

三沟道体电荷耦合器件在近红外光区光电特性的数值模拟

宋 敏¹ 张 颖² 王玉新² 郑亚茹²

(1 大连民族学院光电子技术研究所, 大连 116600)

(2 辽宁师范大学物理系, 大连 116029)

摘要: 对三沟道 BCCD (bulk charge-coupled device) 在近红外光区的光电特性进行了研究. 结果表明, 锗制的三沟道 BCCD 不能在近红外光区实现多光谱成像. 通过理论分析, 找到了一种能保证 BCCD 在近红外光区工作的衬底材料应满足的吸收曲线. 数值模拟结果表明: 利用这种新材料制成的三沟道 BCCD, 其光敏特性曲线可以分别在 1.0, 1.1 和 1.26 μm 处出现最大值.

关键词: 体电荷耦合器件; 光敏特性; 多光谱成像

PACC: 0760D; 0765G; 4270G

中图分类号: TN386.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)05-1015-05

1 引言

作为新型的光电成像器件, 电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 在可见光范围的应用已涉及到航天、遥感和通信等许多领域. 目前 CCD 应用比较活跃的领域之一是红外成像系统^[1-3]. 由于在近红外探测的许多应用中都涉及到多光谱探测的问题, 因此, 如何低成本、高质量地解决多光谱探测问题已经成为当务之急. 在通常的彩色数码相机中, 彩色的获得主要是通过后期的软件处理^[4], Knipp 等人则利用四通道探测器构成了新型的彩色探测系统^[5], 该系统的多通道探测器是通过在玻璃基底上镀一层透明氧化物, 然后在多室辉光放电沉积系统中沉积出四个微晶针二极管获得的.

多沟道 BCCD (bulk charge-coupled device) 是在单沟道 CCD 基础上发展起来的新概念器件, 其特别之处在于一个 BCCD 芯片可以同时具有多个峰值波长. 这样, 构造以 CCD 为基础的彩色成像系统, 仅需一个三沟道 BCCD 器件. 而目前以 CCD 为光电转换器件的多光谱成像系统大致分成两种类型: (1) 三片单色 CCD 成像系统, 即分色棱镜将入射

光束分解为三基色后分别投射到三片空间上分离的单色 CCD 上, CCD 输出红、绿、蓝三路电信号; (2) 单片 CCD 成像系统, 即通过应用微平板技术, 在每个像素点镀上微滤色片制造出来. 这两种系统或存在彩色重现时颜色不均匀现象, 或存在生产工艺复杂等问题^[6]. 由此可见, 多沟道 BCCD 代表了 CCD 发展的新趋势, 随着其理论的日益完善, 多沟道 BCCD 必将在实际应用中发挥独特作用. Khainovskii 等人^[7] 首先对两沟道 BCCD 进行了理论研究, 并对所构造的实际器件进行了实验研究, 与理论研究结果基本吻合. 其后他们又对硅制三沟道 BCCD 在可见光区的光电特性进行了研究^[8], 结果表明该器件可以在可见光区实现多光谱成像. 本文的目的是在前期工作的基础上将多沟道 BCCD 多光谱成像的思想用于近红外光区^[9,10], 从理论上研究三沟道 BCCD 对近红外辐射的光弛豫过程, 计算各沟道的光敏特性, 为制造能在近红外光区实现多光谱成像的三沟道 BCCD 器件提供理论依据.

2 三沟道 BCCD 的理论模型

线阵三沟道 BCCD 的核心是在掺杂浓度为

宋 敏 女, 1962 年出生, 博士, 教授, 主要研究方向为成像与图像处理技术、光电检测技术. Email: sm1216@163.com

2004-04-30 收到, 2004-12-10 定稿

$N_a^{(1)}$ 的 p 型半导体衬底上,依次沉积一层掺杂浓度为 N_d 的 n 型和掺杂浓度为 $N_a^{(2)}$ 的 p 型导电层,两层厚度分别为 L_1 和 L_2 . 在 p 型导电层之上生长一层厚度为 d 的电介质,按一定次序沉积多个金属电极或多晶硅电极作为控制电极. 在 p 型和 n 型导电层上分别加负电压和正电压,可形成耗尽结构. 这样,沿 z 轴的电势分布在 p 型层中有最小值,而在 n 型层中有最大值. 因此 p 型层中的体沟道传输空穴, n 型层中的体沟道传输电子, p 型层和电介质层之间的表面沟道传输电子,这三个沟道分别简称为体 p 沟、体 n 沟和面 n 沟. 当光辐射均匀照射到其表面时,该 p-n-p 结构将吸收光辐射产生电子-空穴对,因而在 BCCD 各沟道内产生信号电荷.

