

数字集成电路参数的测量

[苏] Д. Ю. 埃杜卡斯 等编著

张 伦 译

李 锦 林 校

人 民 邮 电 出 版 社

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
МИКРОСХЕМ

Д. Ю. ЗИДУКАС и др;

М.: Радио и связь

1982

内 容 提 要

本书主要论述数字集成电路参数的测量方法及检测设备,全书共分八章,分别介绍集成电路的静态参数和动态参数及其测量方法、功能检验、静态参数检测设备、动态检测设备、功能检验设备、检验系统的程序保证及检测集成电路的生产体系等。

本书可供从事数字集成电路、计算机研制的工程技术人员和大专院校师生参考。

数字集成电路参数的测量

[苏] Д. Ю. 埃杜卡斯 等编著

张 伦 译

李 锦 林 校

责任编辑:俞天林

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

广 益 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本: 850×1168 1/32 1988年3月 第 一 版

印张: 11 页数: 176 1988年3月北京第1次印刷

字数: 291 千字 印数: 1-3 700 册

ISBN-7115-03469-9/TN

定价: 2.75元

译 者 的 话

数字集成电路参数的测量在大规模（超大规模）集成电路和电子计算机的研制中占据十分重要的地位，也是它们获得迅速发展的先决条件。先进的测试手段对提高产品的质量和可靠性起着重要保证作用。因此国内外对这个技术领域十分重视。

迄今为止，论述数字集成电路参数测量的书籍尚不多见，本书是国外八十年代初出版的这类专著之一。书中详细叙述了有关数字集成电路（各类逻辑电路、存储器、微处理器等）测量的各个方面，包括：静态参数、动态参数、功能参数的测量方法和测试所需的设备，测试的算法生成，测试的程序保证，以及大规模集成电路测试仪的构成和工作特点等。阅读本书，读者将对数字集成电路参数的测量有全面的基本了解。

本书的特点是系统性强、内容完整、叙述条理清晰，同时也富有实践性。书中在叙述每一类专题时，大都附有实例，便于读者深入理解书中所述内容。此外，本书系由苏联国内一些知名学者集体编写，因而大体上反映了苏联在这个领域的发展水平。

应当说明的是，本书所使用的某些术语与国内目前习惯使用的术语有一些差别。为了保留原书的叙述风格，在翻译时未做过多的注释，相信读者在阅读过程中不难理解它们的相应含义。

本书的译文承中国科学院半导体研究所副研究员、测量专家李锦林同志校对，译者谨向他表示最衷心的感谢。

限于水平，译文中不当和错误之处在所难免，诚恳地希望读者批评指正。

译者 1985.7
于北京

目 录

序 言	1
常用符号及对照表	3

第一章 数字集成电路

1.1 数字集成电路的逻辑门	5
1.2 半导体存储器	16
1.3 微处理器电路	29
1.4 矩阵式 LSI	35
小 结	37

第二章 集成电路的静态参数和动态参数及其测量方法

2.1 概 述	39
2.2 集成电路的静态参数	41
2.3 集成电路的动态参数	48
2.4 集成电路功能参数的检验	61
小 结	64

第三章 集成电路的功能检验

3.1 概 述	66
3.2 功能检验的方法	69
3.3 RAM 算法功能测试的构成方法	73
3.4 只读存储器的功能检验特点	95
3.5 构成任意逻辑的数字集成电路的功能测试方法	100
3.6 与代码标准相比较进行 LSI 的功能检验	107

小 结	118
-----------	-----

第四章 数字集成电路静态参数的检测设备

4.1 组成和特性	120
4.2 程控电压源和程控电流源	123
4.3 电压和电流的测量变换器	138
4.4 测量电源——电压和电流变换器	144
4.5 转换器	148
4.6 联结设备	150
4.7 检测设备电磁兼容性的保证	154
4.8 确定技术特性的方法	158
小 结	163

第五章 集成电路动态参数的检测设备

5.1 集成电路测试仪的构成原理	164
5.2 高速集成电路动态测量参数的误差	169
5.3 集成电路测试仪测量传输通道中脉冲信号失真的分析	174
5.4 集成电路输出信号的分析	182
5.5 集成电路输出信号的失真分析	186
5.6 集成电路测试仪的可控信号源	189
5.7 采用取样变换法的集成电路测试仪的构成电路	209
5.8 检验系统	215
小 结	220

