

硅基 CoZrO 铁氧体磁膜结构 RF 集成微电感^{*}

杨 晨¹ 刘 锋² 任天令¹ 刘理天¹ 冯海刚³ 王自惠³ 龙海波⁴ 于 军²

(1 清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

(2 华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430000)

(3 伊利诺理工学院电气与计算机工程系, 芝加哥 IL 60616, 美国)

(4 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 制作了一种新型磁膜结构射频集成微电感. 该电感使用溶胶-凝胶法制备的 CoZrO 铁氧体作为磁性薄膜; 采用平面单匝形式的金属线圈, 从而形成“SiO₂ 绝缘层/磁膜层(CoZrO)/SiO₂ 绝缘层/Cu 线圈”的结构, 具有结构简单、制作工艺与常规集成工艺兼容等特点. 同时, 采用相同工艺同批制作了无磁膜微电感作为对比样品, 并取各项结构参数与磁膜电感相一致. 测试结果表明, 2 GHz 处, 磁膜结构微电感的感值(L)为 1.75 nH、品质因数(Q)为 18.5, 与无磁膜微电感相比, L 和 Q 的值分别提高了 25% 和 23%.

关键词: CoZrO 铁氧体; 磁膜结构; 射频集成

EEACC: 3110E; 2140; 2570D

中图分类号: TN409

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)11-2208-05

1 引言

集成微电感是射频集成电路(RF IC)中最常见和最基础的电学元件. 随着无线通信技术的发展和进步, 射频集成电路要求集成微电感向高频化、小型化、高性能化和工艺全兼容化的方向发展. 尽管人们对集成微电感进行了大量的研究, 但从目前的应用现状来看, 具备足够大电感值(L)、足够高品质因数(Q)、足够小面积的集成微电感依然缺乏, 阻碍了 RF 电路的发展和集成片上系统(SOC)的实现. 目前, 集成微电感的发展主要存在两个困难问题. 第一是面积问题: 为了达到数个 nH 或数十 nH 的电感值, 普通空气隙微电感通常需要占据多达数百微米的硅片面积, 影响了 RF 电路的高度集成和低成本化. 第二是性能问题: 在 RF 频段, 硅集成微电感存在很大的衬底损耗和寄生效应, 大大降低了电感的品质因数, 影响了电路整体性能. 为解决第一个问题, 国内外研究者使用叠层电感结构^[1]或利用微电子机械系统(MEMS)的相关技术研制出复杂的三维结构, 以此来提高单位面积上的电感值. 对于第二

个问题, 人们研究了多种方法来减小损耗, 如使用 MEMS 工艺制作悬浮结构; 采用高阻硅衬底, 制作 p-n 隔离结; 引入图形化金属屏蔽; 利用厚隔离层或低介电常数介质作为绝缘层等^[2~8]. 采用这些方法虽然取得了一些实质性的进展, 但难以实现高集成度、高性能和工艺全兼容的统一.

从电感应用的理论基础来分析, 电感是利用电场与磁场间的作用关系实现电能与磁能相互转换的器件, 理想的电感要求磁通回路闭合, 从而实现能量转换效率的最大化. 因此, 设计合理的磁结构, 应用集成工艺将合适的高频磁性材料集成到 RF 微电感中, 可以增大磁通密度, 减小磁通泄漏, 同时提高电感量和品质因数, 进而节省硅片面积. 这是实现高性能、高集成度 RF 微电感的一种很有前景的方法. 以此为目标, 国外研究者已经进行了一些有益的探索^[9~11], 如 Yamaguchi 等人采用两层 CoNdZr 合金膜包夹单层金属线圈(200 μ m \times 400 μ m), 制作了一种具有复杂三明治结构的磁膜电感^[9]. 其中, 合金膜采用溅射工艺制备, 并进行了图形化以减少合金膜引起的较大涡流损耗. 与相同结构参数的无磁膜空

^{*}美国自然科学基金资助项目(批准号:0302449)

杨 晨 男, 1981 年出生, 博士研究生, 现主要从事射频材料、器件和电路的研究.

2005-04-13 收到, 2005-06-06 定稿

气隙微电感相比,该电感在 2 GHz 处的 L 和 Q 分别提高了 19 % 和 23 %.

本文首次采用了溶胶-凝胶法 (Sol-Gel) 来制备磁性薄膜,制作了一种平面单层线圈的新型 CoZrO 铁氧体磁膜结构 RF 集成微电感. 该电感结构简单,制作工艺与常规集成工艺兼容. 同时,采用相同工艺同批制作了无磁膜微电感作为对比样品,并取各项结构参数与磁膜结构电感相一致. 对微电感样品的高频特性进行了测试与比较.

2 磁膜结构集成微电感的设计

磁膜结构 RF 微电感的设计包括磁性材料的选择、磁性薄膜的集成工艺及电感线圈结构尺寸的优化.

2.1 高频磁性材料

本文设计的 RF 微电感主要应用于 GHz 以上频段,因此对磁性材料有两方面基本要求: GHz 频段上适宜的磁导率和较低的损耗. 目前,国际上研究的 RF 应用磁性材料主要包括软磁铁氧体和软磁合金. 在 GHz 频段,铁氧体的相对磁导率通常小于 10,相比于其他的磁性材料,其最大的优点是具有高电阻率(可达 $10^{10} \text{ } \cdot \text{cm}$). 在高频应用时,铁氧体仅产生较小甚至可忽略的涡流损耗,因而是常见的微波磁性材料. 软磁合金的相对磁导率在 GHz 频段可以达到 100 以上,但极低的电阻率($10^{-3} \text{ } \cdot \text{cm}$)使其在高频应用下会产生很大的涡流损耗,很难应用到 RF 器件中去. 针对这种难题,在软磁合金材料的制备过程中,研究人员通过添加微量非金属元素(O, N, B 等)或采用纳米多层膜、纳米颗粒膜结构^[9-12],来提高其电阻率(可达 $10^4 \text{ } \cdot \text{cm}$),从而减少高频能量损耗,提高应用频段,但仍然很难达到与铁氧体同等的水平. 从相关报道可以看出^[10,11],使用软磁合金虽然有效地提升了集成微电感的电感值,但同时又使品质因数大幅下降,从而导致 RF 电路整体性能的下降.

2.2 磁性薄膜的制备及其特性

基于以上讨论,本文采用 CoZrO 铁氧体作为磁性材料,使用 Sol-Gel 法制作了铁氧体薄膜. Sol-Gel 法工艺简单、成本低、易于调整和精确控制材料组分,并与常规集成工艺兼容. 使用快速热处理工艺(RTP)对磁膜进行晶化,晶化温度为 750 . RTP 工艺退火

过程短,可以有效避免持续高温对电路的影响. 所得铁氧体薄膜原子数配比 Co Zr O 为 7 1 9,电阻率约为 $10^4 \text{ } \cdot \text{cm}$,自谐振频率超过 1 GHz,在 1 GHz 处的复相对磁导率为: $\mu = 4, \mu = 0.5$.

可以推出,相对于独立的平面电感 L_0 ,当在电感下方半无限空间内加入均匀磁性衬底时,电感值的提升量为^[13]:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} \tag{1}$$

其中 μ_r 是磁性衬底的磁导率. 由公式(1)可得,对于以半无限空间 CoZrO 铁氧体作为衬底的平面电感,感值的最大提升量为 60 %,而对于有限磁膜厚度的电感而言,这个提升量将进一步减小. 尽管如此,由于磁力线主要集中在磁膜表面以下较小的深度内,因此适当厚度的磁膜可以保证电感量有明显的增加. 考虑到工艺制作的条件要求,本文中 CoZrO 铁氧体磁膜的厚度选为 800nm.

2.3 电感结构尺寸

磁膜结构微电感采用了“SiO₂ 绝缘层/磁膜层/SiO₂ 绝缘层/Cu 线圈”结构形式,如图 1 所示. 无磁膜样品的唯一区别在于没有加入铁氧体磁膜层,其他各项结构参数与磁膜结构电感相一致.

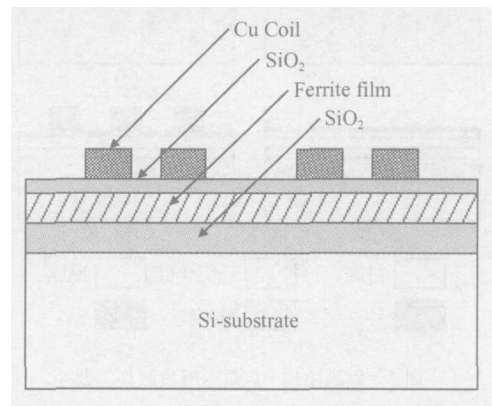


图 1 磁膜结构 RF 微电感结构示意图

Fig. 1 Structure of the RF micro-inductor with magnetic thin film

微电感结构参数主要包括线圈外径 d_{out} 、线圈匝数 n 、线圈宽度 w 、线圈厚度 t 及线圈长度 l 等尺寸,具体参数值见表 1.

表 1 磁膜结构 RF 微电感结构参数

Table 1 Structure parameters of the RF micro-inductor with magnetic thin film

$d_{out} \times d_{out} / \mu\text{m} \times \mu\text{m}$	n	$w / \mu\text{m}$	$t / \mu\text{m}$	$l / \mu\text{m}$
400 × 400	1	20	4	1550

3 磁膜结构集成微电感的制作

磁膜结构微电感采用 n 型(100)高阻硅(电阻率 $900 \sim 1000 \Omega \cdot \text{cm}$)为衬底,其制作工艺流程如图 2 所示.制作过程中,首先(1)在硅衬底上进行热氧化,生长厚度为 500nm 的 SiO_2 绝缘层,如图 2(a)所示;(2)用 Sol-Gel 法在 SiO_2 绝缘层上制备铁氧体磁膜,反复旋涂至 800nm,使用快速热处理工艺对磁膜进行晶化,如图 2(b)所示;(3)在磁膜上磁控溅射一层厚度为 50nm 的 SiO_2 作为绝缘层,如图 2(c)所示;(4)射频溅射 50nm Cu 作为电镀用种子层,如图

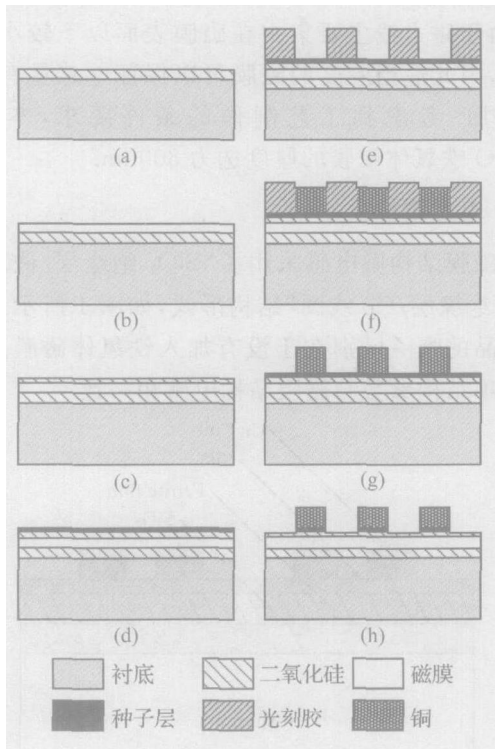


图 2 磁膜结构 RF 微电感的制作工艺

Fig. 2 Fabrication processes of the RF micro-inductor with magnetic thin film

2(d)所示,为了清洗样品表面并增强粘合效果,在溅射 Cu 之前先反溅 8s,功率为 200W;(5)光刻 Cu 线圈电镀窗口,如图 2(e)所示,光刻胶选用正胶 AZ4620,厚度约为 $6\mu\text{m}$;(6)电镀 Cu 线圈,厚度为 $4\mu\text{m}$,如图 2(f)所示;(7)用丙酮去除光刻胶,如图 2(g)所示;(8)利用湿法腐蚀方法去除图形外种子层,清洗后得到磁膜结构微电感,如图 2(h)所示.同时,同批制备了无磁膜微电感作为对比,并取各项结构参数与磁膜微电感相一致.与有磁膜电感相比,仅在

工艺步骤中去掉了上述第 2 步,以此来研究加入磁膜对电感性能的影响.

图 3 为由上述工艺制备的磁膜结构微电感的光学照片.

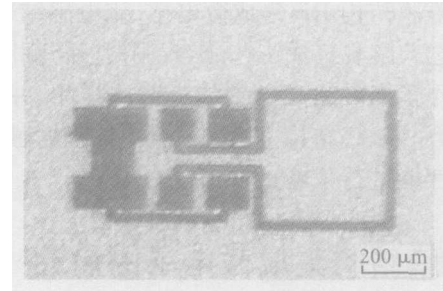


图 3 磁膜结构 RF 微电感光学照片

Fig. 3 SEM photograph of the RF micro-inductor with magnetic thin film

4 测试方法及结果

采用双端口网络模型处理电感的测量数据,测量设备为 Agilent E8358A 型网络分析仪,测量参数为散射(S)参数,测量频率范围为 $50\text{MHz} \sim 9\text{GHz}$.首先对网络分析仪进行开路、短路及负载校准,然后测量样品电感的 S 参数,利用双端口网络模型中 S 参数与导纳(Y)参数的相互转化关系将所测量的 S 参数转化成 Y 参数,最后由 Y 参数计算得出微电感的 Q 值和 L 值,系统特征阻抗 $Z_0 = 50 \Omega$.在双端口网络模型中, S 参数与 Y 参数的相互转化关系为:

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_0} \times \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \quad (2)$$

由 Y 参数分别计算所测微电感 Q 值及 L 值的表达式为:

$$L = \frac{\text{Im}(1/Y_{11})}{2f} \quad (3)$$

$$Q = \frac{\text{Im}(1/Y_{11})}{\text{Re}(1/Y_{11})} \quad (4)$$

通过上述测量及数据处理过程,可得到待测样品微电感的电感量 L 与品质因数 Q 值,如图 4 所示.从图中可以看出,无磁膜结构微电感和有磁膜结构微电感的 L 和 Q 在所测频率范围内变化趋势一致.两样品 L 值在 4GHz 前基本保持不变,无磁膜样品约为 1.4nH 左右,磁膜结构微电感约为 1.7nH , 4GHz 后 L 值随频率的上升呈现缓慢增大的趋势; Q 值先随频率的增加而快速上升,磁膜结构样品 $Q_{\text{max}} = 20$,出现在 1.8GHz 附近,无磁膜样品

$Q_{max} = 15.5$, 出现在 1.5 GHz 附近, 随后, Q 值随频率的升高而逐渐下降, 截止频率均大于 9 GHz. 取频率为 2 GHz 处进行比较, 有磁膜结构微电感 $L = 1.75\text{nH}$, $Q = 18.5$, 与无磁膜微电感 ($L = 1.4\text{nH}$, $Q = 15$) 相比, L , Q 值分别提高了 25% 和 23%. 由此可见, CoZrO 铁氧体磁性薄膜的集成不仅可以增大微电感的 L 值, 也提升了微电感的 Q 值. 测试曲线在 5.5 ~ 8 GHz 频段存在较大波动, 这是由于测试系统在此频段存在较大系统误差引起的, 这个系统误差在图 5, 6 中也可以观察到.

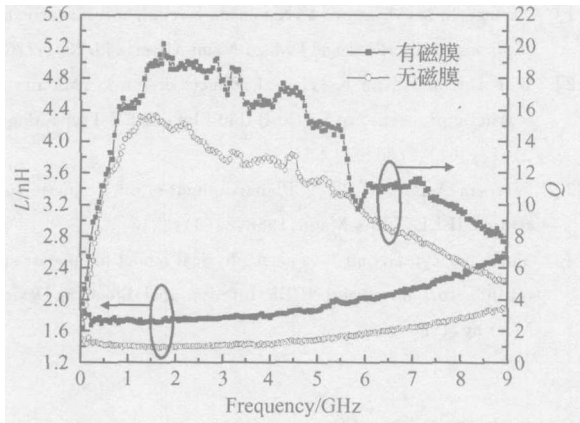


图 4 磁膜结构与无磁膜结构微电感 L 和 Q 随频率的变化关系
Fig. 4 Frequency dependences of the L and Q for inductors with and without magnetic thin film

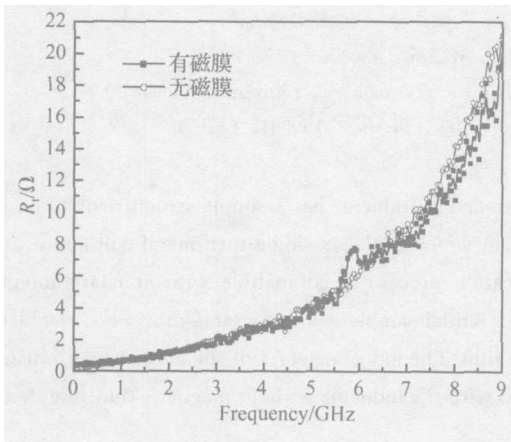


图 5 磁膜结构与无磁膜结构微电感总电阻值 R_t 随频率的变化关系
Fig. 5 Frequency dependence of the total resistance (R_t) for inductors with and without magnetic thin film

图 5 为由 Y 参数换算的样品微电感总电阻值 R_t , 它包含衬底及磁膜涡流损耗的影响. 在 7 GHz 以前, 磁膜结构与无磁膜结构样品 R_t 基本重合, 并随频率的增加而增大. 由此可见, 高电阻率磁性薄膜在

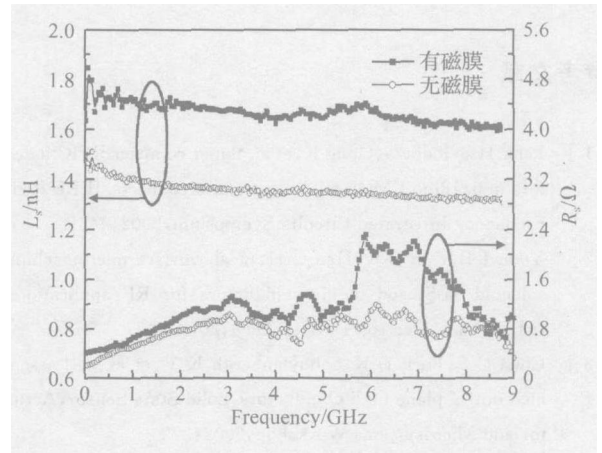


图 6 磁膜结构与无磁膜结构微电感串联电感 L_s 和串联电阻 R_s 值随频率的变化关系
Fig. 6 Frequency dependences of the series inductance (L_s) and resistance (R_s) for inductors with and without magnetic thin film

GHz 以上所引起的涡流损耗与无磁膜结构相比可忽略不计. 7 GHz 以后, 无磁膜结构样品 R_t 升幅比磁膜结构样品快, 主要原因是无磁膜样品的寄生电容大于磁膜结构样品, 从而使无磁膜样品的自谐振频率小于磁膜结构样品.

根据 Yue 等人提出的集总参数等效电路模型^[13], 利用所测参数提取了微电感线圈的串联电感值 L_s 与串联电阻值 R_s , 其与频率变化关系如图 6 所示. 两微电感样品的 L_s 均随频率的上升而缓慢下降, 两者差值幅度与总电感 L 值差值幅度基本一致, 可见磁膜对集成微电感 L 值的贡献与对微电感的 L_s 值的提升是一致的. 两微电感样品的 R_s 在测试频率范围内基本相同.

5 结论

本文首次采用了 Sol-Gel 法来制备磁性薄膜, 制作了一种平面单层线圈的新型 CoZrO 铁氧体磁膜结构 RF 集成微电感, 同批制作了相同结构参数的无磁膜电感作为对比样品. 测试结果为: 2 GHz 处, 磁膜结构微电感 $L = 1.75\text{nH}$, $Q = 18.5$, 而无磁膜结构微电感 $L = 1.4\text{nH}$, $Q = 15$. 两者相比, 磁膜结构微电感 L , Q 值分别提高了 25% 和 23%. 由此可见, 磁性薄膜的集成不仅可增大微电感的 L 值, 也提升了微电感的 Q 值, 是实现高性能 RF 集成微电感的一种很有前景的方法.

参考文献

- [1] Feng H, Jelodin G, Gong K, et al. Super compact RFIC inductors in 0.18 μ m CMOS with copper interconnects. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2002:443
- [2] Yoon J B, Kim B K, Han C H, et al. Surface micromachined solenoid on-Si and on-glass inductors for RF applications. IEEE Trans Electron Devices, 1999, 20(9):487
- [3] Chua C L, Fork D K, Schuylenbergh K V, et al. Self-assembled out-of-plane high Q inductors. Solid State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop, 2002:372
- [4] Ribas R P, Lescot J, Leclercq J L, et al. Micromachined microwave planar spiral inductors and transformers. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2000, 48(8):1326
- [5] Liu Chang, Chen Xueliang, Yan Jinlong. Novel substrate pn junction isolation for RF integrated inductors on silicon. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(12):1486 (in Chinese) [刘畅, 陈学良, 严金龙. 新颖的衬底 pn 结隔离型硅射频集成电感. 半导体学报, 2001, 22(12):1486]
- [6] Yue C P, Wong S S. On-chip spiral inductors with patterned ground shields for Si-based RF IC's. IEEE J Solid-State Circuits, 1998, 33(5):743
- [7] Nam C M, Kwon Y S. High-performance planar inductor on thick oxidized porous silicon (OPS) substrate. IEEE Microw Guided Wave Lett, 1997, 7(8):236
- [8] Huo X, Chen K J, Chan P C. High- Q inductors on standard silicon substrate with low KBCB dielectric layer. IEEE MTT-S Digest, 2002:513
- [9] Yamaguchi M, Baba M, Arai K I. Sandwich-type ferromagnetic RF integrated inductor. IEEE Trans Micro Theory Tech, 2001, 49(12):2331
- [10] Korenivski V. GHz magnetic film inductors. J Magn Magn Mater, 2000, 215/216:800
- [11] Yamaguchi M, Miyazawa Y, Kaminishi K, et al. Soft magnetic applications in the RF range. J Magn Magn Mater, 268, 2004:170
- [12] Kim I, Kim J, Kim K H, et al. Effects of boron contents on magnetic properties of Fe-Co-B thin films. IEEE Trans Magn, 2004, 40(4):2706
- [13] Waseem A R, David E T. Planar inductors on magnetic substrates. IEEE Trans Magn, 1988, 24(6):3213
- [14] Yue C P, Ryu C, Lau J, et al. A physical model for planar spiral inductors on silicon. IEEE International Electron Devices Meeting, 1996:155

A RF Integrated Inductor with CoZrO Ferrite Thin Film *

Yang Chen¹, Liu Feng^{1,2}, Ren Tianling¹, Liu Litian¹, Feng Haigang³,
Wang Zhihui³, Long Haibo⁴, and Yu Jun²

(1 Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China)

(3 Department of Electrical and Computer Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago IL60616, USA)

(4 Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A novel RF integrated inductor with ferrite thin-film is fabricated. The inductor has a simple structure of "SiO₂ insulating layer/magnetic thin-film(CoZrO)/SiO₂ insulating layer/Cu coils", in which a planar single-turn metal coil and a CoZrO ferrite thin-film fabricated by the Sol-Gel method are used. The fabrication process is compatible with standard integrated process. Inductors without the magnetic thin-film are fabricated as the referential sample using the same processes, in which the structure parameters are consistent with the inductor with magnetic thin-film. The inductance (L) of the inductor with magnetic thin-film is 1.75nH and the quality factor (Q) is 18.5 at 2GHz. Compared with the inductor without magnetic thin-film, L and Q are raised by 25% and 23%, respectively.

Key words: CoZrO ferrite; magnetic thin-film; RF integration

EEACC: 3110E; 2140; 2570D

Article ID: 0253-4177(2005)11-2208-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of USA (No. 0302449)

Yang Chen male, was born in 1981, PhD candidate. His research interests include materials, devices and circuits for RF applications.

Received 13 April 2005, revised manuscript received 6 June 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics