOBENKO A I. Hexagonal circle patterns with constant intersection angles and discrete Painlevé and Ricci equations [J]. J Math Phys, 2003, 44(8): 3455 - 3469.
- [13] ITS A R. "Isomonodromic" solutions of equations of zero curvature [J]. Math USSR Izv, 1983, 26: 497 - 529.