将三相驱动的时钟脉冲电压分别施加到电极 1,2,3 上,且正电压 $V_1 = V_m = V_h$. 改变电压 V_m 可以改变电极 1,3 下的势阱深度. 这样可以使电极 1 下面 n 沟和体 n 沟内积累的光电子浓度 Q_{ns} 和 Q_n 达到最大值,电极 3 下体 p 沟道内积累的光空穴浓度 Q_p 达到最大值.

在选取 $L_1 = L_2 = L$ 的情况下,电极 3 下体 p 沟中积聚光空穴浓度的变化率由下式表示:

$$\frac{d}{dt} = \frac{1}{3} \exp(-\frac{d}{L_2}) [\exp(-\frac{L_1}{L_2}) + \exp(-\frac{L_1}{L_2}) + \exp(-\frac{L_1}{L_2})] \quad (1)$$

式中 $\tau = t/t_0$, $t_0 = N_d L_2 / g_0 = N_d L_2 hc / P_0$, $\tau = \tau_0$. P_0 表示外部光辐射的入射功率密度, τ_0 为某一固定波长, c 和 h 分别为光速和普朗克常量, α 是 BC-CD 材料对波长为 λ 的光学辐射的吸收系数.

电极 1 下面 n 沟中积聚光电子浓度的变化率由下式表示:

$$\frac{d\mu}{dt} = \left\{ 3 \cdot \exp\left(\frac{1-\tau}{L_2}\right) \left[\exp\left(-\frac{\tau}{L_1}\right) + \exp\left(-\frac{\tau}{L_2}\right) + \exp\left(-\frac{\tau}{L_3}\right) \right] \right\} \quad (2)$$

电极 1 下体 n 沟中积聚的光空穴浓度的变化率由下式表达:

$$\frac{d}{dt} = \left\{ \exp\left(\frac{1-\tau}{L_2}\right) \exp\left[-\frac{\tau}{L_1}\right] + \exp\left[-\frac{\tau}{L_2}\right] + \exp\left[-\frac{\tau}{L_3}\right] - \frac{\exp(-\tau)}{1 + \exp(-\tau)} \right\} \times \left[\exp(-\tau) + \exp(-\tau) + \exp(-\tau) \right] \quad (3)$$

此处 $L_n = L_n$, L_n 表示电子在 p 型衬底内的扩散长

度.

为简化计算,(1),(2),(3)式中各个物理量均采用无量纲形式: $\bar{t} = t/t_0$, $\bar{d} = d/L_2$, $\bar{L}_1 = L_1/L_2$, $\bar{V} = V/2 q N_d L_2^2$, $\bar{V}_{1,2} = V_{1,2}/2 q N_d L_2^2$, $\bar{\mu} = Q_{ns}/N_d L_2$, $\bar{Q}_n = Q_n/N_d L_2$, $\bar{Q}_p = Q_p/N_d L_2$, $\bar{N}_a^{(1)} = N_a^{(1)}/N_d$, $\bar{N}_a^{(2)} = N_a^{(2)}/N_d$,

其中 \bar{E} 是电场在 p 型衬底中的贯穿深度,可以通过解一维泊松方程得到,在此采用非量纲形式表示为:

$$\bar{E}(\bar{V}, \bar{\mu}) = \left[\left(1 + \bar{d} \cdot \bar{E} \right)^2 + \frac{1}{\bar{V} + \bar{V}_1 - \bar{V}_2 + A} \right]^{1/2} - \left(1 + \bar{d} \cdot \bar{E} \right) \quad (4)$$

其中

$$A = \bar{E}^2 - (\bar{V} + 2\bar{d}) - 2\bar{d}\bar{\mu} + 2(1 + \bar{d})(\bar{V} + \bar{V}_1) + 2/(\bar{V} - \bar{V}_1/2) + (\bar{V} - 2)$$

