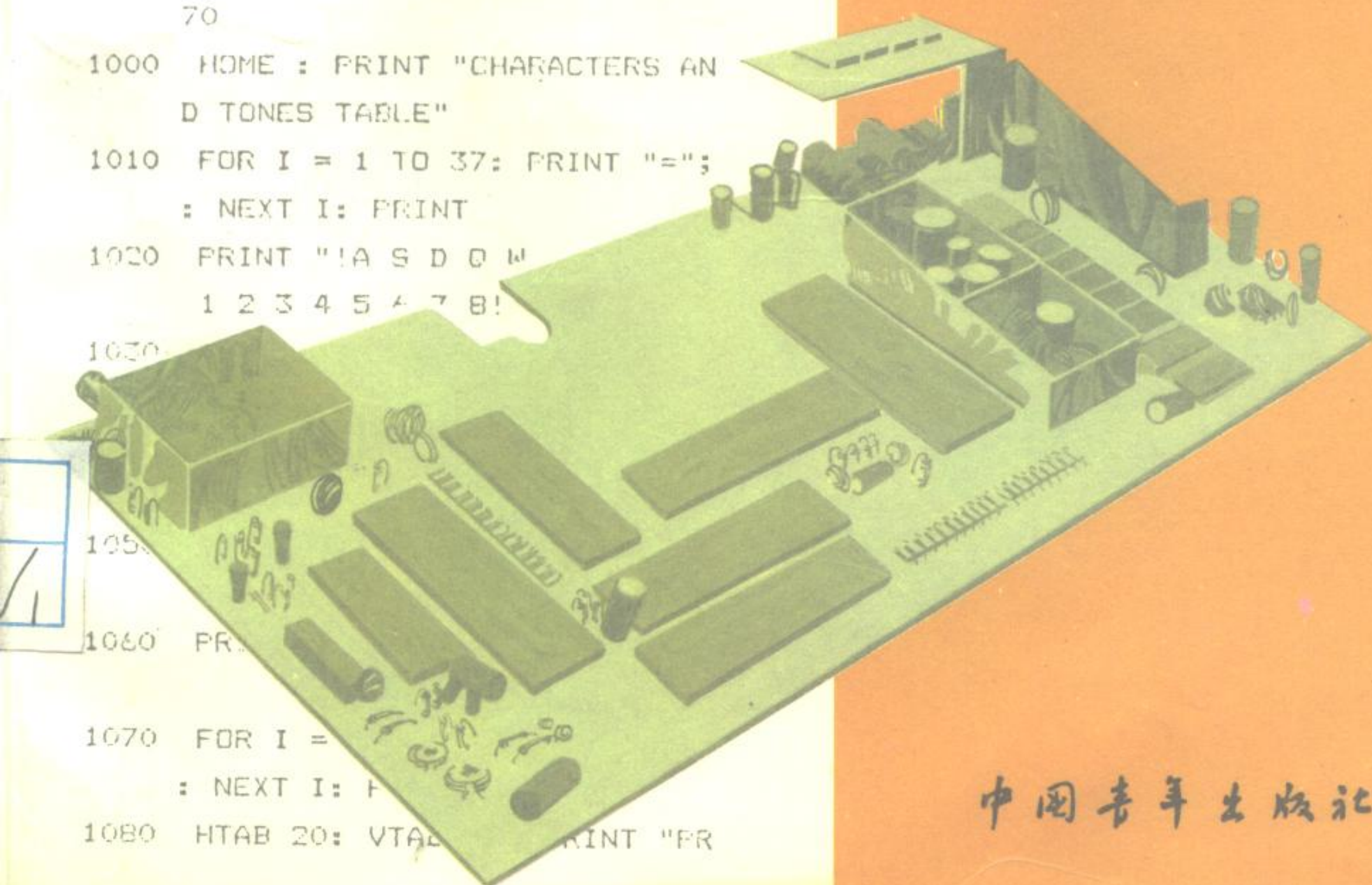


微电脑剖析 及功能改进

```

10 REM ELECTRONIC ORGAN
20 FOR A = 770 TO 795: READ B: POKE
  A,B: NEXT A
30 DATA 172,1,3,174,1,3,169,4,32
  ,169,252,173,48,192,232,209,
  253,136,208,239,206,0,3,208,
  231,96
50 DIM A(500)
60 HOME : PRINT "BEGIN TO PERFOR
  M OR PLAY,PRESS<B>OR<P>"
70 INPUT BP$
80 IF BP$ = "B" THEN 1000
90 IF BP$ = "P" THEN 2000
100 PRINT CHR$(7); CHR$(7): GOTO
  70
1000 HOME : PRINT "CHARACTERS AN
  D TONES TABLE"
1010 FOR I = 1 TO 37: PRINT "=";
  : NEXT I: PRINT
1020 PRINT "I A S D G W
  1 2 3 4 5 6 7 8!"
1030
1050
1060 PR
1070 FOR I =
  : NEXT I: F
1080 HTAB 20: VTAB
  PRINT "PR
  
```



中国青年出版社

微电脑剖析 及功能改进

彭 辛 岷 著

中国青年出版社

(京)新登字 083 号

责任编辑：黄大卫

封面设计：沈云瑞

微电脑剖析及功能改进

彭辛岷 著

中国青年出版社出版 发行

社址：北京东四12条21号 邮政编码：100708

中国青年出版社印刷厂印刷 新华书店经销

787×1092 1/16 18.75印张 2插页 440千字

1993年1月北京第1版 1993年1月北京第1次印刷

印数1—3,000册 定价9.60元

ISBN 7-5006-1169-2/TP·3

目 录

前 言	做电脑真正的主人	1
第一章	解剖电脑	3
第二章	数字电路基础	11
第三章	微处理器探秘	52
第四章	硬系统剖析	88
第五章	Z80 机器语言简介	122
第六章	软系统剖析	133
第七章	系统程序的工作	150
第八章	硬系统局部改造实验	189
第九章	软系统功能扩充的手段	198
第十章	PH 扩充系统程序详解	211

前 言

做电脑真正的主人

读者朋友，你既然有兴趣翻开此书，想必是一位电脑爱好者了。你能熟练地上机操作，会编程序，或许还在计算机竞赛中获得过名次。不过，恕我冒昧问一句：“你真正了解你的电脑吗？它真的听从你使唤吗？”一次，我曾这样询问一些中小学生的计算机竞赛的优胜者。大多数回答是肯定的：“这还用问？太了解了！”“这样说吧，电脑是我最忠实的仆人。”……为了证实，我补充了一个小小的问题：“你在键盘上按下‘A’键的时候，为什么显示器荧光屏上就会出现一个‘A’字符？这中间电脑里面究竟干了些什么？”结果，谁也没能说得清楚。于是我再问道：“那么谁能从键盘敲入这样一条命令——‘OFF’，让电脑关掉自己的电源？”同学们面面相觑，谁也不能。

是的，我们说了解电脑，不仅仅是熟悉它的性能和操作，还应该清楚它的内部构造和工作机制；不是只知道输入什么信息就会产生怎样的结果，而且还应该知道为什么和如何导致这一结果的。同时，如果我们只能迁就电脑那些约束使用者的规则，而不能丝毫违拗它的“脾气”，越雷池一步，那我们还远远谈不上是电脑的主人。

用户有必要这样深入地了解计算机吗？很多人认为无此必要，就像公共汽车乘客不必了解汽车原理一样。我们的观点却与此相反。如果仍然以汽车类比，那么电脑用户并不都等于“乘客”，他们很多人是“司机”或者“车主”。谁都知道，仅仅会“开汽车”的人决不能算是一个好司机。只有“懂汽车”的司机，才能使它在速度、油耗、安全、寿命各方面都达到最佳状态。计算机“司机”也是这样。

需要着重指出，计算机和汽车之类的机器有一个很大的不同之处，就是它的可开发性。计算机的使用性能并不是在制造出厂时就最后定局了的。由于系统采取的模块化和开放式结构，使之具有一定的可扩充和可重构性，给用户留有很大的用武之地。厂家提供的面向一般用户的基本使用系统，并不可能将机器的潜力发挥殆尽。在只会按使用手册“开车”的用户面前，计算机系统是个浑然一体的东西，如果某些方面不能满足需要，也只得考虑更换机型。而深知计算机结构的人，就能像庖丁那样“目无全牛”，把任何一台有模有样的电脑都看成具有可塑性的“半制成品”。他们可以采用各种手段进行“二次开发”，直接调动机器的硬软资源，增加某些功能以满足自己的需要。当电脑出现故障时，凭借他的知识便可作出大致的诊断，有的故障完全可以自己动手排除。只有这样的用户，才算得上把电脑用活了。

如果你是一位电脑迷，有志于计算机科技事业，那就更不应满足于那种“不知其所以然”的状况了。计算机科学是一门实验科学，是从一代代机器的设计制造中发展起来的，每一台电脑都物化着其中的精髓。所以，“读懂”你手中的机器是进入计算机科学殿堂的捷径。即使并不想成为电脑专家的人，研究一下计算机的原理也很有意义。令人感到神秘莫测的电脑，原来是由一些简单的元件按照并不深奥的法则构筑而成。对它的剖析可以给人很多启迪——逻辑的

方法,辩证的哲理,智力的锻炼以及科学美的感受……

事实上,很多富于求知欲和好奇心的电脑爱好者,早已不能容忍手中的电脑还是一只不知底里的“黑箱子”。有的“冒险”打开机壳看个究竟,有的煞费苦心地从头解读系统程序。但那密如蛛网的印刷电路,深不可测的集成块,“天书”般庞杂的机器语言文本,成了横亘在初学者面前的巨大障碍。他们需要引导和帮助。

给初学者讲解计算机知识,最好的办法莫过于从具体剖析一个机器系统入手。一般计算机读物,联系具体机型的多侧重于讲应用;讲解计算机原理的书又往往不结合实用机型,常以一种假设的、极度简化的“模型机”作为讨论的对象,难免使读者有隔靴搔痒之感。因此本书试图打破这种模式,以“标本机”取代“模型机”。“标本机”就是一台实际供使用的、“有血有肉”的机器。通过对它的硬软系统的深入剖析,讨论计算机是怎样构成的和怎样工作的,然后,帮助读者将知识付诸实践,对标本机进行二次开发的实验,真正体验一下作电脑“主人”的乐趣。

经过比较,我们选择了 LASER 310 作为标本机。

第一,它是中华学习机推广以前国内拥有量最大的学习机,电脑爱好者多数对它都很熟悉。现在很多中小学校和个人用户仍在使用的。

第二,它是八位低档机型,结构和功能的复杂性适中,初学者易于理解,很适合作为解剖实例。同时,它又具有较大的可扩展性,便于动手进行实验。

第三,价格低廉(新机约三四百元,并可经调剂渠道购到旧机),读者在经济上能够承受,进行解剖和改造的风险不大。

第四,由于它的内存小、显示分辨率低和无汉字功能等问题,正面临淘汰的边缘。作者曾为此开发过一个“LASER 310 高分辨率显示及汉字系统”在国内推广。本书将以它作为扩展改造的实例详细讲解。LASER 310 用户读后若能对它们进行一番改造,克服上述问题,延长应用寿命,在经济上也是有价值的。

当然,本书并不是专为 LASER 310 用户服务的。即使你从未接触过它,也不影响你的阅读。因为我们将对标本机的面貌、结构、功能作比较充分的描述,使之清晰地呈现在你的眼前。你可以将它同你自己所用的机器联系对比,触类旁通,达到相似的效果。

本书是电脑内部世界的一本导游手册,将引导每一位陌生的游客进入那神秘的国度,亲身游历一番,作一次实地科学考察。希望你在出口处能发出这样一声慨叹——“哦,电子计算机不过如此而已!”并且,立即着手拟订彻底征服它的计划。

祝你旅途愉快,此行成功!

第一章 解剖电脑

一、标本机概貌

本书选作剖析标本的 LASER 310, 是香港伟易达公司 LASER 系列微型电脑中的普及型学习机, 也是该系列中最为成功的机型。国内不少厂家在计算机普及的第一次浪潮中引进组装, 大受欢迎, 一时成了学习机的主流机型之一。

LASER 310 系列是逐步改进的产物, 国内市场上销售过 LASER 200 早期型, LASER 200 改进型, LASER 305 和 LASER 310 四种型号。200 型~305 型的机箱较小, 键盘采用类似计算器的橡胶键。310 (见图1-1) 改为操作方便的机械式键盘。系列发展中内部结构的改进, 主要是逐步提高了逻辑器件的集成度, 从而使电路得以简化; 内存容量也有所增加, 改善了工作条件。310 是这一系列的最后一个产品, 此后推出的 LASER 500, LASER 3000 等, 已属于另外的种类了。

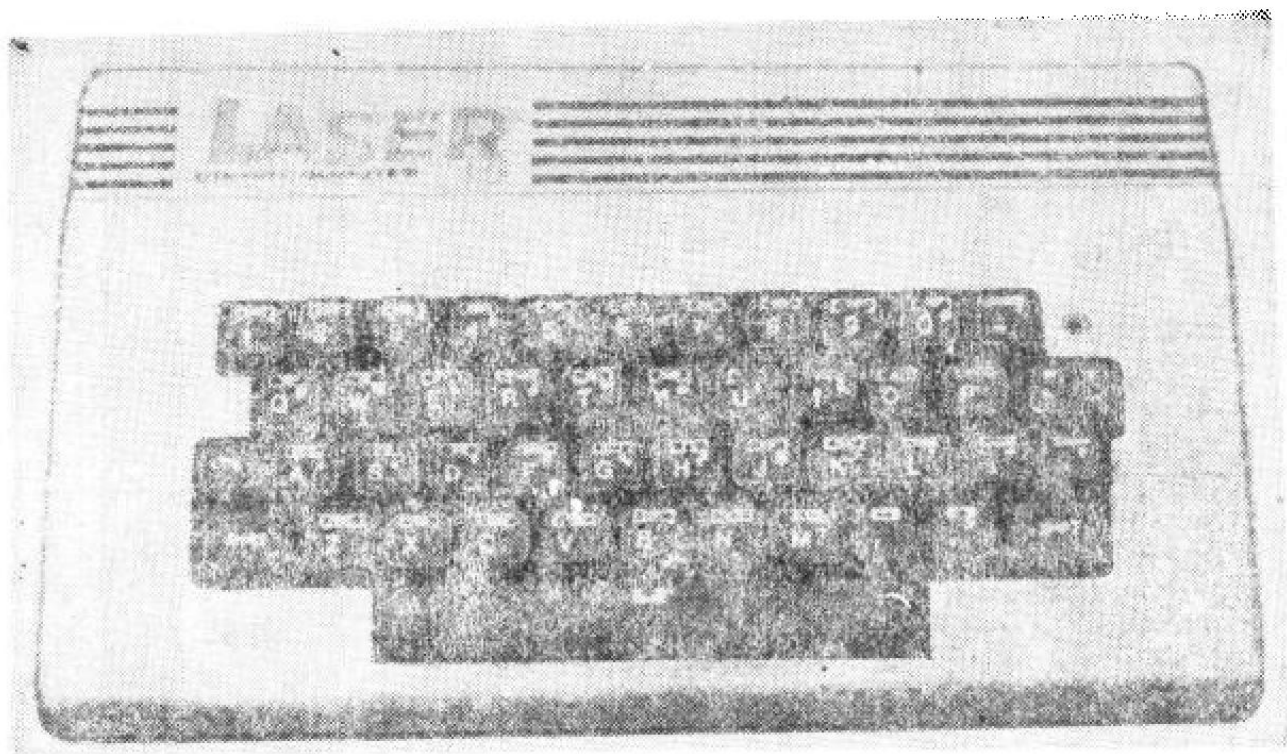


图1-1 LASER 310

从 200 型到 310 型, 主电路板结构变化较大, 但总体逻辑、系统程序和机器功能基本未变, 软硬件兼容。因而, 关于 310 型的讨论, 对 200 型~305 型也基本适用。

LASER 310 机器的顶部是 45 键的标准英文键盘, 右侧有电源开关。机箱后面是一列插

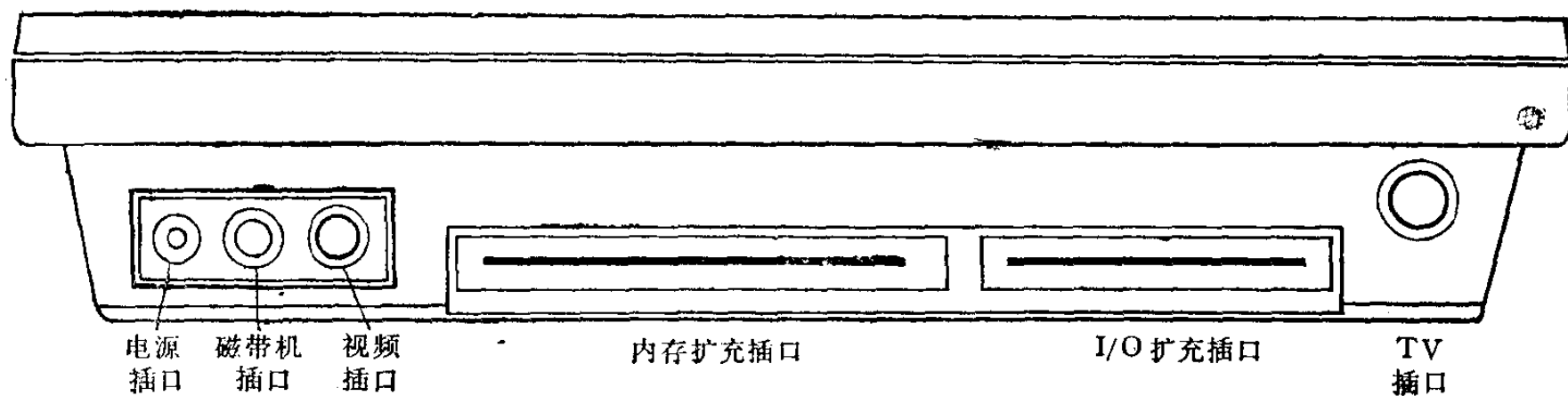


图 1-2 插口配置

口,其中有 9V 直流电源输入、磁带记录信号输入/输出、视频信号输出和射频信号输出的插孔;两个印刷电路板扩展插口中,22 线 $\times$ 2 的可供插接内存扩展卡或软盘驱动卡,15 $\times$ 2 的用来连接打印机、游戏棒或光笔等,见图1-2。

(一) 键盘功能

图1-3 是LASER 310 键盘图。它采取按键组合方式,每次按键可输入 1~5 种信息,共计可用来输入 402 种不同的字符、图符和控制信号。BASIC 语言的所有语句、命令和函数的保留词(除CLEAR),都可一次按键输入,非常方便。这是 LASER 310 受到用户欢迎的原因之一。按键输入方式如下:

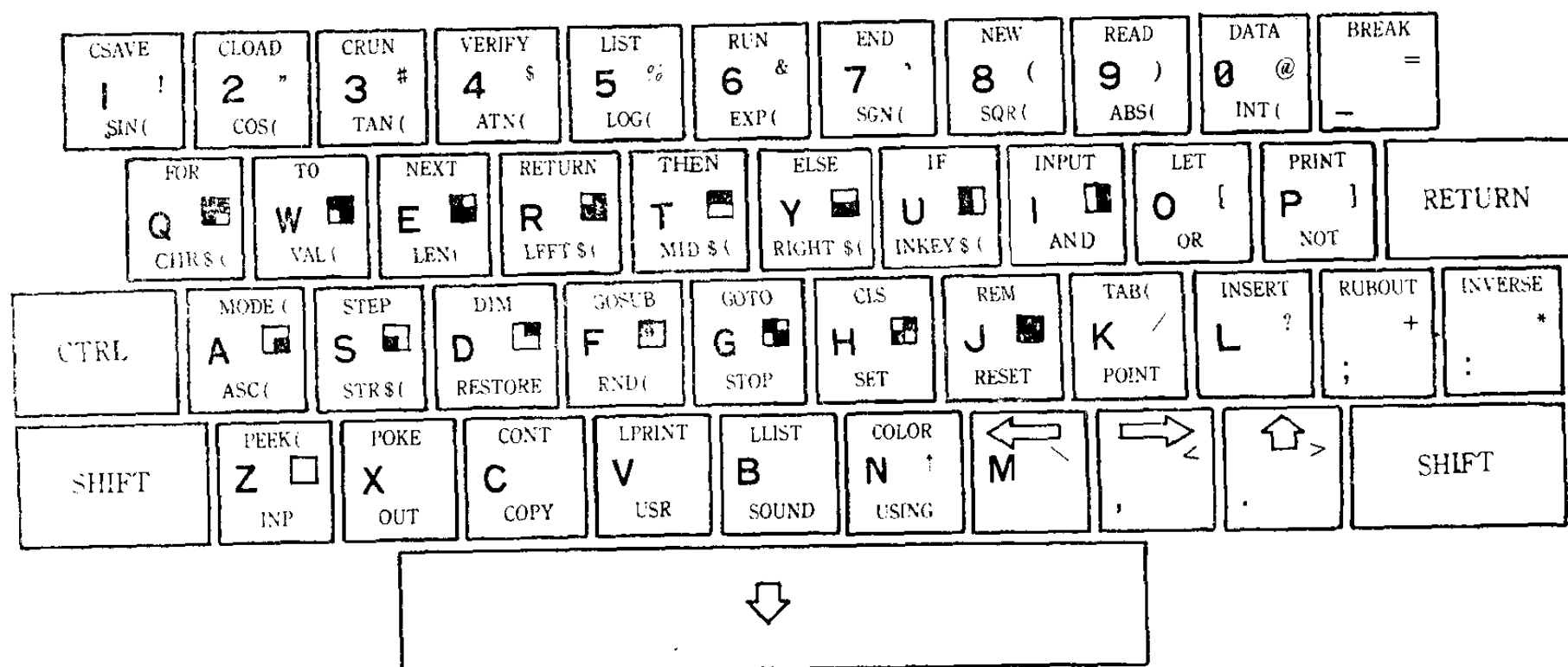


图 1-3 LASER 310 键盘

1. 每个按键均以左下部所标字符命名,单按一键即输入此字符。
2. 按住SHIFT键再按字符键(用SHIFT-□表示),输入该键右上部所标符号或图符。图符可选择 8 种颜色之一(按键前以命令设定)。
3. 按住 CTRL 键再按字符键(用 CTRL-□表示),输入该键上方所标保留词或控制信号。
4. 输入 FUNCTION 信号(CTRL-RETURN 键)后,单按字符键,输入每键下方所标

保留词,仅一次有效。

5. 输入INVERSE信号 (CTRL-:) 后,按上述1~4方式均输入反白字符,直至再输入INVERSE信号或按 RETURN 键为止。

6. 每次按键输入字符时,蜂鸣器发出短促叫声则表示输入有效。

7. 按住同一键不放,即可连续输入同一字符。

LASER 310 键盘输入功能比较有特色,但没有 RESET、自定义等键,也不能输入英文小写字母。

(二) 显示功能

LASER 310有视频和射频两路输出,显示终端可选用显示器或电视机。按电视信号制式分为NTSC/PAL/SECAM三种机型。我国引进的都是PAL制机型。射频输出分为 V 频段和 U 频段两种。输出的是彩色电视信号。机箱底部有彩色/黑白选择开关。

屏幕显示有文本和图形两种模式。每次开机自动进入文本模式,以供键入程序和命令。每屏显示 16 行,每行 32 个字符。显示字符集包括全部ASCII符号和16个图案符号(如■□等,详见“视频电路”一章)。

文本模式又分为两种显示相。正相为浅绿底黑字,负相为深绿底白字。常规开机后自动按正相显示,按住 CTRL 键开机则以负相显示。向系统工作区的 7818H 单元置入 0 或 1,也可改变屏幕显示相。在一种显示相之下,也可输入反相的字符,(用 INVERSE 键控制),但反相字符仅允许存在于字符串中。若处于引号外则不被系统接受,将报告“语法错误”。

屏幕背景颜色除上述的绿色外,还可用 COLOR 命令选择橙色背景。

图案符号用搭积木方式能用来构成低分辨率图形。每个图符(除阴影部分外)都有绿、红、蓝、黄、浅黄、青、洋红、橙等八种颜色可供选择。

图形模式用 MODE(1) 语句进入,每屏 128×64 个像素,用绘图语句可以画出较细的图形。图形画面可以保持,但若转入字符显示(例如程序或命令执行结束显示“READY”表示等待输入),将自动变为文本模式,使画面清除。需要时可采用程序延时或无限循环等手段来维持画面的显示。

图形背景可取浅绿或浅黄色,每种背景上的像素颜色各有四种选择。

LASER 310 显示功能的主要缺点是分辨率低,限制了它在汉字处理和游戏方面的发展。此外,它也不支持图形/文本混合显示。

(三) BASIC功能

LASER 310 与其他学习机一样,系统软件的主体是 BASIC 解释程序,可直接由键盘输入BASIC程序和命令。每个BASIC程序行最大可容纳 64 个字符,即两个显示行的容量。每行可包含一个以上的语句(用;号分隔)。若行首有行号,系统自动将它作为程序行存贮起来;不带行号时作为立即语句(命令)执行。

合法的BASIC语句和系统命令共 40 种,函数 23 种(包括字符串函数),逻辑、算术和关系运算11种,属扩展型BASIC语言(见表7-1)。它允许使用整型(-32768~+32767)、单精度型(六位有效数字)和字符串型的变量,也支持双精度(12位有效数字)常数运算,但无双精度型变量。

当程序或命令出错时,系统会报告错误性质及出错语句所在行号,但无错误处理功能。

系统不含汇编、反汇编和管理机器语言程序的功能。用户可用POKE 语句将机器语言程序的指令代码送入内存,然后以调用USR 函数方式启动运行。

(四) 编辑功能

LASER 310 具有全屏幕编辑功能,可用来对BASIC 程序方便地进行修改。

它有6 个与CTRL 组合使用的编辑键。四个箭号键(↑ ↓ → ←) 可控制光标在全屏幕上左右任意移动。光标所在的BASIC 行就成为编辑目标行。若屏上未显示此行,可用LIST 命令列出,再将光标调入。在光标位置键入字符,即取代原字符。INSERT 是删除键,可将光标所在字符删除,其后字符依次前移补空。RUBOUT 是插入键,可在光标位置插入一个空格,其后字符依次后移。编辑键按住不放,可实现连续操作。

修改妥当后,在行中任意位置按RETURN 键,就将全行输入程序区,取代原来同一行。这种编辑方式比中华学习机的行编辑方式简便,但不能复制和拼接。

(五) 输入/输出设备

系统基本配置的输入/输出设备是键盘、显示器(或电视机)、数据磁带机(可用普通录音机代)、压电蜂鸣器。

磁带机用来将程序或数据记存在磁带上,或将它们调入内存。其磁带记录信号是非标准形式,与别种机器不兼容。系统具有磁带读、写和校对命令,但不能控制磁带机的动作。

LASER 310有发声和音乐功能,但音频信号仅能通过压电蜂鸣片输出,音色不佳,输出的电视信号中不含音频成分。

通过机后的扩展插口,系统可以扩充多种外部设备。业已开发配套的有绘图仪(代打印机)、游戏操纵杆、软磁盘驱动器和光笔,还可加插16K/64K 内存扩展卡。用户也可利用这些插口来扩充自己所需的设备。外部设备必须带有接口电路,才能同主机联结。

二、机器的拆卸

由于微型电脑结构简单,拆卸起来并不困难。所需工具有平口和十字螺丝刀、镊子、20W 内热电烙铁等。为了防止电烙铁漏电损坏元器件,应将其外壳可靠接地。

在机器底部旋下6 枚(有的是8 枚)固定螺钉。然后把键盘朝上,面对后部插口,用螺丝刀轻轻撬开上下机壳。这时键盘部分同主机体分离,双方只有一条平行带状电缆相联。把键盘部分向前翻转,注意不要过分扭动电缆,以防两端焊接处脱落。

主电路板完全被金属屏蔽罩覆盖,并用4 枚螺钉固定在下机壳上,其中一枚位于屏蔽罩的圆孔内。旋下这些螺钉,焊开连接主板屏蔽罩同底部屏蔽板的编织线,手持屏蔽罩稍向前用力使各个插孔从机壳中脱出,印板即可翻开。此时可看见印板上有一对导线同电源开关相连,另一对导线通往固定在下机壳上的压电蜂鸣片。卸下固定开关的螺钉,焊开蜂鸣片上的焊点,主板就同下机壳完全脱离。

屏蔽罩有8 个焊脚,分别焊牢在印板的相应缺口中。将印板底面朝上,从右端开始,用烙铁顺序熔化各焊脚处的焊锡,同时用螺丝刀将焊脚撬离印板。全部游离后即可去掉屏蔽罩。电视机插口处的射频调制器小盒的顶盖也连在罩上,可一并取下。

上机壳内是键盘电路板,旋出全部螺钉,取下观察后最好立即复原,以免按键的弹簧、触点不慎脱落丢失。

LASER 310拆卸示意图见图 1-4。

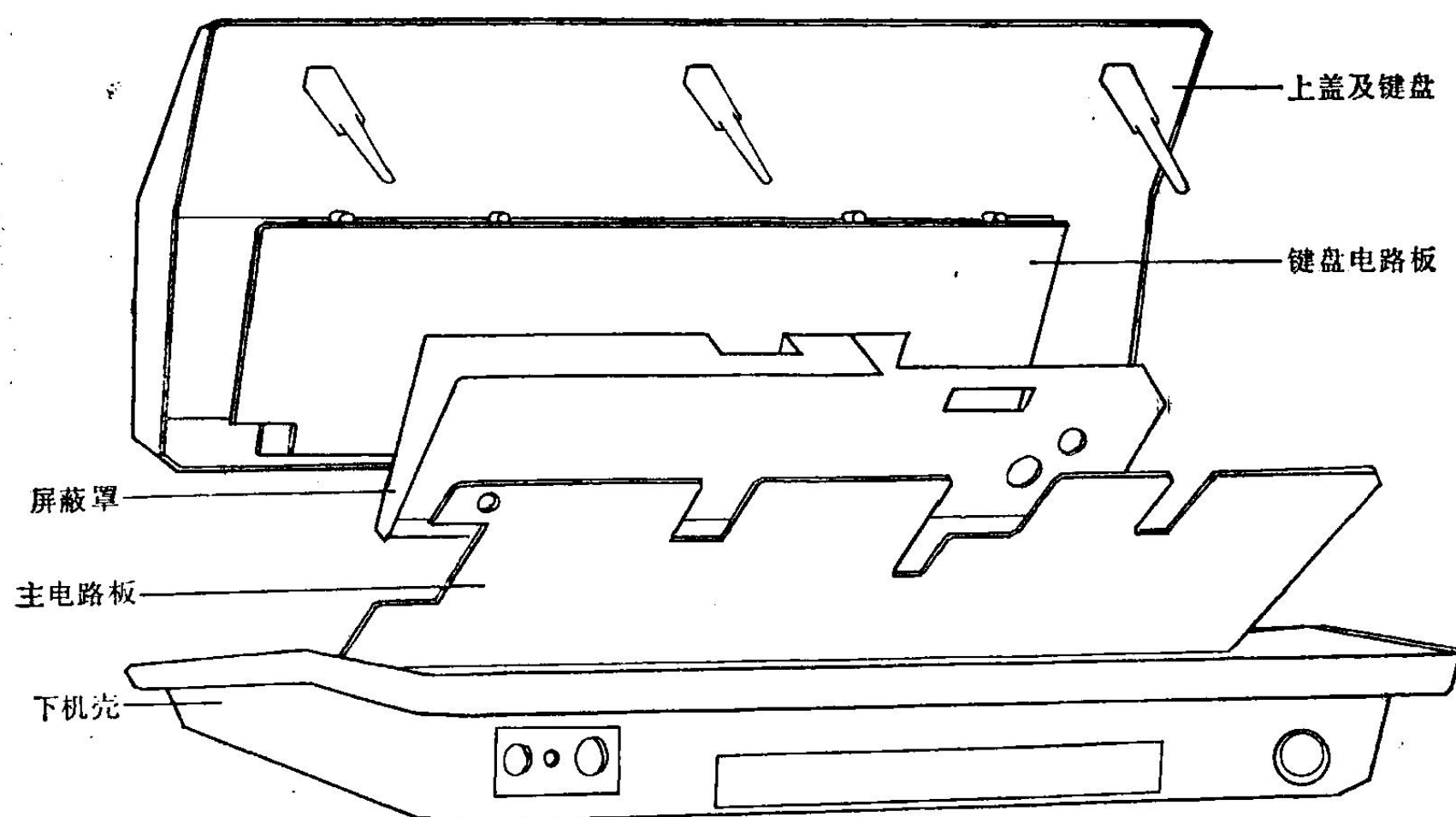
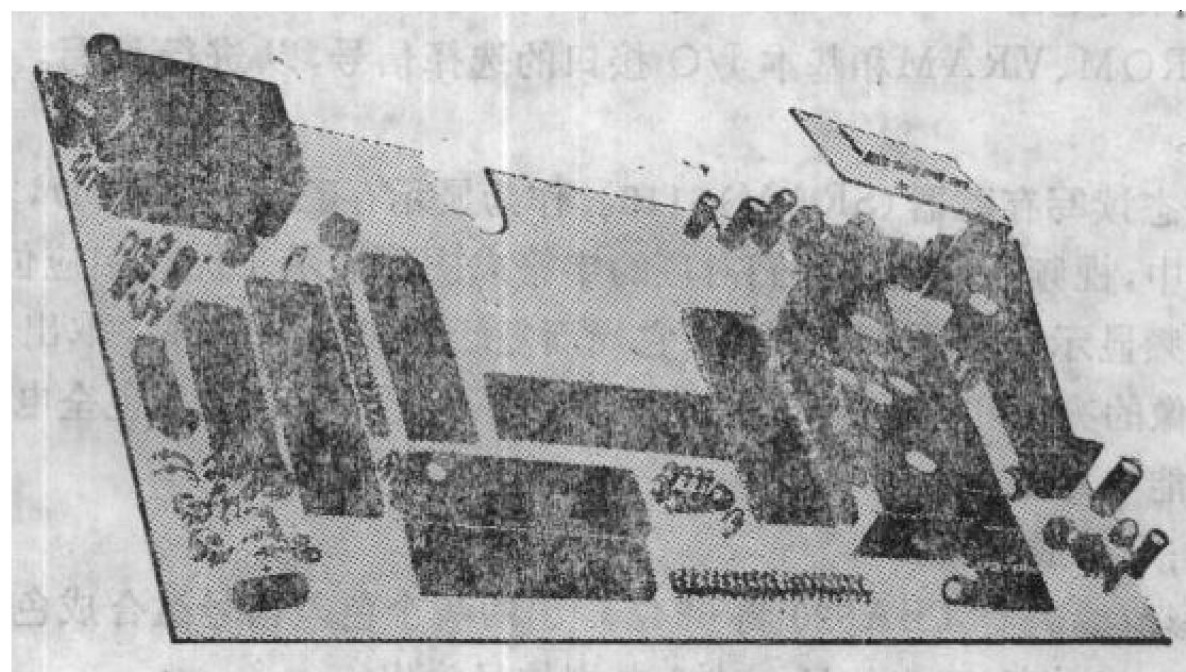


图 1-4 LASER 310拆卸示意图

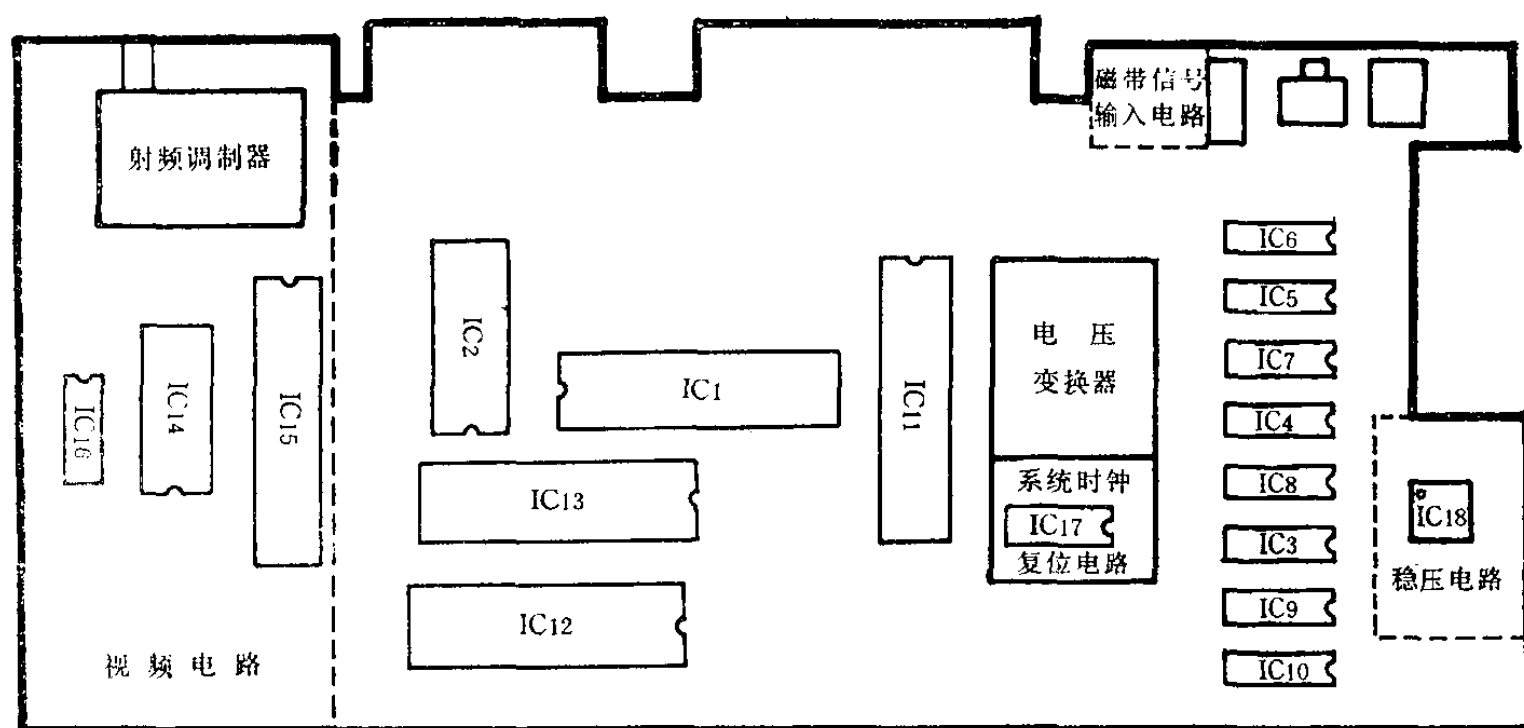
三、总体结构

机器拆开后,可以清楚地看到除键盘、蜂鸣片和开关外,所有部件都集中在—块印刷电路板上。因此,它基本上属于“单板机”类型(不过通常所说的单板机,连接键也做在同一电路板上)。

图1-5a是主电路板的外观。上面共有18片集成电路(IC),还有一些由分立元件组成的功能电路单元。图 1-5b 是IC和功能电路单元的分布示意图。



a. 主电路板



b.主电路板布置图

图 1-5

(一) 主要集成电路

IC1 微处理器 Z80A。它担任中央处理单元(CPU),除执行指令、进行运算外,还控制整个系统的工作。

IC2 只读存储器(ROM)613128。它是系统程序存储器,其中存放着系统软件V2.0的全部机器指令,是系统全部工作的基本依据。

IC3~IC10动态读写存储器(DRAM)4116×8,总容量16K。作为主存储器,用来存放用户程序、数据和系统工作信息。

IC11 门阵列电路GA008。用作DRAM接口电路,帮助CPU对主存储器进行寻址和读写、刷新等操作。此芯片上还有一组时钟信号分频电路。

IC12 门阵列电路GA004。它是本机基本的输入/输出(I/O)设备接口电路。CPU通过它连接键盘、磁带机、蜂鸣器和视频系统,控制信息的输入或输出。

IC13 门阵列电路GA003。担任地址主译码器,对CPU发出的地址信号译码,按地址范围分别产生对ROM、VRAM和基本I/O接口的选择信号,以进行读写。此芯片中还包含有视频调整电路。

IC14 静态读写存储器(SRAM)6116。作为显示存储器(VRAM),容量2K。CPU把显示代码存入其中,视频系统会将它们对应的字符或图形显示于屏幕相应位置。

IC15 视频显示发生器MC6847。它周而复始地扫描VRAM,取出其中的显示代码,据以生成电视图像的亮度和色差信号,以及同步、消隐信号,供合成彩色全电视信号。

(二) 功能电路单元

1. 视频信号合成电路。

PAL制彩色编码器TBA520将6847输出的两个色差信号组合成色度信号,再由晶体管加法电路把亮度、色度和同步信号合成全电视信号输出。

2. 射频调制器(RF)。

它将上述视频信号调制到一定的电视载频(一般为二频道)上,供普通电视机接收显示。

3. 系统时钟。

由石英晶体振荡器和非门等构成,产生 17.7345MHz 脉冲信号,经 GA003 内部的分频电路分频后,变成 Z80A 和 MC6847 的时钟信号 ϕ (3.457MHz),以及 PAL 制式的 4.43MHz 彩色副载频信号。

4. 电源电路。

图 1-6 中 *a* 部分是稳压电路单元。从外接变压整流器输入的 +9V 直流电,经 7805 集成稳压器后,稳压为 +5V 输出,给大部分 IC 供电。*b* 部分是电压变换电路,将 +9V 输入分别转换成 +12V 和 -5V 电压,供 DRAM 使用。

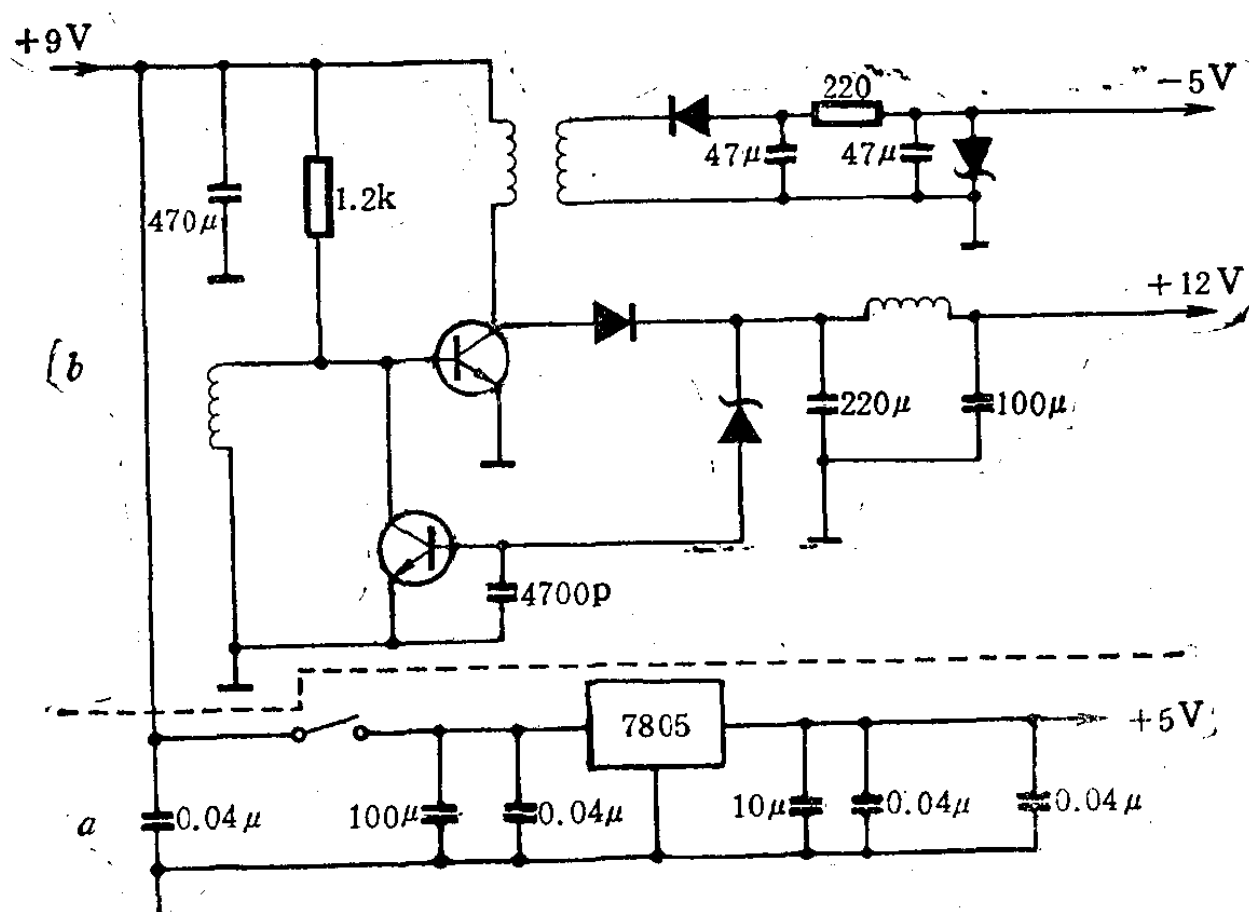


图 1-6 电源电路

(三) 键盘

键盘由按键和电路板两部分重叠组成,按键的结构见图 1-7。按键实质上是一些常开开关。每个键下是一对叉指状印刷电路,两端相近而不相接。当手指将键按下,键底部的导电橡胶块被压到印板上,同时接触两边的叉指端,使它们之间短路接通。手指放开,弹簧的弹力使导电橡胶块离开印板,又回到开关断开的状态。系统程序通过循环检测键盘电路,就能获知有哪个键被按下了。

(四) 总体逻辑

LASER 310 的总体逻辑图见第四章中图 4-1 (书末)。

虽然由于集成电路的使用,微型电脑的结构已大为简化,但集成电路都是多脚器件,所需连线仍然很多,线条必然细而密集,并且需交叉走线,一般采用双

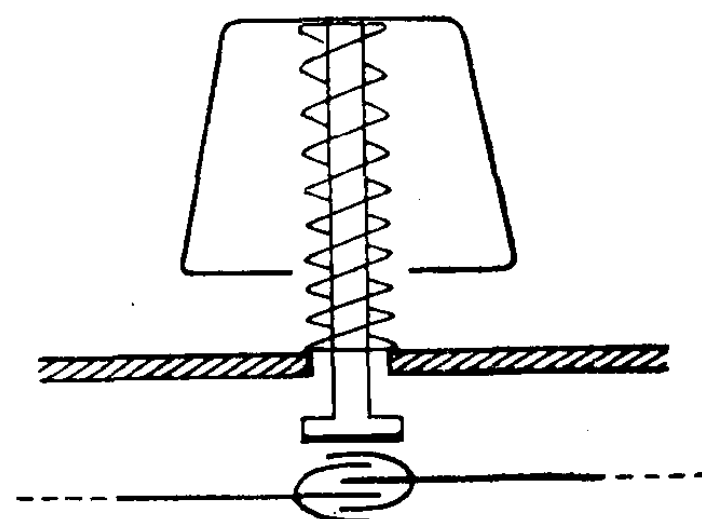


图 1-7 按键结构

面印刷电路。印板的设计和制造,难度都比较大。这也是业余电脑设计家难于独力自制一台实用型微电脑的重要原因。

CPU 需要和各个器件分别交换信息,完全采取单线直接联系的方式是不可行的,板上没有足够的布线空间。因而微型电脑的板上电路都采用“总线结构”。逻辑图上的线路比起实际的印刷电路简单得多,这是为了脉络清晰,对总线采取简化的示意法,将数据总线、地址总线和控制总线各画成一条线。从图上可以看到,同一组线可以连接多个器件,因而布线可以大为减少。

总线结构就像一个公共电话系统。同一组电话线上可以挂接多部电话机,大家都可以利用公共线路互相通话,条件是任何时候只允许两部话机占用线路。计算机器件间的“通话”也是此起彼落,可以交错进行的,而且每次“占线”时间非常短暂,所以一般不影响信息交换的及时性。

和电话系统不同的是,“通话”和“拨号”各用一组电路。地址信号相当于电话号码,译码器和接口电路相当于各级总机。CPU 先从地址总线发出地址信号,并从控制总线发出有关控制信号,各级译码器接收后产生相应的片选、行选、字选信号,就能将目标单元的数据端口打开,CPU 便可通过数据总线对它进行读写。数据总线虽然同时连接着其他器件,但此时它们都未选通,不收发数据,所以不会发生“窃听”事件。

印刷电路板边上的两组插头,就是各总线的游离端。将外部设备的相同总线 and 它们连接起来,就能和主机结成有机的整体,构成系统。

(五) 几点说明

1. 因组装厂和批次不同,每台 LASER 310 采用的 IC 商标、型号不尽相同,如 CPU 用日产 D780-C,VRAM 用 2016 等,但逻辑上是完全等效的。

2. 200 型~310 型电路结构的差别。

(1) 200 早期型。第一,系统程序存储器为两片 ROM;第二,未用门阵列电路,有关功能由通用 IC 组合来实现;第三,主电路板上重叠 RAM 板和 PAL 电路板各一块;第四,RAM 板上有 3 片 6116,分别用作主存和 VRAM,总容量 6K。

(2) 200 改进型。第一,用 GA003 和 GA004 取代 10 片通用 IC,大大简化了电路;第二,改用单片 ROM;第三,改为单印板,板上只装有两片 6116,连 VRAM 内存仅 4K,但留有两片(2K×2)SRAM 和一片 16KROM 的安装空位供用户扩充。

(3) 305 型。内部结构与 310 型相同,将橡胶键改为机械式键盘后即成 310 型。

以下我们将对各器件进一步深入剖析。其中少数 IC,详细逻辑资料未曾发表和无从获得。对此通常可用“读者无必要了解”为理由避而不谈,但这是同本书的宗旨相悖的。我们将沿着“由表及里”的途径,尽可能引导读者深入它们的内部,并给出说明其逻辑原理的“解析图”。因为我们的目的在于“理解”而非“制造”,故不一定穷尽其所有细节,具体物理结构也未必完全相符。这一点务请读者注意。

第二章 数字电路基础

标本机主印板看上去比电视机、收录机的还要简单,这是数字电路高度集成化的结果。微型计算机已经把电路的复杂性转移到集成电路内部,从而获得宏观结构的简化。为了弄清电脑的奥秘,必须“解剖”集成电路。

集成电路(IC)大都是一些矩形、多引脚的片状器件,用塑料、陶瓷或金属封装。如果有已经损坏的片子,可以打开它的外壳观察。会看到管壳内大部分面积不过是用来安置众多的引脚及连线,真正的“芯片”只占中央很小一点地方。目前使用的 IC 芯片都用硅晶体切片制成,边长 1/4 英寸(6.35mm)左右。芯片上制作了很多晶体管或阻容元件以及它们间的连线。现代计算机(包括 LASER 310 这样的初级学习机)普遍采用大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI),一个芯片上含有几千到几十万个晶体管,元件的表面形状已经小到肉眼不能分辨的程度。

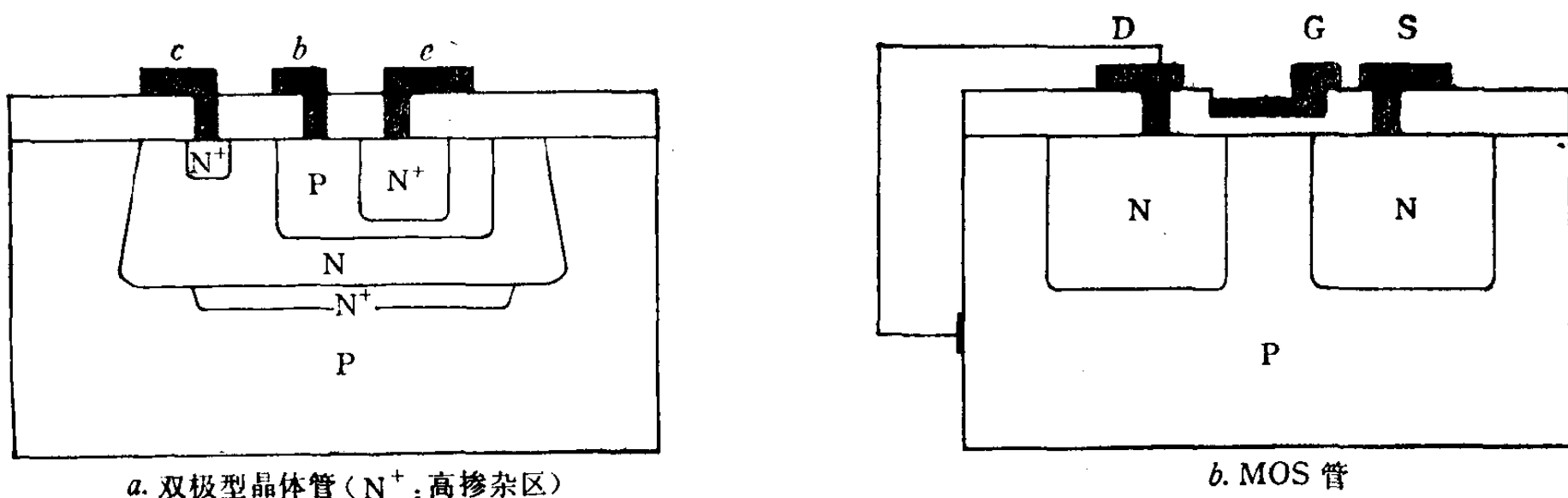


图 2-1 IC 基本元件结构(纵剖面)

一、IC 的“细胞”——开关管

(一) IC 的微观结构和工艺

IC 芯片的形态,既不像分立元件电路那种林立的空中结构,也不像印刷电路那样的单纯表面结构。它很像一件雕镂工艺品,是在平面上由表及里、纵深发展的立体结构。假如能用“显微外科手术”把标本机各个功能完全不同的集成电路彻底解剖开来,你将会发现组成它们的“细胞”竟是惊人的相似。各种 IC 的基本结构单元,可以归结为如图 2-1 所示的两种类型。其中 *a* 与普通的晶体管管芯结构相似,*b* 与金属-氧化物-半导体场效应管(MOS)管芯结构相似。它们又都同样是由一些相互包围的“P 区”和“N 区”构成。

硅是一种半导体材料。四价的硅原子外层有四个价电子,在纯净的晶体中每个原子的价

电子都同相邻原子的价电子结成共价键,形成相当稳固的晶格。接受外界的热能、光能后,硅晶格中会有少数价电子获得足够能量而脱出共价键,成为可以移动的“自由”电子。同时,原来共价键位置成为一个可以接纳电子的“空穴”。空穴本身虽不能移动,但可通过接受电子使相邻的晶格中出现空穴,相当于空穴向电子移动的反方向移动,并可以像接力一样地依次传递。可移动的电子和空穴,都能形成电流传输电能,称为载流子。纯硅中自发产生的载流子很少,是电的不良导体。用掺入杂质的方法可以使载流子大量增加,提高导电性。硅在熔炼时如掺入微量的三价硼元素,结晶时硼原子就代替部分硅原子组成晶格。由于硼原子少了一个价电子,于是晶格中形成一个空穴。掺硼的硅晶体成为以空穴为多数载流子的P(正)型硅。如果使用的杂质是五价的磷元素,因为磷原子进入晶格同硅原子结成共价键后还会多余出一个价电子,成为自由电子,就形成以电子为多数载流子的N(负)型硅。N型硅中的少量空穴和P型硅中的少量电子是少数载流子。P型与N型的区别是由两种极性载流子的相对多数所决定的。若在P型硅中加入更多的电子(例如掺磷),可变为N型;在N型硅中加入更多的空穴(例如掺硼)也会变为P型。集成电路就是以掺杂变型的手段,在一种硅晶体上制作出P型和N型区域互相穿插的结构。

制造IC的P型(或N型)硅晶体,直径可达10cm。将它切成0.25mm的薄片,便可以同时在上面制作几百个IC芯片。在一种衬底上制作反型区域,是通过分子扩散掺入杂质的手段实现的。为了划定掺杂区域的范围,先将基片表面全部氧化,生成二氧化硅(玻璃)保护层,然后在需要反型的部位开出“窗口”。开口的方法是用“光刻”。它类似印刷业的腐蚀制版术,在保护层上涂一层光敏抗蚀剂,上面覆盖绘有刻蚀图形的光学“底片”——掩模,凡是需要掺杂的部位都是不透明的。通过掩模给基片曝光(用紫外线或X射线)。掩模透明部分之下的抗蚀剂感光固化。用溶剂对整个表面进行腐蚀时,只有阴影部分的二氧化硅保护层被蚀刻掉,暴露出硅表面。这时把基片放到磷(或硼)蒸气中进行扩散处理,杂质原子便掺入开口部位。控制掺杂的浓度和深度,就可形成图2-1b那样的反型硅岛。

对于图2-1a中的晶体管,因为是纵向的多层次、多浓度结构,上述过程要重复多次。首先,表面氧化后用第一种掩模光刻出整个管芯面积的大孔,高浓度高深度掺磷,使整个管芯区域成为高N区;然后以较低的深度少量掺硼,使上面大部分区域再变成低N区。这个大的N区和衬底间的PN结构成与相邻管子隔离的边界。第二步,再度氧化表面,用第二掩模光刻出P区孔洞并进一步掺硼。第三步,氧化后用第三掩模光刻出两个N区并高浓度掺磷。

形成需要的PN区结构后,表面最后氧化作为绝缘层,光刻出需要接电极引线的开口。在整个表面积淀一层铝膜,使其同所有的接点实现电气接触。然后像腐蚀印刷电路板一样,光刻掉多余的铝层并实现线路分隔,把分离的元件按设计联结成有机的整体,集成电路便基本成型。基本工序见图2-2,再经切割、检测、焊线、封装,成为成品。

一个芯片上元件的多少,是由掩模设计所决定的。在一定的工艺条件下,制作元件多少生产费用相同,因此增加芯片上的元件密度可以大幅度降低每个元件的成本,还能提高工作速度和可靠性,简化整机电路结构。这些好处导致了集成规模的迅速发展。

技术上对元件密度提高的一个主要限制是光刻分辨率。当掩模线条的尺寸小到与所用光源的波长相比拟时,由于光能够衍射而“绕过”掩模图形线条,基片上不能形成所需的阴影,也就无法实现光刻了。所以,用于光刻的射线波长愈短,光刻分辨率愈高。紫外线(≤ 0.39 微

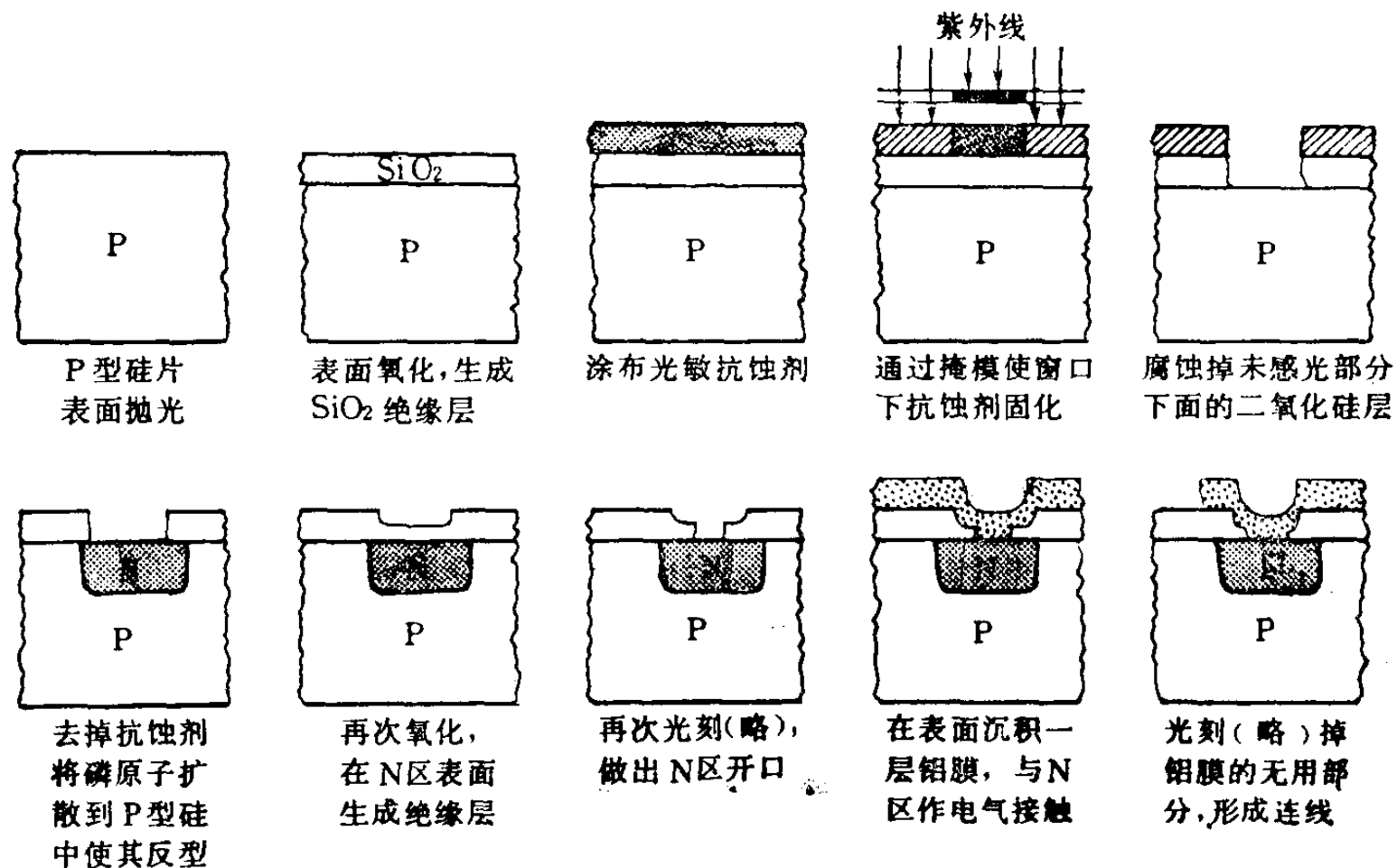


图 2-2 IC 制造工艺

米)的光刻极限 ≥ 1 微米,小于0.04微米的X射线光刻极限可达0.1微米。而采用电子束扫描,可以刻出更细的线条,使一块芯片上的元件数达到几十万、几百万个,不过相对成本也比较高。

(二) 开关管工作原理

数字IC里的晶体管和场效应管是作为开关元件来使用的。它们的工作原理需要从PN结的性质说起。

图2-1中有多处P型硅和N型硅的交界面。在这里,双方的多数载流子(N区的电子和P区的空穴)互相吸引,向对侧扩散而复合。N区一侧因少了电子而带正电荷,P区一侧因少了空穴而带负电荷,达到动态平衡时便形成一层称为“PN结”的静电位垒,其电场方向由N区指向P区(图2-3)。这个电场会阻挡双方的多数载流子继续向对方扩散,对于它们相当于很大的电阻。但它同时却能推动极性相反的少数载流子通过界面,即电子可由P区流向N区和空穴可由N区流向P区。

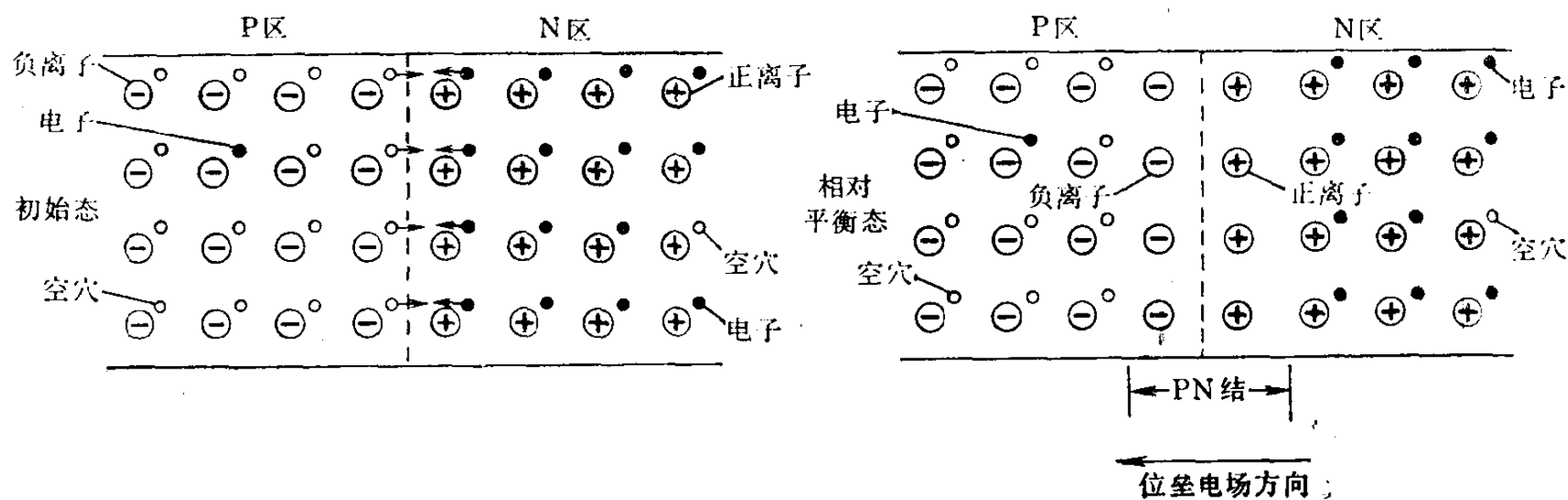


图 2-3 PN 结的形成