第六章 集成电路的功能检验装置

6.1 按与标准相比较的方法构成的功能检验装置	222
6.2 采用信号算法生成的功能检验装置的构成	226
6.3 对 LSI 进行功能检验和参数检验的通用集成电路测试仪	231
6.4 引出线电路单元	242

6.5 研究用的功能检验仪器	256
小 结.....	258

第七章 检验系统的程序保证

7.1 检验系统程序保证的演进	260
7.2 低集成度集成电路的检验装置	262
7.3 多工位集成电路测试仪的程序保证	263
7.4 带有计算机的检验系统的程序保证	268
7.5 由具有磁盘操作系统的计算机控制的复杂检验 系统的程序保证	275
7.6 有两级控制的分布式检验系统	284
7.7 描述检验过程的语言	290
小 结.....	304

第八章 生产中使用的集成电路检测系统

8.1 概 述	306
8.2 生产中使用的多工位集成电路测试仪	308
8.3 计算机在集成电路测试仪中的应用	318
8.4 集成电路测试仪生产率的估算	324
小 结.....	327

结束语.....	329
参考文献.....	336

序 言

对于在功能、电参数和应用范围方面都各不相同的数字集成电路，在其研制和生产中要求提供测量它们的静态参数和动态参数以及进行功能检验的高效率的方法和设备。

随着集成电路（IC）集成度的提高以及大规模集成电路（LSI）和超大规模集成电路（SLSI）的出现，功能检验便成为检验数字大规模集成电路的决定性因素之一。因此，提出了制造能以高精度和高生产率测量电参数和进行功能检验的通用设备的任务。

确保数字集成电路有高质量的一个重要条件，是在生产集成电路及应用它们的各个阶段进行正确的组织，以高效率和高精度检验各项参数。从生产集成电路过渡到大规模集成电路，要求从用最简易的自动装置检验集成电路过渡到采用由计算机控制的或有内置微处理器和微型计算机的信息测量系统进行检验。

国内外已有大量论述设计检验集成电路的方法和设备的文章，但实际上尚无专著问世。编写本书时，作者试图依据亲身的工作经验以及文献资料来对有关检验集成电路的方法和设备的材料进行归纳，并力求对所述内容提供具体的实例。

通过阅读本书，读者可能熟悉各类数字集成电路、参数体系、参数体系的测量和功能检验方法，同时还能熟悉信息测量装置各个部件的构成方法及其工作原理。图 П. 1 中示出生产集成电路时，所用检测方法、类型和检测设备之间的联系。书中对确保检验的验收与操作方式的检测方法和设备（见图 П. 1 中的阴影部分）也进行了讨论。

本书由多位作者集体编写，序言和结束语由 Д. Ю. Зйдукас 与 Б. В. Орлов 撰写，1~3 章由 Б. В. Орлов 撰写，4 章由 О. Н.

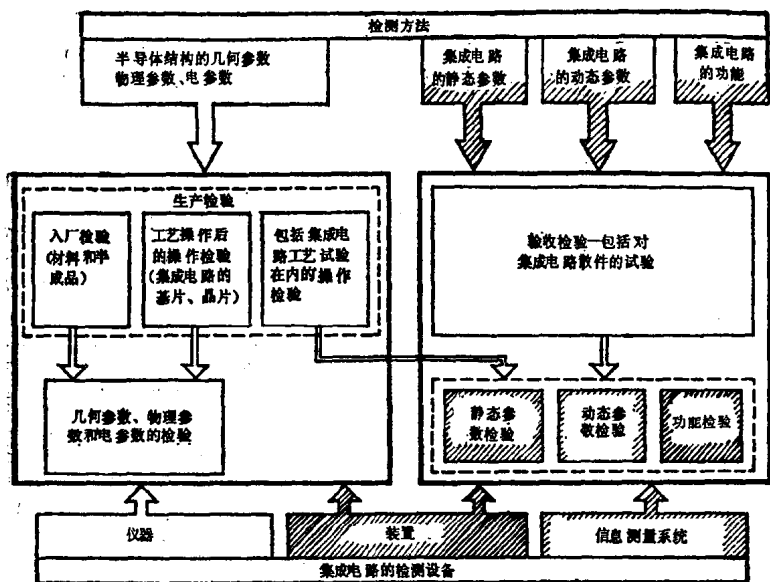


图 П.1 集成电路检验方法和设备的应用范围

Шаромет 撰写, 5 章由 Д. Ю. Зйдукас 撰写, 6 章由 Л. М. Попел, Н. Д. Данилиный, Л. В. Духовский 和 Д. Ю. Зйдукас 撰写, 7 章由 В. И. Лыщенко 撰写, 8 章由 Л. М. Попел 撰写。