这样,方程(1),(2),(3)组成了一个非线性微分方程耦合系统,它描述了三沟道 BCCD 各沟道中流动光电荷的积聚过程. 通过解此微分方程,可得到三条沟道信号电荷浓度的变化情况: $\mu = \mu(\bar{t})$, $\bar{Q}_n = \bar{Q}_n(\bar{t})$, $\bar{Q}_p = \bar{Q}_p(\bar{t})$, 求解所用的始末条件为:

当 $\bar{t} = 0$ 时, $\bar{\mu} = \bar{Q}_n = \bar{Q}_p = 0$ (5)

当 $\bar{t} = \bar{t}_a$ 时, $\bar{\mu} = \bar{Q}_n = \bar{Q}_p$ (6)

式中 $\bar{L}_1, \bar{L}_2, \bar{L}_3$ 为三个沟道的贯穿深度; \bar{t}_a 为此器件的光弛豫时间. (6) 式中的等号表示在 \bar{t}_a 时间内,各沟道势阱内空穴或电子填充均已完成. \bar{t}_a 取决于该 p-n-p 结构所用的半导体材料对光辐射的吸收系数及外部辐射源的光谱特性. 本文考虑的是具有均匀光谱强度的近红外辐射 (0.78μm ~ 1.5μm) 照射 BCCD. 为便于研究引入三沟道 BCCD 各沟道光敏特性(channel photosensitivity)的定义式:

$$F_1 = B \frac{d\mu}{dt}, \quad F_2 = B \frac{dQ_n}{dt}, \quad F_3 = B \frac{dQ_p}{dt} \quad (7)$$

其中 $B = g_0/hc$.

3 数值计算结果及讨论

3.1 锗制 BCCD 对近红外辐射响应的光弛豫过程模拟

本文选用如下设计参量: $L_1 = L_2 = 4\mu m$, $d_0 =$

0.15 μm , $L_n = 10\mu\text{m}$, $\alpha = 16$, $d = 4$, $\beta = 0.1$, $\gamma = 1.5$, $N_d = 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, $V_1 = 2\text{V}$, $V_m = 10\text{V}$, $V_h = 22\text{V}$, $T = 300\text{K}$, $\phi_0 = 0.4\mu\text{m}$, 并采用文献[11]所提供的锗对近红外辐射的吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 进行数值计算, 得到 η , μ 和 β 曲线, 它们均表现出线性关系, 图 1 给出其中的 η 曲线. 利用(7)式可确定各沟道光敏特性和辐射波长之间的关系, 如图 2 所示(此处选取 $P = 100\mu\text{W}/\text{cm}^2$). 由图 2 可以看出, 在 0.78 ~ 1.5 μm 范围内的辐射响应较好, 但是三条沟道的峰值未分开.

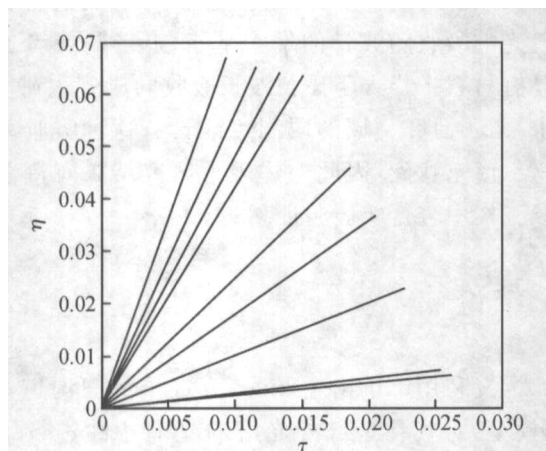


图 1 锗制 BCCD 体 n 沟内积聚光电子浓度 η 与积聚时间 τ 的对应关系. 从左至右的波长依次为 1.5, 1.4, 1.3, 1.2, 1.1, 1.0, 0.9, 0.8, 0.78 μm .

Fig. 1 Dependence of the bulk concentration on the time of accumulation. From left to right, the values of wavelength are 1.5, 1.4, 1.3, 1.2, 1.1, 1.0, 0.9, 0.8, 0.78 μm .

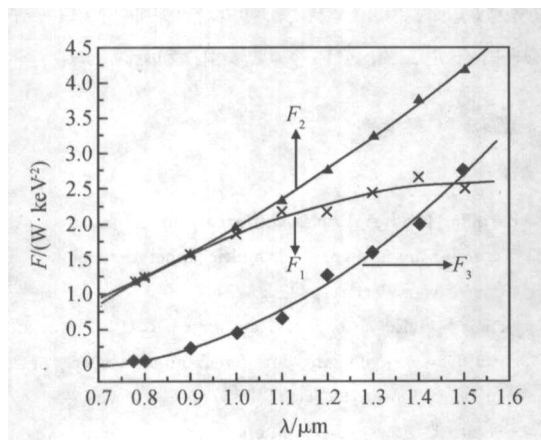


图 2 锗制 BCCD 在近红外光区的光敏特性曲线

Fig. 2 Spectral dependence of channel photosensitivity of Germanium three-channel BCCD

由于适当调整设计参量可改变峰值位置, 我们分别改变了 n 型层的厚度 L_1 及施主的掺杂浓度 N_d , p 型层的厚度 L_2 及受主掺杂浓度 $N_a^{(2)}$ 和 p 型层衬底的受主掺杂浓度 $N_a^{(1)}$, 但均未达到将三条沟道分开的目的. 由此可以推断, 选用锗材料制成的三沟道 BCCD 器件无法在近红外区实现多光谱成像.

3.2 适于近红外辐射多光谱成像的三沟道 BCCD 材料的探寻

我们在设计参量不变的前提下, 进行了一系列测试以期获得适于近红外辐射多光谱成像的三沟道 BCCD 材料应具有的吸收光谱特性. 首先以吸收系数 $\alpha = 100, 10, 1, 0.1, 0.001, 0.0001\mu\text{m}^{-1}$ 分别代入(1) ~ (3)式计算, 对计算结果分析后发现材料吸收系数的上限只能为 10^0 数量级, 材料吸收系数的下限只能为 10^{-3} 数量级. 与可见光情况类似, 体 n 沟光敏特性的峰值波长需为长波. 因此先假定一个体 n 沟峰值波长, 并依据其他近红外辐射波长对应的体 n 沟光敏特性 F_3 均小于它, 确定一组吸收系数 $\alpha(\lambda)$, 再由体 p 沟、面 n 沟光敏特性最大值是否出现在中波长及短波长评定这组吸收系数. 从入射波长 1.5 μm 开始测试, 其对应的 α 为 10^{-3} 数量级, 再逐渐减小波长, 相应地增大 α (增大到 10^0 数量级时截止), 逐一测试得到一系列结果. 再从 1.4 μm 开始, 重复上述过程. 经反复测试后得到比较满意的一组吸收系数为: (1.5 μm) = $0.006\mu\text{m}^{-1}$, (1.4 μm) = $0.05\mu\text{m}^{-1}$, (1.3 μm) = $0.068\mu\text{m}^{-1}$, (1.2 μm) = $0.3\mu\text{m}^{-1}$, (1.1 μm) = $0.45\mu\text{m}^{-1}$, (1.0 μm) = $0.064\mu\text{m}^{-1}$, (0.9 μm) = $0.86\mu\text{m}^{-1}$, (0.78 μm) = $1\mu\text{m}^{-1}$ 将它们代入方程(1), (2), (3)计算, 解得 η , μ , β 曲线, 也表现为线性. 图 3 给出了 η 关系曲线, 图 4 为材料的吸收系数曲线.

利用(7)式提供的沟道光敏特性的定义式, 得到沟道光敏特性与波长的对应关系, 如图 5 所示. 面 n 沟在 1.0 μm 处出现峰值响应; 体 p 沟在 1.1 μm 处出现峰值响应; 体 n 沟在 1.26 μm 处出现峰值响应. 可见, 由具有上述吸收系数的材料制成的三沟道 BCCD 器件可在 0.78 ~ 1.5 μm 范围内实现多光谱成像. 为便于对这种材料的深入研究, 将其与锗的吸收系数曲线^[11](如图 6 所示)进行比较. 从图 4 和图 6 可以看出: 两种材料的吸收系数曲线均表现为随波长的增加而衰减, 只是未知材料的衰减速度是锗的两倍. 这说明可用于制作在近红外区工作的 BC-

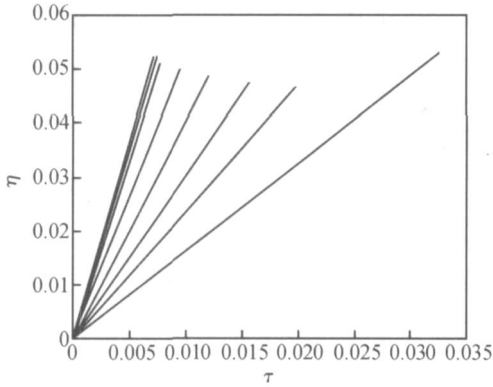


图 3 未知材料所制 BCCD 体 n 沟积聚光电子浓度 与积聚时间的对应关系 由左至右波长为 1.3,1.4,1.2,1.1,1.0,0.9,0.78,1.5 μm .

Fig.3 Dependence of the bulk concentration on the time of accumulation From left to right, the wavelengths are 1.3,1.4,1.2,1.1,1.0,0.9,0.78,1.5 μm .

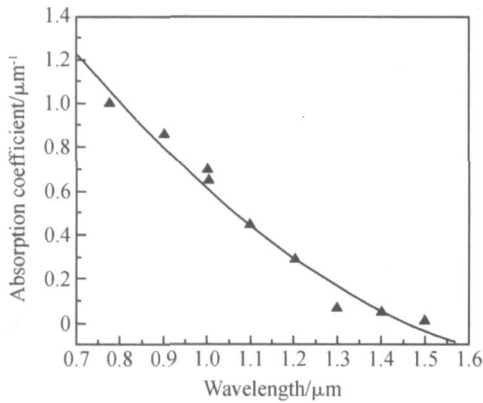


图 4 未知材料的吸收谱

Fig.4 Absorption spectrum of the unknown material

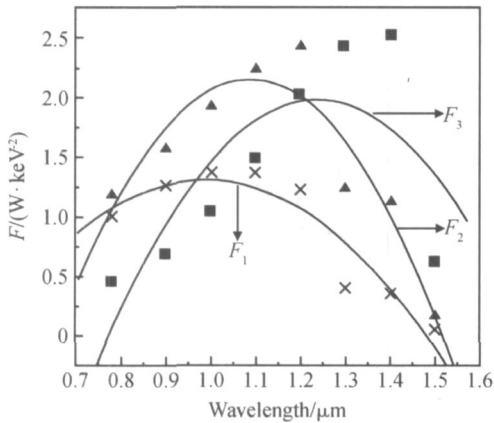


图 5 未知材料所制 BCCD 在近红外光区的光敏特性曲线

Fig.5 Spectra dependence of channel photosensitivity of three-channel BCCD made by the unknown material

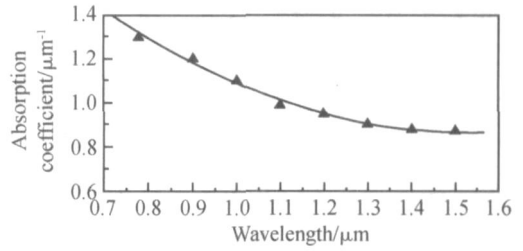


图 6 锗的吸收谱

Fig.6 Absorption spectrum of germanium

CD 器件的材料中含有阻碍长波长光线吸收的成分. 因此在选择该类材料时应考虑: 或者待选材料本身对光的吸收随波长的增大呈指数衰减; 或者通过在已有材料中掺入阻碍长波长吸收的成分达到上述要求. 由于研究领域的限制目前具有这种吸收系数的材料尚未找到, 因此上述理论研究结果有待于在后续工作中进行实验验证.

4 结论

本文利用 Khainovskii 等人提出的三沟道 BC-CD 模型, 对其在近红外光区的光电特性进行了数值模拟, 得到如下结论:

(1) 锗制三沟道 BCCD 不能用于多光谱成像, 其原因不在于外部设计参量 ($L_1, L_2, N_a^{(1)}, N_d, N_a^{(2)}$) 的选择, 而在于锗对该部分辐射的吸收系数不能满足随波长快速衰减的要求.

(2) 经过多次调试, 得到一种未知材料的吸收系数 () 曲线 (0.78 μm 1.5 μm), 利用该材料的吸收系数进行模拟, 发现用此材料制成的三沟道 BCCD 可在近红外光区实现多光谱成像.

参考文献

[1] Barbillat J, Silver E. Near infrared Raman spectroscopy with dispersive instrument and multichannel detection. Spectrochimica Acta, Part A, 1997, 53:2411

[2] Demos S G, Edwards R G, Ramsamoj R, et al. Near-infrared autofluorescence imaging for detection of cancer. Journal of Biomedical Optics, 2004, 9(3) :587

[3] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, et al. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. Remote Sensing of Environment, 2001, 77:22

[4] Dean C, Warner T A, McGraw J B. Suitability of the DCS460c color digital camera for quantitative remote sensing analysis of vegetation. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote

- Sensing ,2000 ,55 :105
- [5] Knipp D ,Herzog P G ,Stiebig H ,et al. Multi-channel sensors with reduced metameric errors. *Journal of Non-Crystalline Solids* ,2000 ,266 ~ 269 :1158
- [6] Yu Daoyin ,Chen Dongqing ,Zhang Hanqi. Color imaging system of medical endoscopes. *Progress in Laser & Optoelectronics* ,1999 (suppl) :207 (in Chinese) [郁道银 ,陈冬青 ,张汉奇. 医用电子内窥镜彩色成像系统. *激光与光电子学进展* ,1999 (增刊) :207]
- [7] Khainovskii V I ,Uzdovskii V V. Theoretical and experimental study of photoelectric characteristics of the two-channel bulk charge-coupled device. *Opt Eng* ,1994 ,33 (7) :2352
- [8] Khainovskii V I ,Uzdovskii V V. Numerical simulation of photoelectrical characteristics of the spectrozonal three-channel bulk charge-coupled device. *Opt Eng* ,1997 ,36 (6) :1678
- [9] Wang Yuxin ,Song Min. The numerical simulation of photoelectrical characteristic of three-channel bulk charge-coupled device in the region of X-ray. *Journal of Optoelectronics · Laser* ,2001 ,12 (4) :378 (in Chinese) [王玉新 ,宋敏. 三沟道 BCCD 在 X 光区光电特性的数值模拟. *光电子 · 激光* ,2001 ,12 (4) :378]
- [10] Song Min ,Zhang Ying ,Kuai Xinkai ,et al. The influence of carrier diffusion on the modulation transfer function of charge coupled devices. *Chinese Journal of Semiconductors* ,2004 ,25 (3) :307 (in Chinese) [宋敏 ,张颖 ,郅新凯 ,等. 载流子扩散对电荷耦合器件调制传递函数的影响. *半导体学报* ,2004 ,25 (3) :307]
- [11] Dash W C ,Newman R. Intrinsic optical absorption in single-crystal germanium and silicon at 77 K and 300 K. *Phys Rev* 1955 ,99 :1151

Numerical Simulation of Photoelectric Characteristics of Three-Channel Bulk Charge-Coupled Device in Region of Near-IR

Song Min¹ , Zhang Ying² , Wang Yuxin² , and Zheng Yaru²

(1 *Institute of Optoelectronic Technology , Dalian Nationalities University , Dalian 116600 , China*)

(2 *Department of Physics , Liaoning Normal University , Dalian 116029 , China*)

Abstract : The photoelectric characteristics of three-channel bulk charge-coupled device (BCCD) are simulated in the region of near-IR. The results show that the germanium three-channel BCCD can not realize multispectral imaging in the region of near-IR. Basing on the result of theoretical research ,the absorption coefficient curve of a new substrate material is found ,which can realize multispectral imaging in the region of near-IR. The simulating results show that the spectral photosensitivity of three-channel BCCD made by the new material has three maximal positions at 1. 0 ,1. 1 and 1. 26 μ m ,respectively.

Key words : bulk charge-coupled devices ; photosensitivity ; multispectral imaging

PACC : 0760D ; 0765 G ; 4270 G

Article ID : 0253-4177 (2005) 05-1015-05

Song Min female ,was born in 1962 ,PhD ,professor. Her research interest includes image forming and image processing ,optoelectric detecting.

Received 30 April 2004 ,revised manuscript received 10 December 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics