

2.5—10Gb/s 光发射机驱动电路 HEMT IC 中 器件模型参数

高建军¹ 高葆新² 吴德馨¹

(1 中国科学院微电子中心, 北京 100029)

(2 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 对高速调制器驱动电路 HEMT IC 中器件参数进行了研究, 着重讨论了 HEMT 器件直流参数、交流参数对外调制驱动电路特性的影响, 给出了满足电路性能要求的器件参数范围; 对 2.5—10Gb/s PHEMT IC 光驱动电路进行了计算机仿真, 眼图模拟结果表明满足 2.5—10Gb/s 高速光纤通信系统需要.

关键词: 高速光集成电路; 光发射机; 驱动电路; HEMT 器件模型参数

EEACC: 2560S; 1290

中图分类号: TN 386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)06-0800-06

1 引言

与传统的 MESFET 相比, 高电子迁移率晶体管(HEMT)具有截止频率高、跨导大、噪声低等特点, 而且与 BJT、HBT 相比, HEMT 的低电压供电工作可以获得低功耗的集成电路, 目前已广泛应用于高速光纤通信系统中的外调制驱动电路中^[1,2].

超高速大容量光纤通信系统速率商用水平已经达到 10Gb/s, 而实验室水平达到了 40Gb/s^[3], GaAs IC 成为扩展通信容量的关键部件之一. 为了避免波长啁啾和严重的光纤色散, 2.5—10Gb/s 以上高速光纤通信系统通常采用外调制驱动电路. 外调制驱动电路必须满足以下两个条件: (1) 高速工作; (2) 提供足够的输出驱动电压以满足电吸收式(EA) 和 Mach-Zehnder 调制器的需要($3V_{pp}$), 保证系统获得足够高的消光比.

本文主要针对 HEMT 调制器驱动电路中器件模型参数开展研究, 研究的主要内容包括: (1) 2.5—10Gb/s 调制器驱动电路对 PHEMT 器件直流参数、电容参数的要求, 计算相应的参数范围; (2) 2.5—10Gb/s 调制器驱动电路设计和计算机眼图模拟分析.

2 器件模型参数最佳设计

图 1 给出了 SPICE 中 GaAs MESFET (HEMT) 的 STATZ 大信号等效电路模型, 由本征部分和源、漏、栅寄生电阻组成.

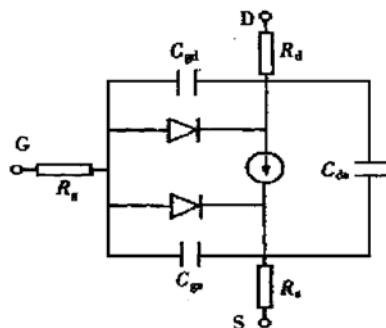


图 1 GaAs MESFET (HEMT) 的 STATZ 大信号等效电路模型

FIG. 1 Large Signal Equivalent Circuit Model of GaAs MESFET (HEMT)

2.1 直流参数

源漏直流电流公式为:

高建军 男, 1968 年出生, 博士, 主要从事微波器件模拟、MMIC CAD 和 OEIC CAD 研究.

2000-06-21 收到, 2000-10-19 定稿

©2001 中国电子学会

$$I_{ds} = \beta(1 + \lambda V_{ds})(V_{gs} - V_{to})^2 \times K_1 / (1 + b(V_{gs} - V_{to})) \quad (1)$$

其中 K_1 为 \tanh 函数的近似表达式.

对于线性区 $0 < V_{ds} < 3/\alpha$, 有

$$K_1 = 1 - (1 - \alpha V_{ds}/3)^3$$

对于饱和区 $V_{ds} \geq 3/\alpha$, 有 $K_1 = 1$.

从公式(1)可以看到直流模型共有五个参数: 阈值电压 V_{to} 、器件跨导参数 β 、电压饱和参数 α 、掺杂拖尾参数 b 、沟道长度调制系数 λ . 下面分别讨论它们在 Gb/s 级光调制电路中的最佳设计范围.

A. 饱和电压参数 α

由公式(1)可以看到饱和电压参数 α 直接决定器件的膝点电压 V_{knee} , 两者成反比关系($V_{knee} \approx 3/\alpha$). 较小的膝点电压 V_{knee} 对驱动电路来说非常重要, 原因有以下两点:

(1) 预驱动级输出逻辑摆幅范围增大

$$\text{由 } V_H \leq - (V_{out} + V_{knee}) + V_{gs_on} \\ V_L \geq V_{ss} + V_{knee}$$

可以得到

$$V_{sw} \leq V_{gs_on} - (V_{out} + V_{ss} + 2V_{knee}) \quad (2)$$

其中 V_H 为预驱动级逻辑摆幅输出高电平; V_L 为预驱动级逻辑摆幅输出低电平; V_{out} 为驱动电路输出电压; V_{ss} 为电源电压; V_{gs_on} 为达到输出驱动电流的栅源电压; V_{sw} 为逻辑输出摆幅. 假设 $V_{gs_on} = 0V$, $V_{out} = 3V$, $V_{ss} = -5.2V$, 图 2 给出了 V_{sw} 随饱和电压参数变化曲线.

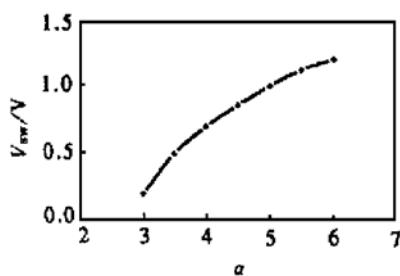


图 2 V_{sw} 随饱和电压参数 α 变化曲线

FIG. 2 Variation of V_{sw} with α

(2) 有利于低功耗电路设计

对于单级差分放大级, 单电源功耗为:

$$P_D = V_{ss} I_s \\ V_{ss} \geq - (V_{out} + 2V_{knee})$$

其中 P_D 为电源功耗; I_s 为电源电流. 假设流过电

源电流 $I_s = 300mA$, 图 3 给出了 P_D 随饱和电压参数 α 变化曲线.

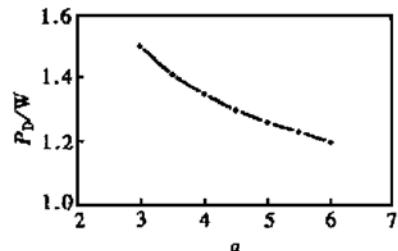


图 3 P_D 随饱和电压参数 α 变化曲线

FIG. 3 Variation of P_D with α

随着 α 的增加, 功耗 P_D 可以下降 0.3W 左右, 有可能使整个驱动电路的功耗降低到 1W 以下.

B. 阈值电压

由于电压输入 V_{IN} 为 ECL 电平(-1.7~-0.9V), 而参考电位 V_{pre} 为-1.3V, 输出电压摆幅要求 3V, 这样电路总的增益为:

$$G = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{IN}} = 12dB$$

可令三级差分放大级(包括缓冲级)增益分别为 2、2 和 8dB, 电压摆幅放大倍数约分别为 1.2、1.2 和 2.0, 则电压输出摆幅依次为 1、1.2 和 3.0V.

单级差分放大级的分析示意图如图 4 所示, 假设器件 Q_1 处于开态, 器件 Q_2 处于关态, 可令:

$$I_{ds-Q_1} - I_{ds-Q_2} \geq V_{out}/R_L \quad (3)$$

$$I_{ds-Q_2} \leq I_{max} \quad (4)$$

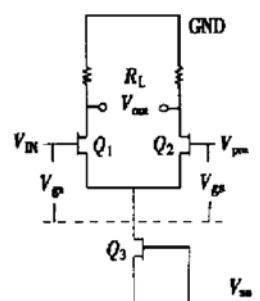


图 4 单级差分放大级的分析示意图

FIG. 4 Circuit Diagram of Differential Amplifier Stage

其中 I_{ds-Q_1} 为器件 Q_1 的源漏电流; I_{ds-Q_2} 为器件 Q_2 的源漏电流, 其表达式为:

$$I_{ds-Q_1} = \frac{\beta W (0 - V_{to})^2}{1 + b(0 - V_{to})} (1 + \lambda V_{ds}) \tanh(\alpha V_{ds}) \quad (5)$$

$$I_{ds,Q_2} = \frac{\beta W (-V_{in} - V_{to})^2}{1 + b(-V_{in} - V_{to})} (1 + \lambda V_{ds}) \tanh(\alpha V_{ds}) \quad (6)$$

其中 V_{out} 为电压逻辑摆幅输出; V_{in} 为电压逻辑摆幅输入; R_L 为负载电阻; I_{max} 为关态时的电流上限。

对于第一级差分放大级, 取器件栅宽 $W = 100\mu\text{m}$, $V_{in} = 0.4\text{V}$, $V_{out} = 1.0\text{V}$, $R_L = 150\Omega$; 对于第二级差分放大级, 取器件栅宽 $W = 200\mu\text{m}$, $V_{in} = 1.0\text{V}$, $V_{out} = 1.2\text{V}$, $R_L = 200\Omega$; 对于第三级差分放大级, 取器件栅宽 $W = 500\mu\text{m}$, $V_{in} = 1.2\text{V}$, $V_{out} = 1.2\text{V}$, $R_L = 50\Omega$. 同时令器件参数 $b = 0$, $\lambda = 0$, $\alpha > \frac{3}{V_{ds}}$, 由公式(1)、(2)可以得到 HEMT 器件阈值电压 V_{to} 随器件跨导参数的变化范围(见表 1)。

表 1 HEMT 器件阈值电压随器件跨导参数的变化范围

Table 1 Variation Range of Threshold Voltage with Transconductance

跨导参数	350mA/(V ² ·mm)	450mA/(V ² ·mm)	550mA/(V ² ·mm)
第一级差分放大级	-0.93--0.45	-0.9--0.4	-0.82--0.33
第二级差分放大级	-1.4--0.57	-1.3--0.55	-1.3--0.54
第三级差分放大级	-1.4--0.58	-1.4--0.5	-1.4--0.47
驱动电路	-0.9--0.58	-0.9--0.55	-0.82--0.54

由表 1 可以看到驱动电路中器件的阈值特性范围一般情况下为:

$$-0.9 \leq V_{to} \leq -0.6$$

该结论和目前发表的文献基本一致^[4, 5].

C. 跨导参数 β

对跨导参数的要求主要为输出驱动级, 需要调制电流为 60mA, 假设器件在饱和区, 则有:

$$\beta = \frac{60}{W(V_{gs_on} - V_{to})^2} \quad (7)$$

其中 W 为器件栅宽, β 随 V_{gs_on} 和阈值电压变化曲线如图 5 所示。

从图中可以看到随着器件阈值电压的下降, 对跨导参数的要求降低了, 而 V_{gs_on} 的增加则会提高对跨导参数的要求。

D. 摊杂拖尾参数 b

摊杂拖尾参数 b 在直流模型的作用主要是调整跨导参数的不均匀性(随着 V_{gs} 的增加器件跨导会降低), 图 6 给出了跨导参数 β 随 b 的变化曲线。

通过上述讨论可以推导出跨导参数 β 的范围为: 350—600mA/(V²·mm), 摊杂拖尾参数 b 的范围为: 0—2 之间。

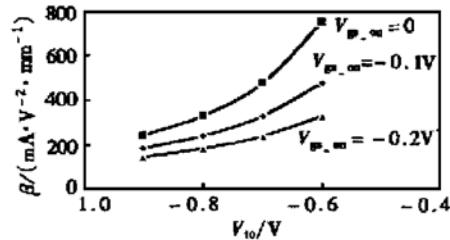


图 5 β 随 V_{gs_on} 和阈值电压变化曲线

FIG. 5 Variation of β with V_{gs_on} and Threshold Voltage

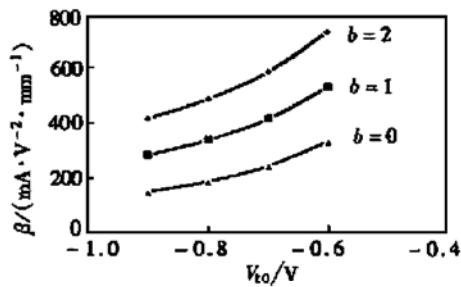


图 6 β 随 b 和阈值电压变化曲线

FIG. 6 Variation of β with b and Threshold Voltage

2.2 电容参数

SPICE 中 GaAs MESFET(HEMT) 的 STATZ 电容模型为:

$$C_{gs} = \frac{C_{gso}}{\sqrt{1 - \frac{V_{new}}{V_{bi}}}} \times \frac{1}{4}(1 + k_1)(1 + k_2) + \frac{1}{2}C_{gd0}(1 - k_2) \quad (8)$$

$$C_{gd} = \frac{C_{gdo}}{\sqrt{1 - \frac{V_{new}}{V_{bi}}}} \times \frac{1}{4}(1 + k_1)(1 - k_2) + \frac{1}{2}C_{gdo}(1 + k_2) \quad (9)$$

这里

$$V_{new} = \frac{1}{2}[V_{eff1} + V_T + \sqrt{(V_{eff1} - V_{TO})^2 + \delta^2}]$$

$$V_{eff1} = \frac{1}{2}[V_{gs} + V_{gd} + \sqrt{(V_{gs} - V_{gd})^2 + \alpha^{-2}}]$$

$$k_1 = \frac{V_{eff1} - V_T}{\sqrt{(V_{eff1} - V_{TO})^2 + \delta^2}}$$

$$k_2 = \frac{V_{gs} - V_{gd}}{\sqrt{(V_{gs} - V_{gd})^2 + \alpha^{-2}}}$$

其中 C_{gs} 和 C_{gd} 为器件栅源和栅漏电容; C_{gso} 和 C_{gdo} 为零偏下器件栅源和栅漏电容。

A. 零偏栅源电容 C_{gso} 和栅漏电容 C_{gdo}

差分放大级可以等效为共源放大器, 其小信号等效电路如图 7 所示。

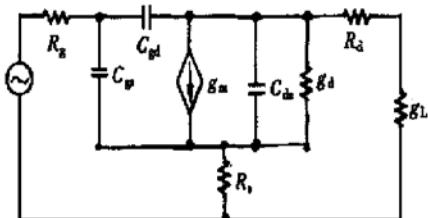


图 7 单级差分放大级小信号等效电路

FIG. 7 Small Signal Equivalent Circuit of Differential Amplifier Stage

图中 C_{gs} 、 C_{gd} 、 C_{ds} 分别为栅源电容、栅漏电容和源漏电容; g_m 为跨导; g_d 为漏极电导; g_L 为负载电导。

电压增益 G 为:

$$G \approx \frac{j\omega C_{gd}W - g_m W}{j\omega(C_{gd}W + C_{ds}) + g_L + g_d W}$$

3dB 带宽为:

$$\omega_{3dB} \approx \frac{\sqrt{2(g_L + g_d W)g_m W}}{\sqrt{[g_m W(C_{gd}W + C_{ds}) - \sqrt{2(g_L + g_d W)C_{gd}W}]}} \\ \times \frac{1}{\sqrt{[g_m W(C_{gd}W + C_{ds}) + \sqrt{2(g_L + g_d W)C_{gd}W}]}}$$

图 8 给出了输出驱动电路随零偏栅源电容 C_{gso} 和栅漏电容 C_{gdo} 变化曲线, 从图中可以看出栅漏电容 C_{gdo} 比栅源电容 C_{gso} 的作用要大, C_{gso} 对 3dB 带宽的影响很小 ($C_{gdo} = 0.2 \text{ pF} \cdot \text{mm}$), 而较小的 C_{gdo} 可以使 3dB 带宽显著增加。欲使输出驱动电路工作在 10Gb/s 的条件为: $C_{gso} \leq 2 \text{ pF} \cdot \text{mm}$, $C_{gdo} \leq 0.4 \text{ pF} \cdot \text{mm}$ 。

图 9 给出了三级差分放大级 3dB 带宽随特征频率 ($f_T = g_m / 2\pi(C_{gs} + C_{gd})$) 和栅宽的变化曲线。从图中可以看到, 随着特征频率的增加 3dB 带宽迅速上升, 而器件栅宽的增加也会导致 3dB 带宽的下降, 因此驱动电路速率水平主要由最后一级差分放大级决定。欲使整个驱动电路的速率水平达到 2.5Gb/s, 器件特征频率需要大于 12GHz, 而欲使整个驱动电路的速率水平达到 10Gb/s, 器件特征频率则需高于 45GHz。当然, 由于在实际电路中会受到更多寄生因素的影响, 需要的特征频率会更高。

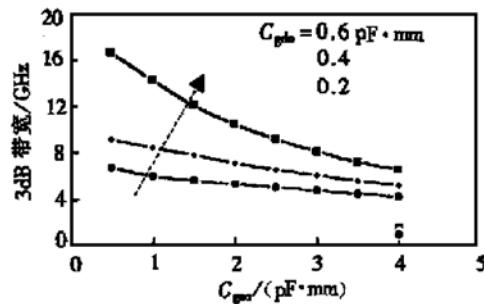


图 8 输出驱动电路随零偏栅源电容和栅漏电容变化曲线

FIG. 8 3dB Bandwidth of Output Drive Circuit Versus C_{gso} and C_{gdo}

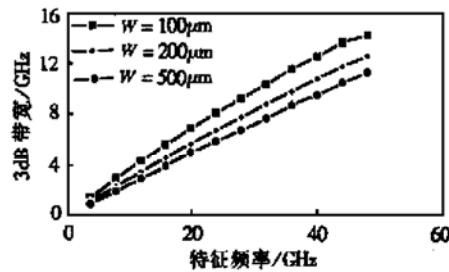


图 9 差分放大级 3dB 带宽随器件特征频率变化曲线

FIG. 9 3dB Bandwidth of Differential Amplifier Stage Versus f_T

3 2.5—10Gb/s 调制器驱动电路设计和仿真

A. 电路拓扑

外调制驱动电路主要由 SCFL(源直接耦合 FET 逻辑)或者 ECL 电路完成。图 10 给出了典型的 2.5—10Gb/s PHEMT IC 调制器驱动电路示意图, 主要由以下几部分构成。

(1) 输入接口电路——由缓冲电路实现。

(2) 予驱动级——由两级差分放大电路组成, 用以获得较高的电压增益和补偿高频特性。

(3) 输出驱动级——用以获得输出匹配和调节输出电压增益。

设计原则如下:

(1) 输入 50Ω 电阻用以电路输入匹配, 消除潜在的不稳定。

(2) 驱动差分放大的负载电阻依次减小, 用以增大电路的驱动能力。

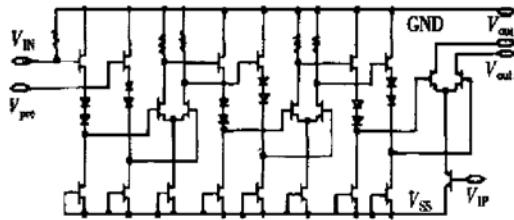


图 10 2.5—10Gb/s PHEMT IC 调制器驱动电路示意图
FIG. 10 Circuit Diagram of 2.5—10Gb/s PHEMT IC Driver

(3) 每一级差分放大电路之间应以缓冲电路隔离, 实现电平移位和直接耦合.

(4) 驱动差分放大级栅宽依次增大, 以提高电路驱动能力和放大能力.

(5) 由于输出差分放大级栅宽很大, 而输出电压正比于输出电容 ($\Delta V_{\text{out}} \propto C_{\text{out}}$), 因此欲提高速率, 需要利用高频补偿电感.

(6) 应增加差分放大级 HEMT 栅漏电压, 以降低电容 C_{dg} .

(7) 差分放大级 PHEMT 器件应工作在最大特征频率 f_T 处.

2.5—10Gb/s 调制器驱动电路中 HEMT 器件虽然工作在开关状态, 但是要求较高的高频特性.

根据上述讨论计算机模拟采用的耗尽型 HEMT 器件模型参数见表 2.

表 2 2.5—10Gb/s 外调制器驱动电路 HEMT 器件参数
Table 2 HEMT Model Parameters of 2.5—10Gb/s Modulator Driver

器件参数	含 义	2.5Gb/s	10Gb/s
α	电压饱和参数	3	3
$\beta / (\text{mA} \cdot \text{V}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1})$	跨导参数	350	350
b	掺杂拖尾参数	1	1
V_{to}	阈值电压	-0.9	-0.9
λ	沟道长度调制系数	0.02	0.02
$R_s / (\Omega \cdot \text{mm})$	源寄生电阻	1	1
$R_d / (\Omega \cdot \text{mm})$	漏寄生电阻	1	1
$C_{gs} / (\text{pF} \cdot \text{mm}^{-1})$	零偏下栅源电容	4	1.0
$C_{gd} / (\text{pF} \cdot \text{mm}^{-1})$	零偏下栅漏电容	1.5	0.3
f_T / GHz	零偏下特征频率	15	54

图 11 和 12 给出了 2.5—10Gb/s 调制器驱动电路计算机眼图仿真结果, 从图中看到利用分析结果可以很容易达到设计指标: 输出幅度 3V_{pp}, 眼图张开很好, 满足系统要求.

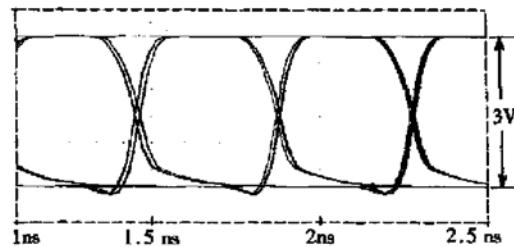


图 11 2.5Gb/s 调制器驱动电路计算机眼图仿真结果
FIG. 11 Simulated Eye Diagram at 2.5Gb/s

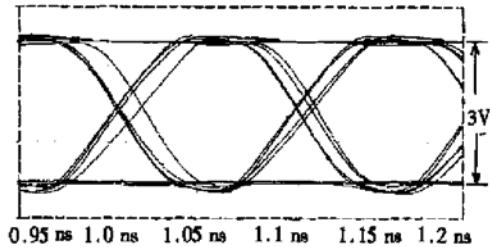


图 12 10Gb/s 调制器驱动电路计算机眼图仿真结果
FIG. 12 Simulated Eye Diagram at 10Gb/s

4 结论

本文对调制器驱动电路 HEMT IC 中器件性能进行了研究, 给出了满足 2.5—10Gb/s 高速调制器驱动电路的 HEMT 器件参数范围. 论文最后对 2.5—10Gb/s 调制器驱动进行了电路设计和眼图模拟分析, 验证了上述器件参数的正确性.

参考文献

- [1] D. Demange, M. Billard, Devaux *et al.*, High-Performance and Low Consumption 10Gb/s GaAs PHEMT Driver for External Modulation Transmitter, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1996, **8**(8): 1029—1031.
- [2] E. Sano, InP HEMT ICs for Lightwave Communication at 40 Gb/s and Beyond, *Compound Semiconductor*, 1999, **5**(8): 30—34.
- [3] Y. Suzuki, T. Suzuki, Y. Ogawa *et al.*, Pseudomopthic 2DEG FET IC's for 10Gb/s Optical Communication System with External Optical Modulation, *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1992, **27**(10): 1342—1347.
- [4] L. Zhihao, V. Hurm, A. Thiede *et al.*, Modulator Driver and Photoreceiver for 20Gb/s Optic-Fiber Links, *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(8): 1491—1495.

- [5] M. Miyashita, N. Yoshita, Y. Kojima *et al.*, An AlGaAs/InGaAs Pseudomorphic HEMT Modulator Driver IC with Low Power Dissipation for 10Gb/s Optical Transmission System, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1997, **45**(7): 1058—1063.

Device Model Parameters for 2.5—10Gb/s HEMT Modulator Driver IC

GAO Jian-jun¹, GAO Bao-xin² and WU De-xin¹

(1 Microelectronic R&D Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

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

Abstract: Device parameters for 2.5—10Gb/s HEMT modulator driver IC have been studied. The effect of DC parameters and capacitance parameters on the driver IC has been discussed. And the ranges of above parameters that meet the requirements of the driver IC are calculated. Eye diagrams simulation is made for 2.5—10Gb/s HEMT modulator driver IC by using PSPICE.

Key words: high-speed optoelectronic integrated circuit; optical transmitters; driver IC; HEMT device model parameters

EEACC: 2560S; 1290

Article ID: 0253-4177(2001)06-0800-06

GAO Jian-jun male, was born in 1968, Ph. D. His work focuses on the microwave device modeling, MMIC CAD and OEIC CAD.

Received 21 June 2000, revised manuscript received 19 October 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics