

通过核磁共振成像区分肥瘦肉组织

居慧雯, 姚红英, 俞 熹

(复旦大学 物理系, 上海 200433)

摘要: 核磁共振成像技术在生物医学领域有广泛应用, 在近代物理实验课程中开设核磁共振成像实验有助于加深对其复杂原理的理解. 本文介绍了在实验室的小型设备上用软脉冲自旋回波序列对猪肉进行 T_1 加权成像, 从而把肥肉和瘦肉在成像中分离的过程.

关键词: 核磁共振; 二维核磁共振成像; 自旋回波序列; 加权成像

中图分类号: O 482.532 文献标识码: A 文章编号: 1000-0712(2015)06-0062-04

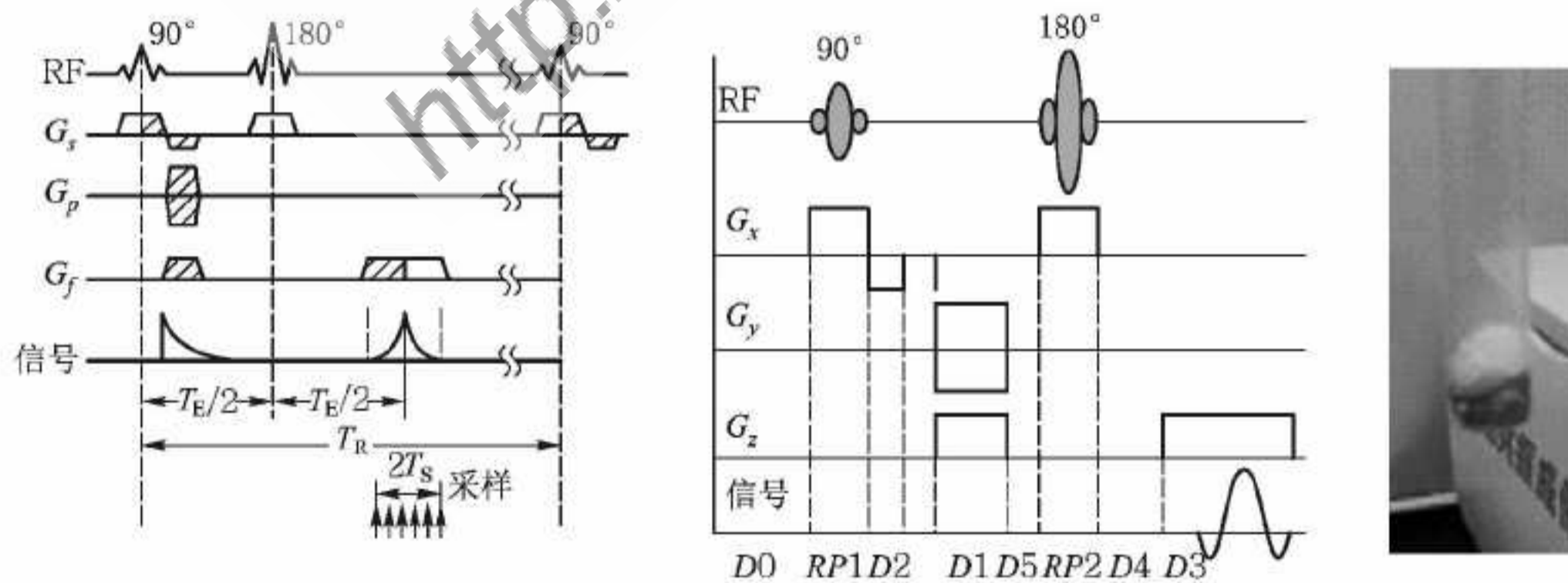
1973 年 Lauterbur 首次得到核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance, 简称 NMR) 图像 [1, 2], 自此核磁共振成像学 (Nuclear Magnetic Resonance Imaging, 简称 MRI) 成为 NMR 技术的一个重要分支. 目前, MRI 因其分辨率高、无电离辐射损伤、多参数采集等优点 [3], 在生物医学领域已有广泛应用. 本文将介绍如何在近代物理实验教学实验室中, 在成像设备的性能相对医用设备 [4] 较为有限的条件下 (包括静磁场受环境温度影响大、静磁场均匀度和梯度磁场大小有限等), 通过自旋回波序列对猪肉中的肥肉和瘦肉进行 T_1 加权成像, 从而实现肥肉和瘦肉在成像中的分离. 本实验的成像结果说明在实验室的有限条件下是能够得到质量较高的成像的, 因此可以

鼓励学生自主设计实验, 对各种样品成像, 提高实验的趣味性, 以使学生理解复杂的 MRI 原理并学以致用.

1 原理

核磁共振是指处于外磁场中的自旋不为零的原子核, 因吸收频率与拉莫尔频率相同的射频场能量而发生能级跃迁的现象 [2, 3, 5, 6]. 在二维傅里叶变换法核磁共振成像 (2D-FFT MRI) 中, 用施加 3 个互相垂直的线性梯度磁场来实现信号的空间定位 [2, 6].

本实验所用的自旋回波序列是医学上常用的成像序列之一, 图 1 (a) [7] 为其示意图, 采集到的回波信号的强度表达式为



(a) 自旋回波序列示意图

(b) 自旋回波序列时序图

(c) 样品

注: RF 是射频脉冲, G_x 、 G_y 和 G_z 分别是用于 MRI 信号空间定位的选层磁场、频率编码磁场和相位编码磁场, T_E 、 T_R 和 $2T_S$ 分别是回波时间、序列重复时间和采样时间. 图 1 (b) 来源于软件界面截图

图 1

收稿日期: 2014-07-03; 修回日期: 2014-11-04

基金项目: 国家基础科学人才培养基金 (J0730310) 资助.

作者简介: 居慧雯 (1992—), 女, 上海市人, 复旦大学物理学系 2010 级本科生.

通讯作者: 俞熹, Email: whyx@fudan.edu.cn

$$S_{SE}(T_E, T_R) \approx AN(H)(1 - e^{-T_R/T_1})e^{-T_E/T_2} \quad (1)$$

其中 T_E 是序列重复时间, T_R 是回波时间, A 为增益, $N(H)$ 是自旋氢核密度, T_1 和 T_2 分别是样品的纵向和横向弛豫时间. 当 $T_E \ll T_2$, 且 T_R 不很短时, 信号强度由 $N(H)$ 和 T_1 决定; 且随 T_R 的缩短, T_1 不同的组织的对比度增大, 这就是 T_1 加权成像^[5, 7]. 由于肥肉的 T_1 比瘦肉的短 (一般含脂肪丰富的组织的 T_1 比含水丰富的长^[5]), 故可用 T_1 加权成像对肥肉和瘦肉的信号进行分离.

衡量成像质量的标准主要有 3 个: 线性度、信噪比和分辨率, 各自与许多参数相关^[7, 8]. 本实验的难点在于参数间关系复杂, 调节时需兼顾 3 个成像的衡量标准.

2 方法

实验中使用上海纽迈科技有限公司 MRIjx 核磁

表 1 自旋回波序列参数

参数意义	参数	参数意义	参数
90°软脉冲幅值	RFamp1/%	采样频率	SW/kHz
180°软脉冲幅值	RFamp2/%	射频信号频率主值	DFW/kHz
90°软脉冲时间宽度	SP1/ μ s	射频信号频率偏移量	SF1/MHz
180°软脉冲时间宽度	SP2/ μ s	增益	O1/kHz
相位编码时间	D1/ μ s	累加次数	NS
相位平衡梯度施加时间	D2/ μ s	相位编码步数	NE1
射频脉冲到开始采样的延迟	D3/ μ s	频率、相位编码和选层梯度磁场	Gx Amp/%
回波时间	D4/ μ s		Gy Amp/%
回波时间	D5/ μ s		Gz Amp/%
序列重复时间	DO/ms	切片位置	SlicePos/mm
采样点数	TD	实际采样倍数	DS

3 结果

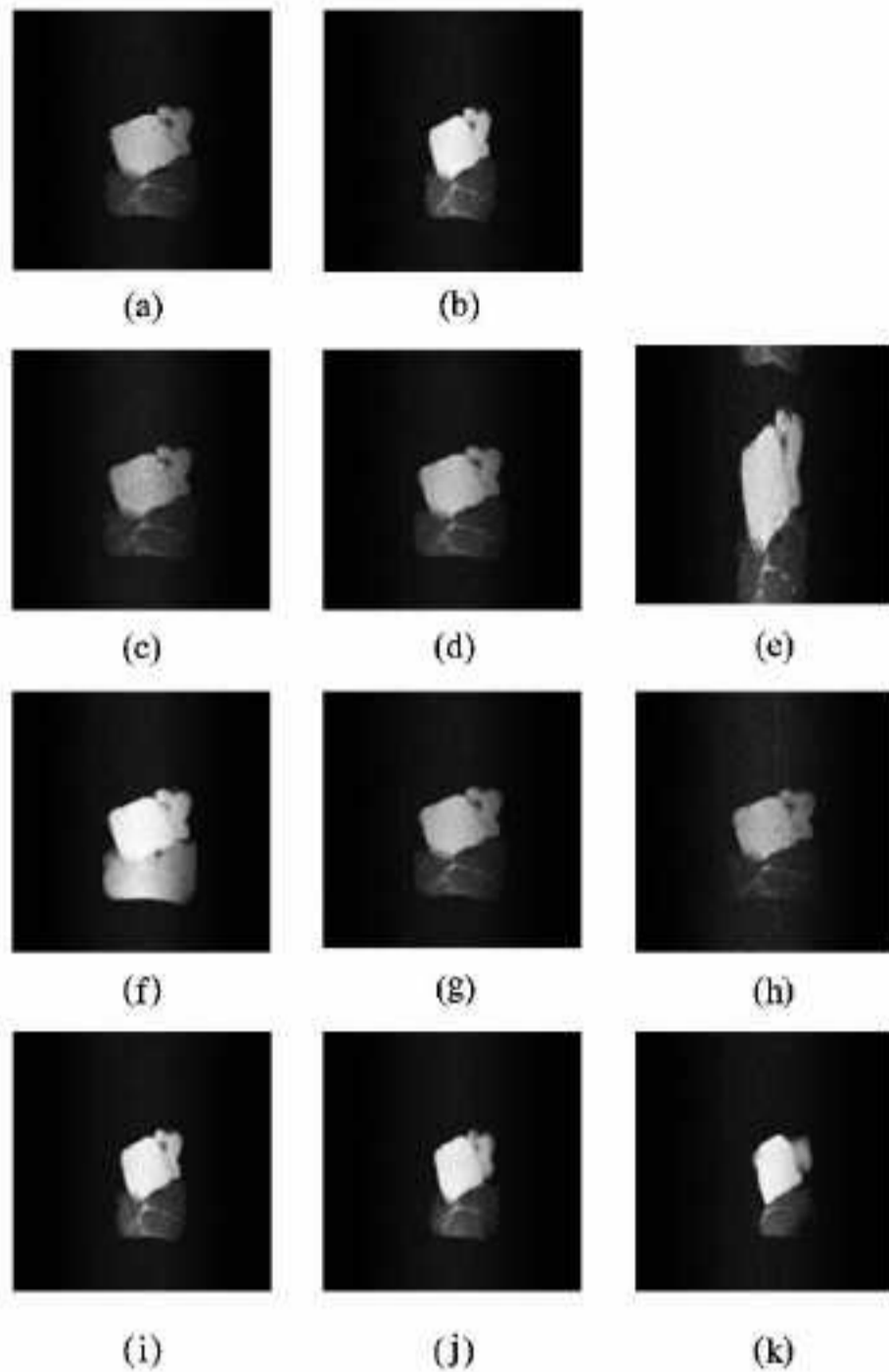
图 2(g) 及 2(i-k) 是在不同切片位置处的纵切面成像图, 为理想成像结果. 由于肥肉组织 T_1 加权信号较瘦肉组织大, 故图像下部分相对较暗的为瘦肉, 较亮的为肥肉, 对比图 1(c) 样品的实物照片可见所成像的线性度好, 不失真, 且信噪比高. 瘦肉和肥肉的信号明显分离, 两者对比度较大, 特别是瘦肉中的细肥肉条的纹理也较清晰, 分辨率好于 0.1 mm.

由调节序列参数的过程可总结出各参数对成像的影响. 选层梯度 $G_s \text{ Amp}(\%)$ 越小 (图 2(a) 和图 2(b)), 信号累加次数 NS 越大 (图 2(c) 和图 2(d)), 信号强度就越大, 信噪比变高, 但 NS 越

大会导致采集信号时间的延长, 故调节 NS 时要兼顾信号强度与成像效率. 序列重复时间 DO 越小, 肥、瘦肉信号强度都减小, 但肥瘦肉信号的对比度增大 (图 2(f-h)), 故调节 DO 时要兼顾信号强度和信号对比度. 另外, 调节参数时还要关注相位编码方向的视野^[5]大小, 当其小于所观察的样品层时, 会造成卷褶伪影, 如图 2(e).

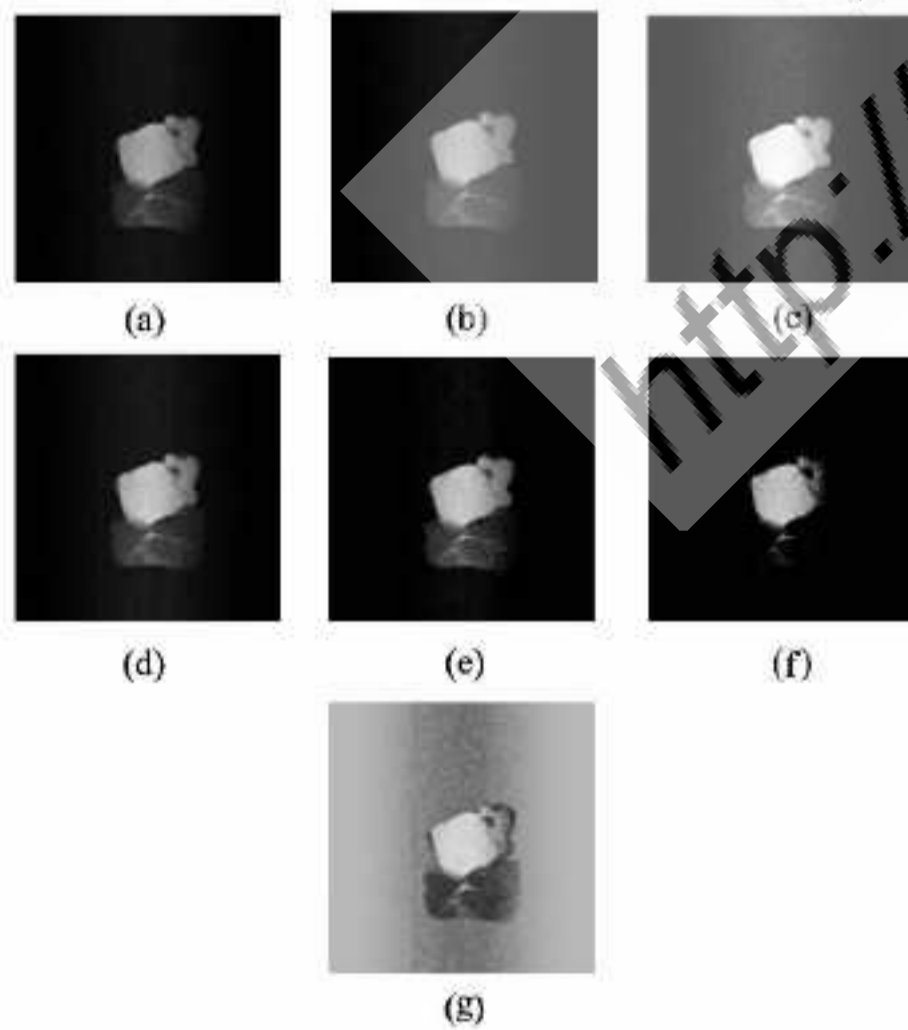
共振成像技术实验仪和新鲜猪肉 (包括肥肉和瘦肉). 首先把新鲜猪肉的瘦肉和肥肉依次装入试管, 勿让样品的长度超过磁极直径, 如图 1(c). 再用硬脉冲 FID 序列确定共振频率, 用软脉冲 FID 序列确定 90°、180°软脉冲幅值. 接着用软脉冲自旋回波序列成像, 其时序图如图 1(b), 可调参数如表 1 所示. 根据之前的实验和设备性能设定 RFamp1、RFamp2、SF1、O1、SP1、SP2、SW、DFW、DS、D3 后, 只进行频率编码而不进行相位编码, 调节 $D2$ 使回波信号达最大以确定 $D2$. 然后, 在保证线性度较好的条件下进行相位编码以成像, 并根据成像结果不断调节参数, 使图像的分辨率和信噪比尽量高. 最后, 调节 DO , 分离出肥肉和瘦肉的信号, 并对图像进行二维处理以便于观察到想观察的信号.

得到理想的成像后, 调节图像亮度 (图 3(a-c)), 设置所要显示信号的阈值以去除部分噪声信号 (图 3(d-f)), 对图像以红绿色进行伪彩化以用色彩区分不同强度的信号 (图 3(g)), 肥肉总体呈黄绿色, 瘦肉呈蓝色, 都能更便于观察信号.



图中参数: (a-b) 选层梯度 $G_x \text{ Amp} (\%) = 80, 60$; (c-d) 累加信号次数 $NS = 4, 8$; (e) 卷褶伪影; (f-h) 序列重复时间 $D_0 = 1000 \text{ ms}, 200 \text{ ms}, 50 \text{ ms}$; (i-k) 切片位置 $\text{SlicePos} = +0.2 \text{ mm}, +2 \text{ mm}, +5 \text{ mm}$.

图2 不同参数对成像的影响



图中(a-c) 亮度调节: (b) 未调节亮度, (a) 亮度变暗8倍, (c) 亮度变亮4倍; (d-f) “窗”调节: 信号阈值从左至右依次增大; (g) 伪彩图.

图3 二维处理效果图

4 讨论

用 T_1 加权成像的方法区分不同组织在生物、医疗、食品等许多领域都有广泛的应用前景。在实验室中用 T_1 加权成像区分信号的难点主要有以下几点。第一, 成像序列中的可调参数共 23 个之多, 实验前需弄清每个参数的意义, 不仅要弄清哪些参数是已经确定了的, 而且对于需要调节的参数也要了解大致调节的范围, 避免随意设置参数。第二, 线性度、分辨率和信噪比各自与许多参数相关, 当调节一个参数时, 其他的参数也要相应做调整; 不少参数向一个方向调节时, 会对两个不同的成像质量衡量标准产生相反的影响, 故调节时需要注意兼顾。第三, 为了提高实验效率并且让学生的耐心不被耗尽, 调节参数的顺序应是先用较短的时间 (如用较小的采样点数 T_D 、累加次数 NS) 把图像成出来, 再考虑线性度, 最后再努力提高分辨率、信噪比。

5 结论

本文介绍了在实验室的小型设备上用自旋回波序列对猪肉做二维核磁共振成像, 并通过 T_1 加权在图像上分离肥肉和瘦肉信号的过程, 探讨了不同参数对图像的影响, 指出了在实验室中用 T_1 加权成像区分信号的难点, 并提出了对策。

致谢: 感谢上海纽迈科技有限公司售后服务人员的热情帮助。

参考文献:

- [1] P. 曼斯菲尔德, P. G. 莫里斯. 生物医学中的核磁共振成像 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987: 3.
- [2] 烱栋林. 核磁共振成像学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [3] 王光昶. 医学物理学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [4] 张林医. 关于磁共振设备性能的若干参数 [J]. 医疗装备, 2004, 16(12): 16-17.
- [5] 廖孟杨. 核磁共振成像技术 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1994: 1-18.
- [6] 曾详阶, 燕树林, 李志安, 等. 医学影像技术丛书: MR 成像分册 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.
- [7] 汪红志, 张学龙, 武杰. 核磁共振成像技术实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] 冯庆宇. 核磁共振成像装置 (MRI) 质量控制与实施保证 [J]. 中国医疗设备, 2011, 26(1): 151-155.

Distinguish fat and lean pork by MRI

JU Hui-wen, YAO Hong-ying, YU Xi

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Nuclear Magnetic Resonance Imaging (MRI) has a wide range of applications in the biomedical field. Doing the MRI experiment in the course of modern physics experiment helps students understand the complicated principle of MRI. This paper introduces the process of imaging pork by weighted imaging through spin echo sequence in the lab.

Key words: NMR; 2D MRI; spin echo sequence; weighted imaging

(上接 56 页)

区掺杂浓度增加), 在半导体是非简并半导体的条件下, P 区耗尽层宽度的变化可以直接由公式得出, 即 P 区耗尽层宽度随 N 区掺杂浓度的增大而增大, 但是 N 区和总的耗尽层宽度变化无法由公式直接分析出, 从绘制出的图像可知, N 区耗尽层宽度随着 N 区掺杂浓度的增大而减小, 总的耗尽层宽度随着 N 区的掺杂浓度的增大先减小后增大; 但是当 P 区掺杂浓度超过某一值时, 由于本文只讨论非简并半导体的情况, 总的耗尽层宽度只会随着 N 区的掺杂浓度的增大而减小。对于 PN 结中掺杂浓度的变化对耗尽层中各处内建电场和内建电势的影响, 当 N 区的掺杂浓度升高, P 区的场强将增大, N 区靠近 $x=0$ 处的场强将增大, 但是曲线斜率比之前大了, 故当 x 大于某个值时场强会小于浓度变化之前该处的场强; 当 N 区的掺杂浓度升高后, PN 结中的内建电势比之前会处处升高。

本文的分析方法和分析结果用于半导体物理的

教学, 能够增强学生的探索精神和帮助初学者更直观全面地理解 PN 结中掺杂浓度对其他参量的作用, 同时也为 PN 结的研究提供了一些参考。

参考文献:

- [1] 黄昆, 韩汝琦. 半导体物理基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 110.
- [2] 程德明, 胡建业, 胡文新. 硅功率器件 P 型扩散区耗尽层及耐压研究 [J]. 硅谷, 2012, 17: 85.
- [3] Donald A. Neamen. Semiconductor Physics and Devices [M]. Fourth Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [4] S. M. Sze, Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices [M]. 3th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [5] S. O. Kasap. Principles of Electronic Materials and Devices [M]. Third Edition. New York: McGraw-Hill, 2006: 386.

The effects of doping concentration of PN junction on the depletion width, built-in electrical field and built-in potential

XIA Peng-kun, CHENG Qi-jia

(Department of Electrical and Electronic Engineering, South University of Science and Technology of China, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract: We start from basic formulas of semiconductors, which are used to calculate the depletion width of P-region and N-region of a PN junction as well as the curve of depletion width versus doping concentration, to get the effects of the variation of doping concentration on the depletion width. The built-in electrical field and built-in voltage are calculated as well as the electric field distributions to analyze the effects of the variation of doping concentration on the built-in electrical field and built-in potential.

Key words: PN junction; doping concentration; depletion width; built-in electrical field; built-in potential