作者谨向 Н. В. Георгиев 和 Г. У. Новик 在编写 3.3 节和 3.6 节时给予的帮助表示感谢。

作者对科学技术副博士 М. А. Бедрековский 和 Е. А. Якушенко 提出的宝贵意见和建议表示衷心的感谢, 他们的意见有助于改进全书内容的叙述。作者对所有的批评意见都表示感谢。

作者

常用符号及对照表

俄 文 符 号	国际符号或国标	术 语 或 说 明
A	A	地址信号
BM	CS	芯片选择
BX/ВЫХ	DQ	总线信号
B ⁽¹⁾ _X	I ⁽¹⁾	控制的输入
B ⁽¹⁾ _{ВЫХ}	O ⁽¹⁾	控制的输出
B _{ВЫХ}	Q	输出信号
ЗП	W	写入
И	D	信息信号
I ⁰ _{ВХ}	I _{IL}	逻辑 0 的输入电流
I ¹ _{ВХ}	I _{IH}	逻辑 1 的输入电流
I ⁰ _{ВЫХ}	I _{OL}	逻辑 0 的输出电流
I ¹ _{ВЫХ}	I _{OH}	逻辑 1 的输出电流
I _{ВЫХ ВЫКП}	I _{OZ}	断开状态下的输出电流
I _{КЗ ВЫХ}	I _{OS}	输出接公共端, 输出为 1 时的输出回路电流值
I _{ННЖ}	I _O	I ² L 的注入极电流
I _{ПОТ}	I _{PP} , I _{SS}	消耗电流
I _{ПР}	—	流过集成电路输入二极管的正向电流
I _{УТ ВЫХ}	—	输出端的漏电流
КО	F	操作码
K _{об}	—	输入端的结合(扇入)系数
K _{об ВЫХ}	—	输出端的结合(扇出)系数
K _{раз}	N	输出端的分支系数
P	E	允许
P _{ПОТ}	P _{SS}	功耗
C	CLK	同步
CЧ	R	读出
T _{per}	T _{REF}	刷新周期
T _T	T _{CLK}	时钟的脉冲重复周期
T _ч	t _{CY}	循环时间
t _B	—	选通时间
t _{BA}	t _A	选址时间

续表

俄 文 符 号	国际通用或国标	术 语 或 说 明
$t_{\text{вм}}$	t_{CS}	集成电路选通时间
$t_{\text{вос}}$	t_{REC}	恢复时间
$t_{\text{вр}}$	t_{CE}	允许选通时间
$t_{\text{зд}}$	t_{D}	信号延迟时间
$t_{\text{адр}}$	t_{P}	传输延迟时间
$t_{\text{п}}$	—	信息寻找时间
$t_{\text{с}}$	t_{S}	信号移动时间
$t_{\text{сх}}, t_{\text{у}}$	t_{H}	信号保持时间
$t_{\text{с}}$	F_{CLK}	时钟的脉冲重复频率
$t_{\text{хр}}$	t_{SP}	信息保存时间
$t^{0,1}$	t_{TLH}	逻辑从 0 到 1 的时间
$t^{1,0}$	t_{THL}	逻辑从 1 到 0 的时间
τ	τ	信号持续时间
$U^0_{\text{вх}}$	U_{IO}	逻辑 0 的输入电压
$U^1_{\text{вх}}$	U_{IH}	逻辑 1 的输入电压
$U^0_{\text{вых}}$	U_{OL}	逻辑 0 的输出电压
$U^1_{\text{вых}}$	U_{OH}	逻辑 1 的输出电压
$U_{\text{вп}}$	$U_{\text{SS}}, U_{\text{PP}}$	电源信号
$U_{\text{ниж}}$	U_{G}	I^2L 的固定电流时的注入极电压
$U^0_{\text{пом}}$	M_{L}	输入端为 0 的抗干扰性
$U^1_{\text{пом}}$	M_{H}	输入端为 1 的抗干扰性
$U^0_{\text{пор}}$	U_{TL}	逻辑 0 的阈电压
$U^1_{\text{пор}}$	U_{TH}	逻辑 1 的阈电压
$U_{\text{пр}}$	—	电路输入端的正向压降

第一章

数字集成电路

1.1 数字集成电路的逻辑门

为了构成各式各样的计算机,有不同技术特性和使用特性的数字式自动装置和无线电电子学装置,要求制造不同系列的低集成度、中等集成度和高集成度的数字集成电路^[1]。这些数字集成电路为形成集成电路的基本功能提供了各种不同的电路结构方案和工艺方案。

图 1.1 示出按功能特征对数字集成电路进行的综合分类。

结构上,集成电路具有塑料外壳、金属玻璃外壳、金属陶瓷外壳和陶瓷外壳,引出线的数量从八根到数十根^[3]。下面研究几种最流行的电路结构型式和工艺型式,以及基本逻辑门(“与非”逻辑门、“或非”逻辑门)的典型技术特性。

晶体管—晶体管逻辑(TTL)和肖特基钳位晶体管—晶体管逻辑(TTLS)的集成电路 有若干种系列的 TTL 型和 TTLS 型集成电路,它们之间的差别在于系列的组成、基本单元的作用速度和功耗(表 1.1)。图 1.2 示出按照 p-n 结隔离工艺制造的 K 555 系列 TTLS 型集成电路基本逻辑门的特性曲线。

与非门的静态特性曲线在某种程度上也是任何功能的中、大规模集成电路的特性曲线,因为这些集成电路的输入电路和输出电路相似,或具有与图 1.2, a 所示电路相近的构形。图 1.2, δ 示出小功率逻辑门(TTLS-M)的传输特性曲线,该曲线是信号作用到一

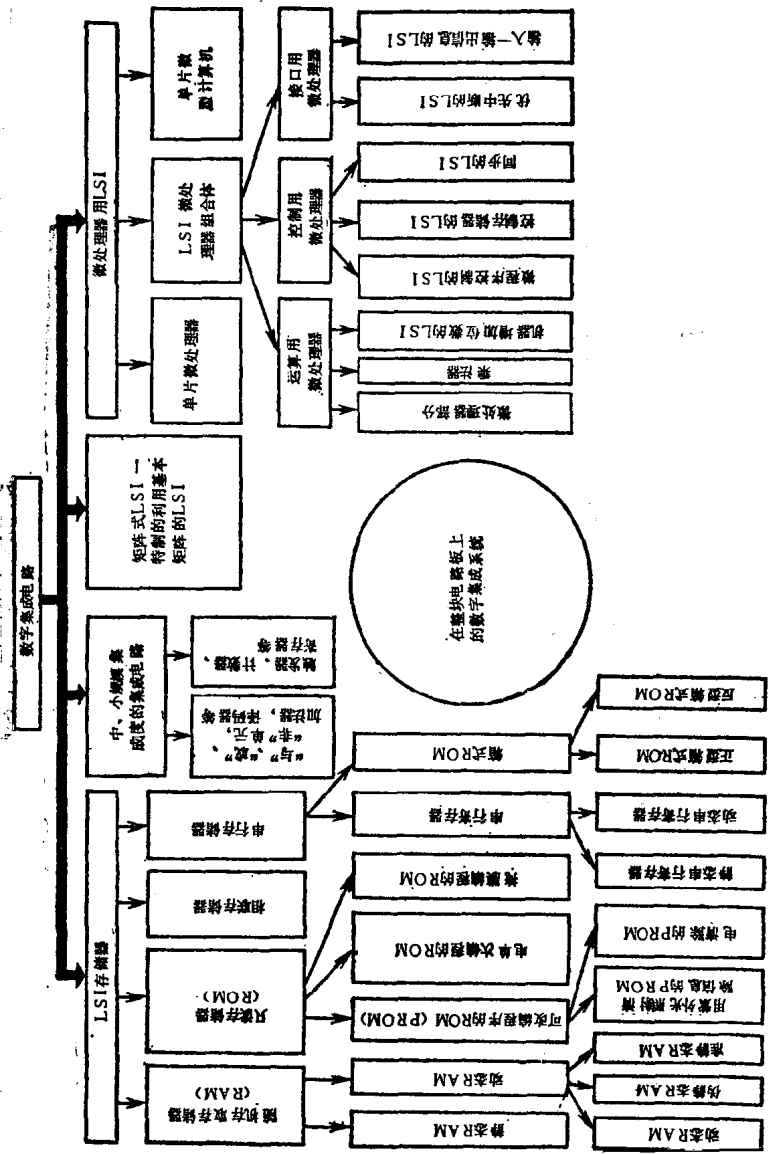


图 1.1 按功能特征和工作原理对数字集成电路进行的分类

表 1.1 不同系列的集成电路的电气特性

系 列	电路结构 (工艺)	被 测 参 数 的 范 围				$U_{\text{нп}}$ (V)	工作温度范围 (°C)
		$T_{\text{HT}} t_{\text{exp}}$ (nS)	U^1_{BMAX} (V)	U^0_{BMAX} (V)	$I_{\text{нот}}$ (mA)		
K 500	ECL	1.5~30	~(0.75~1.05)	~(1.6~1.9)	25~170	-5.2±5%	-10~+70
K 155	TTL	10~60	2.4~3.5	0.2~0.45	3~140	5±5%	-10~+70
K 555	TTLS	10~100	2.4~3.5	0.2~0.5	1~30	5±5%	-10~+70
K 531	TTLS	3~20	2.4~3.5	0.2~0.5	5~140	5±5%	-10~+70
KP 583	I ² L	100~1000	2.4~5	0.01~0.4	30~500	1~1.4 ⁽¹⁾	-10~+70
K 561	CMOS	50~2900	3.6~9.99 ⁽²⁾	0.01~2.9 ⁽²⁾	$3 \times 10^{-4} \sim 0.4^{(3)}$	3~15	-10~+70
KP 580	n-MOS	120~1000	2.4~2.8	0.4~0.55	20~80	5, 12; -5±5%	-10~+70
K 536	p-MOS	300~10000	~11	-2	3	-24; 1.5±5%	-10~+70

(1) 在给定的消耗电流下, 在电源输出端上建立的值,

(2) 电源电压为 5 和 10V,

(3) 在 1 MHz 的频率上, 当 $U_{\text{нп}} = 10 \text{ V}$ 时, 消耗电流增大到 2 mA.

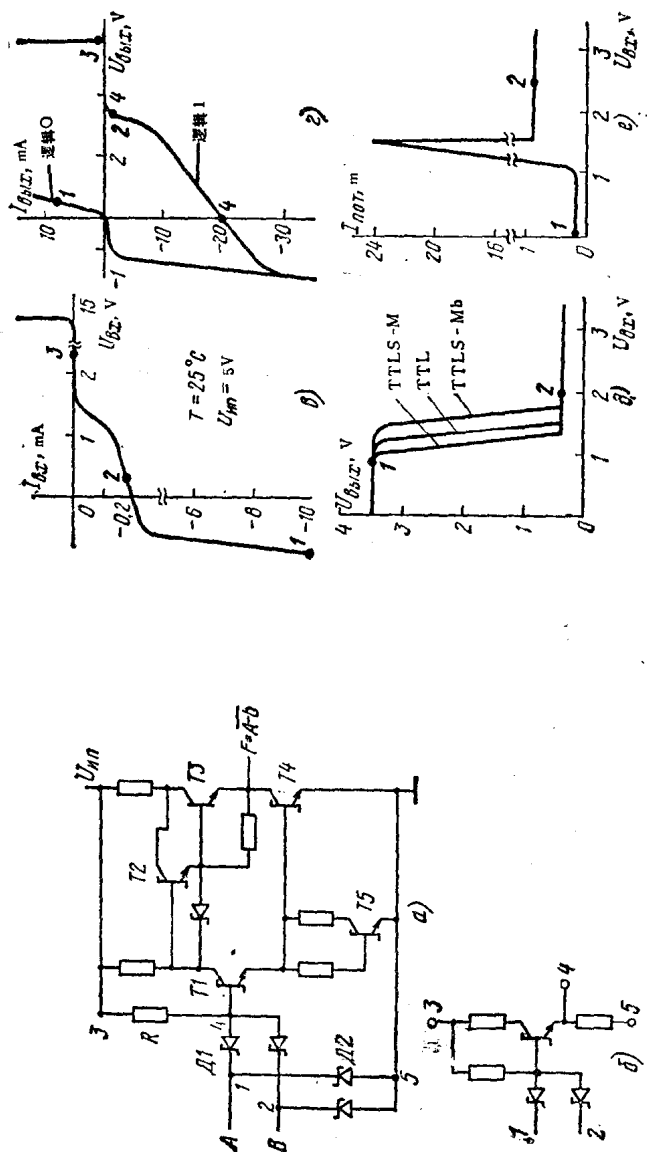


图 1.2 K 555 系列的 TTLS "与-非" 基本逻辑门 (a)、高速逻辑门的输入电路 (b)、K 555 系列集成电路的输入特性曲线 (c)、输出特性曲线 (d)、传输特性曲线 (e) 和电流特性曲线 (e)

个输入端上、而在其它的输入端上加入逻辑 1 电压测得的。图中还示出了 K 155 系列的 TTL 基本逻辑门和小功率高速逻辑门 (TTLS-Mb) 的特性曲线以资比较。

采用元件侧面介质隔离工艺以及减小元件尺寸, 能将信号的传输延迟时间减小到 $2 \sim 4 \text{ ns}^{[4]}$ 。这时, 假如将图 1.2, δ 的电路接到图 1.2, a 电路的相应点上以代替电阻 R , 则静态抗干扰能力将提高 0.4 V (图 1.2, δ 中的 TTLS-Mb 的传输特性曲线), 与 K 555 系列电路的抗干扰能力相比, 脉冲抗干扰能力并未降低。表 1.1 中列出了 TTL 和 TTLS 集成电路的主要电气特性^[5]。

发射极耦合逻辑(ECL)集成电路 图 1.3 示出“或/或非”主逻辑门。在 K 500 系列集成电路的逻辑门中, 没有元件 R 、 $\Pi 1$ 、 $\Pi 2$ 。

电路的输入阻抗低 ($4 \sim 15 \Omega$), 能与波阻抗为 $50 \sim 100 \Omega$ 的负载 (同轴线或带状线) 相匹配。

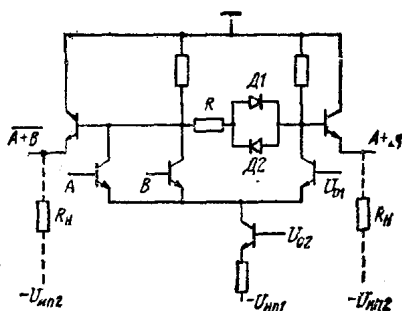


图 1.3 带补偿电路的或/或非 ECL 主逻辑门电路

K 500 系列的集成电路在功耗为 20 mW 时一个逻辑门上的延迟时间为 2 ns , 而输出逻辑电平则与环境温度和电源电压的变化有关^[6]。为了补偿输出逻辑电平的变化, 采用了补偿主逻辑门的专门电路和参考电压源, 后者决定了电路的开关阈值 U_{01} 和电流发生器 I_0 的电压 U_{02} ^[6]。输出电平变化的温度补偿是靠接入电阻 R 和二极管 $\Pi 1$ 、 $\Pi 2$ 以及提供对温度不敏感的参考电压源来取得的。图 1.4 示出

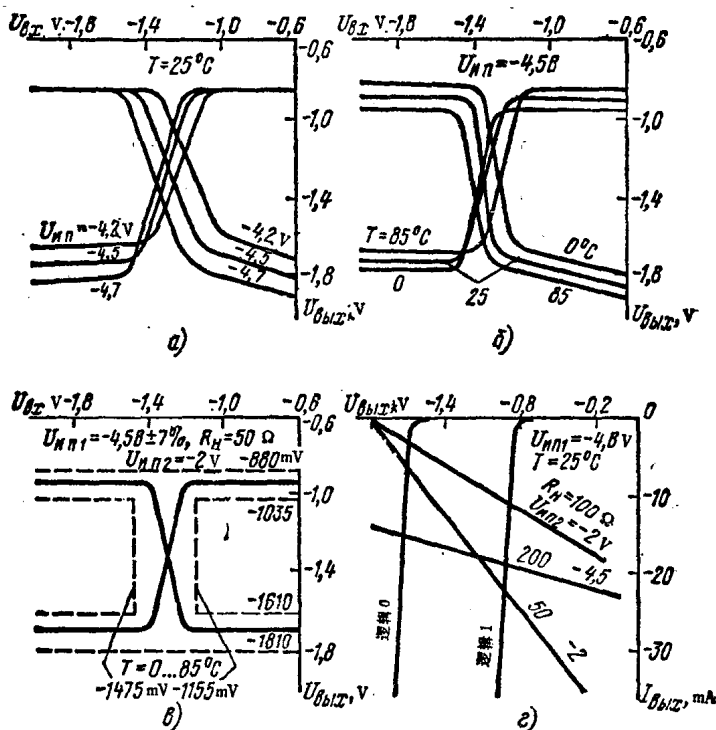


图 1.4 无补偿电路的或/或-非 ECL 主逻辑门的传输特性曲线 (a) 和 (b); 有补偿电路的逻辑门的传输特性曲线 (c) 和输出特性曲线 (d)

在有、无补偿电路时,逻辑门的传输特性曲线。虚线表示电源电压为 $4.5\text{ V} \pm 7\%$ 及环境温度为 $0 \sim 85^\circ\text{C}$ 时,传输特性的分散区域。图 1.4 d 示出有负载线的输出特性曲线。在以波阻抗为 $50\ \Omega$ 的匹配传输线作为负载及功耗为 40 mW 时,“或/或-非”主逻辑门的信号传输延迟时间为 0.75 ns ;而对于中、大规模集成电路的内部隔离,当功率为 10 mW 时,延迟时间为 0.5 ns 。表 1.1 中列出了 K 500 系列的电气特性。

集成注入逻辑电路 采用集成注入逻辑 (I^2L) 能降低双极性

电路的功耗、提高质量系数*（降低开关能量 $Pt_{\text{эпд}}$ ）及集成度。构成集成注入逻辑的基础是以下两个原理：一是把半导体的电耦合均匀区合并到集成电路的晶体内；二是把过剩的运动载流子直接引入开关晶体管的基极。

集成注入逻辑电路的内部隔离电路（图 1.5, a）起着非门的作用，它是由起开关作用的多集电极 n-p-n 晶体管 T1 和共基极 p-n-p 晶体管 T2 组成。

集成注入逻辑电路有能彼此连接起来并与 TTL 型集成电路一道工作的输入电路（图 1.5, б, з）和输出电路（图 1.5, в）。图 1.6 示出集成注入逻辑电路的静态曲线。输入特性曲线（图 1.6, а）是

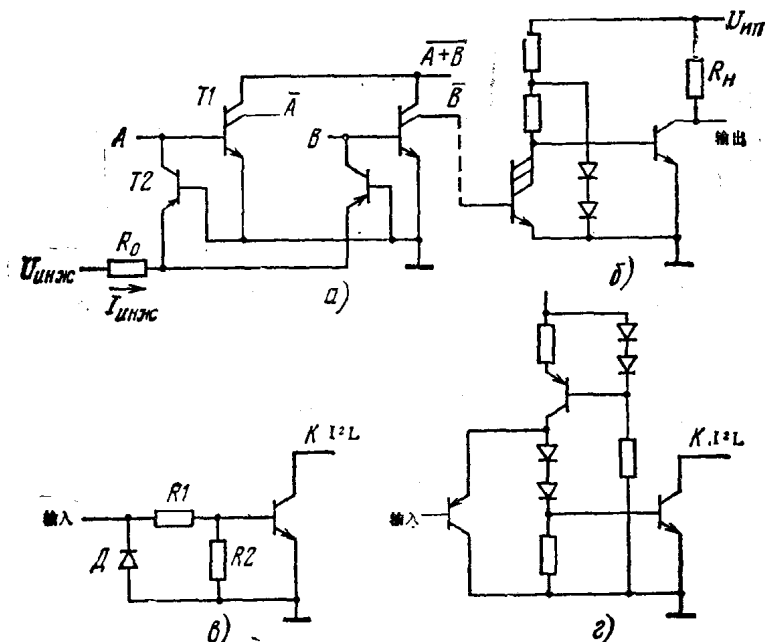


图 1.5 集成注入逻辑电路的内部逻辑门电路(a),输出逻辑门电路(б)和输入逻辑门电路(б,з)

* 即速度—功耗乘积。——译注