

# 电子学

《器件·分立和集成电路》

[美] A.H. 塞德曼 J.L. 温特雷伯著

陈剑青 郭宝民 译  
邢继发 金宏英 校

人民邮电出版社

# 电 子 学

《器件、分立和集成电路》

〔美〕A·H·塞德曼 J·L·温特雷伯著

陈剑青 郭宝民 译

邢继发 金宏英 校

人民邮电出版社

## 内 容 提 要

本书以简洁易懂的文字叙述和大量实例，阐明了现代电子学的主要内容和最新成就。全书共分五部分。前四部分为第2章至17章，从半导体器件的结构原理开始，依次讨论了常用的小信号放大电路、反馈电路、功率放大器、电源变换和稳压器等。除讲述分立元件电路外，着重讨论了运算放大器等模拟集成电路。第五部分为第18章至23章，讨论了数字电路器件和现代电子技术的新成就，它包括计算机的组成、各种类型的集成逻辑门、触发器、计数器和存储器，还有各种类型的数字显示以及模数与数模转换、微处理器等。

本书可作为中等技术学校电子电路课程的教科书，也可作为从事实际工作的技术人员的参考书。

## 电 子 学

《器件、分立和集成电路》

【美】A·H·塞德曼 J·L·温特雷伯 著

陈剑青 郭宝民 译

邢继发 金宏英 校

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

轻工出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/16 1983年11月第一版  
印张：27 8/16 页数：220 1983年11月北京第一次印刷  
字数：885千字 印数：1—16,500册

统一书号：15045·总2783—无6257

定价：2.50元

## 前 言

电子学领域十分广阔，而且在迅速地变化着。新的器件层出不穷，应用日益扩大。本书的主旨就在于使学生能适应和了解电子学的这些新发展。

作者在撰写本书时，有下列四点要求。

1. 叙述材料简明扼要。
2. 书中讲过的原理，采用大量实例来阐明它的应用。
3. 打下电子学的牢固基础，同时注意到其实际应用方面。
4. 着重讨论模拟和数字集成电路。

本书是为攻读电气工艺制造的学生而编写的一本电子学基础教科书。也适用于理工科的非电专业，还可作为从事实际工作的技术人员和工程师的参考书。由于本书取材编排的特点，讲授者可以灵活地安排讲授内容以满足自己的需要。

读者必须预先具备高中代数学和交直流电路的基本知识。书中大量的实例和各章的习题都经过精心安排，便于弄清概念和引导学生遵循标准工业的实践操作。

培养电工技术人材，其本意是要使他们具备工业方面的知识。为了达到这一目的，本书广泛地采用了工业数据。现代电工技术人员应能适应多方面的需要，并对电子工业的各个方面应具有维护操作的能力。举例来说，为了遵循这一原则，第十章便专门讨论了单片式和混合式集成电路的制造工艺问题。

## 译 者 序

本书以简洁易懂的文字叙述和大量实例，阐明了现代电子学的主要内容和最新成就。全书共分五部分。前四部分为第2章至第17章，从半导体器件的结构原理开始，依次讨论了常用的小信号放大电路、反馈电路、功率放大器、电源变换和稳压器等。除讲述分立元件电路外，着重讨论了运算放大器等模拟集成电路。在第十章还集中介绍了集成电路的最新制造工艺问题。第五部分为第18章至23章，讨论了数字电路器件和现代电子技术的新成就，它包括计算机的组成、各种类型的集成逻辑门触发器、计数器和存储器，还有各种类型的数字显示以及模数与数模转换、微处理器等。

因此，本书的特点可以说是从应用的观点出发，引用大量典型的实际数据，以不大的篇幅把电子学内容作了简明的分析，这在目前已出版的有关电子学方面的书中是很少见的。读者将会从书中获得对现代电子学的主要内容和最新发展方向的全面了解。

除许多实例外，书中还有大量习题供读者练习，对要求更进一步学习的读者，可按各章末的参考文献，根据自己的需要选读。

本书可作为中等技术学校电子电路课程的教科书，也可作为从事实际工作的技术人员的参考书。

由于全书内容广泛，译者水平有限，疏漏之处，敬希读者批评指正。

译者

1982.8

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	( 1 )
1.1 第一次电子学革命.....	( 2 )
1.2 第二次电子学革命.....	( 2 )
1.3 集成电路.....	( 4 )
1.4 本书概要.....	( 4 )
参考文献.....	( 4 )

## 第一部分 器件的工作原理

<b>第二章 半导体理论和二极管的工作原理</b> .....	( 6 )
2.1 原子结构.....	( 6 )
2.2 掺杂半导体.....	( 9 )
2.3 费密能级.....	( 9 )
2.4 结型二极管的工作原理.....	( 10 )
2.5 二极管的特性.....	( 13 )
2.6 二极管的应用.....	( 15 )
小结.....	( 17 )
参考文献.....	( 17 )
复习题.....	( 17 )
习题.....	( 18 )
<b>第三章 晶体管的工作原理</b> .....	( 20 )
3.1 结型晶体管 (BJT).....	( 20 )
3.2 晶体管的工作原理.....	( 22 )
3.3 晶体管的组态.....	( 23 )
3.4 晶体管特性曲线.....	( 26 )
3.5 场效应晶体管 (FET).....	( 26 )
3.6 结型场效应管 (JFET) 的工作原理.....	( 27 )
3.7 转移特性.....	( 29 )
3.8 耗尽型金属氧化物半导体场效应管(MOSFET).....	( 31 )
3.9 增强型MOS场效应管.....	( 32 )
3.10 MOS场效应管的组态.....	( 33 )
小结.....	( 33 )
参考文献.....	( 34 )
复习题.....	( 34 )
习题.....	( 34 )
<b>第四章 其它类型的半导体器件及其应用</b> .....	( 36 )

4.1 齐纳二极管	( 36 )
4.2 雪崩击穿和齐纳击穿	( 36 )
4.3 齐纳二极管稳压器	( 37 )
4.4 双阳极稳压器	( 39 )
4.5 可控硅整流器 (SCR)	( 39 )
4.6 可控硅的工作原理	( 40 )
4.7 三端双向可控硅 (TRIAC)	( 41 )
4.8 单结晶体管 (UJT)	( 42 )
4.9 肖特基 (Schottky) 二极管	( 44 )
4.10 变容二极管	( 45 )
4.11 发光二极管	( 46 )
4.12 光电晶体管	( 46 )
小结	( 47 )
参考文献	( 47 )
复习题	( 47 )
习题	( 48 )

## 第二部分 小信号运用

<b>第五章 放大器导论</b>	( 50 )
5.1 什么是放大器	( 50 )
5.2 放大器的必要性	( 51 )
5.3 基本放大器	( 51 )
5.4 符号	( 53 )
5.5 大信号和小信号的运用	( 53 )
5.6 工作分类	( 54 )
5.7 晶体管放大器	( 55 )
5.8 场效应管放大器	( 57 )
5.9 分贝 (dB)	( 60 )
5.10 级联放大级	( 61 )
小结	( 62 )
参考文献	( 62 )
复习题	( 62 )
习题	( 63 )
<b>第六章 小信号模型</b>	( 65 )
6.1 放大器的频率响应	( 65 )
6.2 晶体管模型的物理基础	( 66 )
6.3 混合参量模型	( 68 )
6.4 场效应管模型	( 73 )
6.5 电压源模型	( 74 )
6.6 使电压源和电流源为零的方法	( 76 )

小结	( 77 )
参考文献	( 77 )
复习题	( 77 )
习题	( 78 )
<b>第七章 单电源偏置电路和工作点的稳定</b>	<b>( 80 )</b>
7.1 晶体管的单电源偏置法	( 80 )
7.2 工作点(Q)的稳定方法	( 81 )
7.3 $R_E$ 对电压增益的影响	( 84 )
7.4 发射极电阻的旁路	( 85 )
7.5 偏置电路的计算	( 86 )
7.6 电压反馈稳定法	( 86 )
7.7 共基放大器的偏置	( 89 )
7.8 射极跟随器的偏置	( 89 )
7.9 场效应管的自偏置	( 90 )
7.10 源极电阻的旁路	( 92 )
7.11 场效应管放大器工作点的稳定	( 93 )
7.12 二极管稳定法	( 95 )
小结	( 96 )
参考文献	( 96 )
复习题	( 96 )
习题	( 97 )
<b>第八章 放大器的频率响应</b>	<b>( 100 )</b>
8.1 RC低通网络	( 100 )
8.2 混合 $\pi$ 模型	( 102 )
8.3 密勒效应	( 104 )
8.4 优值系数	( 107 )
8.5 场效应管的高频运用	( 108 )
8.6 集成晶体管的高频运用	( 110 )
8.7 放大器的低频响应	( 110 )
8.8 晶体管的级联级	( 113 )
小结	( 115 )
参考文献	( 116 )
复习题	( 116 )
习题	( 116 )
<b>第九章 反馈</b>	<b>( 118 )</b>
9.1 反馈概述	( 118 )
9.2 反馈的类型	( 118 )
9.3 反馈放大器的特性	( 119 )
9.4 各种类型的基本反馈放大器	( 123 )
9.5 负反馈对输入、输出阻抗(电阻)的影响	( 124 )



9.6 实用反馈放大器举例	(126)
9.7 反馈放大器的稳定性	(133)
小结	(134)
参考文献	(134)
复习题	(135)
习题	(135)
<b>第十章 集成电路制造工艺</b>	<b>(137)</b>
10.1 集成电路的类型	(137)
10.2 硅的加工处理	(138)
10.3 集成电路的制造	(139)
10.4 电隔离	(142)
10.5 交叉接点	(144)
10.6 工艺图	(144)
10.7 氧化	(145)
10.8 光敏抗蚀剂	(145)
10.9 扩散	(145)
10.10 <i>LSI</i> 和 <i>MSI</i> (大规模和中规模集成电路)	(149)
10.11 扩散元件的特点	(149)
10.12 寄生元件	(152)
10.13 重要特性小结	(153)
10.14 薄膜工艺	(153)
10.15 薄膜元件	(155)
10.16 厚膜工艺	(156)
10.17 厚膜元件	(157)
小结	(158)
参考文献	(158)
复习题	(158)
习题	(160)
<b>第十一章 运算放大器</b>	<b>(162)</b>
11.1 运算放大器的特点	(162)
11.2 差动放大器	(163)
11.3 恒流源	(168)
11.4 $I_0$ 的作用	(169)
11.5 达林顿对	(171)
11.6 中间级	(172)
11.7 直流电平位移器	(173)
11.8 输出级	(173)
11.9 运算放大器举例	(175)
小结	(177)
参考文献	(177)

复习题	(177)
习题	(178)
<b>第十二章 运算放大器的应用</b>	<b>(180)</b>
12.1 数据说明书的内容	(180)
12.2 放大器	(183)
12.3 数学运算	(187)
12.4 有源滤波器	(190)
12.5 直流失调电压和电流	(191)
12.6 频率补偿	(194)
小结	(197)
参考文献	(197)
复习题	(197)
习题	(198)

### 第三部分 大信号运用

<b>第十三章 功率放大器</b>	<b>(201)</b>
13.1 运用方式	(201)
13.2 甲(A)类功率放大器	(201)
13.3 功率放大器的失真	(210)
13.4 变压器耦合推挽功率放大器	(212)
13.5 其他型式的推挽放大电路	(215)
13.6 丙(C)类功率放大器	(216)
小结	(216)
参考文献	(216)
复习题	(217)
习题	(217)
<b>第十四章 无变压器功率放大器和散热装置</b>	<b>(219)</b>
14.1 串联输出放大器	(219)
14.2 互补对称放大器	(220)
14.3 准互补对称放大器	(225)
14.4 短路保护	(226)
14.5 集成功率电路	(227)
14.6 半导体器件的热性能	(228)
14.7 热参量	(230)
14.8 散热装置	(232)
小结	(234)
参考文献	(234)
复习题	(235)
习题	(235)

## 第四部分 电源转换

<b>第十五章 二极管整流器和滤波器</b> .....	( 238 )
15.1 半波整流器.....	( 238 )
15.2 全波整流器.....	( 240 )
15.3 额定反向峰值电压.....	( 242 )
15.4 纹波系数.....	( 243 )
15.5 整流器的效率.....	( 245 )
15.6 负载调整率.....	( 246 )
15.7 并联电容滤波器.....	( 247 )
15.8 图解分析法.....	( 251 )
15.9 $\pi$ 型滤波器.....	( 252 )
15.10 $RC$ 滤波器.....	( 253 )
15.11 二极管峰值电流.....	( 253 )
15.12 $L$ 型滤波器.....	( 254 )
15.13 倍压器.....	( 254 )
小结.....	( 255 )
参考文献.....	( 256 )
复习题.....	( 256 )
习题.....	( 256 )
<b>第十六章 稳压电源</b> .....	( 258 )
16.1 齐纳二极管稳压器.....	( 258 )
16.2 反馈式稳压器.....	( 262 )
16.3 串联稳压器.....	( 263 )
16.4 一种改进型稳压器.....	( 268 )
16.5 保护电路.....	( 269 )
16.6 集成稳压器.....	( 270 )
16.7 并联稳压器.....	( 274 )
16.8 稳流器.....	( 275 )
小结.....	( 275 )
参考文献.....	( 276 )
复习题.....	( 276 )
习题.....	( 276 )
<b>第十七章 电源控制电路</b> .....	( 278 )
17.1 用可控硅作控制元件.....	( 278 )
17.2 可控硅触发电路.....	( 281 )
17.3 电源控制的应用.....	( 285 )
17.4 直流—交流变换器和直流—直流转换器.....	( 288 )
17.5 电子点火系统.....	( 289 )
小结.....	( 290 )

参考文献	( 290 )
复习题	( 291 )
习题	( 291 )

## 第五部分 开关运用

<b>第十八章 计算机导论</b>	( 294 )
18.1 计算机的组成	( 294 )
18.2 二进制数	( 295 )
18.3 逻辑门	( 296 )
18.4 布尔代数基础	( 300 )
18.5 卡诺图	( 306 )
小结	( 307 )
参考文献	( 307 )
复习题	( 307 )
习题	( 308 )
<b>第十九章 二极管和晶体管开关</b>	( 310 )
19.1 半导体开关	( 310 )
19.2 脉冲特性	( 312 )
19.3 动态响应的改善	( 314 )
19.4 非饱和型晶体管开关	( 315 )
19.5 用二极管作开关	( 317 )
19.6 逻辑门的相互连接	( 321 )
小结	( 324 )
参考文献	( 324 )
复习题	( 325 )
习题	( 325 )
<b>第二十章 集成电路 ( IC ) 逻辑</b>	( 327 )
20.1 二极管晶体管逻辑 ( <i>DTL</i> ) 和高阈值晶体管逻辑 ( <i>HTL</i> )	( 327 )
20.2 电阻晶体管逻辑 ( <i>RTL</i> )	( 330 )
20.3 晶体管晶体管逻辑 ( <i>TTL, T<sup>2</sup>L</i> )	( 330 )
20.4 发射极耦合逻辑 ( <i>ECL</i> )	( 336 )
20.5 <i>CMOS</i> 逻辑	( 337 )
20.6 小规模集成 ( <i>SSI</i> )、中规模集成 ( <i>MSI</i> ) 和大规模集成 ( <i>LSI</i> )	( 339 )
20.7 集成注入逻辑 ( <i>I<sup>2</sup>L</i> )	( 339 )
小结	( 341 )
参考文献	( 341 )
复习题	( 341 )
习题	( 342 )
<b>第二十一章 多谐振荡器</b>	( 344 )
21.1 双稳多谐振荡器 (触发器)	( 344 )

21.2	触发器的触发	( 346 )
21.3	施密特触发器	( 352 )
21.4	单稳多谐振荡器	( 357 )
21.5	无稳多谐振荡器	( 359 )
21.6	电子定时器	( 361 )
	小结	( 364 )
	参考文献	( 364 )
	复习题	( 364 )
	习题	( 365 )
<b>第二十二章</b>	<b>计数器、寄存器和存储器</b>	<b>( 367 )</b>
22.1	存储器的类型	( 367 )
22.2	十进制计数器	( 367 )
22.3	同步计数器	( 369 )
22.4	中规模集成电路(MSI)计数器	( 371 )
22.5	数字时钟	( 372 )
22.6	移位寄存器	( 373 )
22.7	半导体存储器	( 376 )
22.8	双极型 RAM	( 377 )
22.9	双极型 ROM	( 379 )
22.10	MOS存储器	( 381 )
22.11	MOS随机存取存储器(MOS RAM)	( 383 )
22.12	MOS只读存储器(MOS ROM)	( 385 )
22.13	ROM 的应用	( 386 )
22.14	电荷耦合器件(CCD)	( 387 )
22.15	易失性	( 387 )
22.16	半导体存储器的比较	( 388 )
22.17	非半导体式存储器	( 388 )
22.18	磁泡存储器	( 390 )
	小结	( 390 )
	参考文献	( 391 )
	复习题	( 391 )
	习题	( 391 )
<b>第二十三章</b>	<b>显示器、转换器和微处理器</b>	<b>( 393 )</b>
23.1	数字字母显示	( 393 )
23.2	模/数(A/D)和数/模(D/A)转换	( 398 )
23.3	数/模(D/A)转换器	( 399 )
23.4	A/D转换器	( 402 )
23.5	微处理机导论	( 403 )
23.6	微处理机的特性指标	( 404 )
23.7	微处理器的组成	( 405 )

23.8 数字万用表—电子系统举例	(408)
小结	(410)
参考文献	(410)
复习题	(410)
习题	(411)
附录A	(412)
A.1 四端线性网络	(412)
A.2 场效应管Y参量模型	(414)
A.3 不定Y矩阵	(415)
附录B	(417)
B.1 密勒效应	(417)
B.2 优值系数	(418)
B.3 高通网络响应	(419)
部分习题答案	(421)

# 第一章 绪 论

回顾十九世纪末叶，电子学领域里有过一段激动人心的历史。那是1883年，托马斯·爱迪生在他多次进行改进白炽灯性能的试验中，有一次，他想在灯泡内安装一块叫做板极的极板时（图1-1），获得了第一次重大的发现。他把检测直流电流用的检流计一端和板极连接，

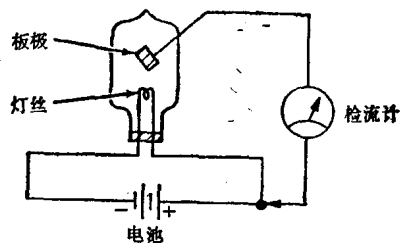


图 1-1 爱迪生效应

当检流计的另一端和电池的正端连成回路时，检流计指示出流过板极的电流。反过来，当把检流计和电池负端连接时，没有电流流过板极。这一现象便称为爱迪生效应。

用电子学理论很容易解释爱迪生效应：灯丝加热后，电子就从灯丝中逸出，当板极和电池正端连接时，带负电荷的电子受到板极的吸引（异性电荷相吸引），从而有电流流通。当板极和电池负端连接时，由于同性电荷相互排斥，所以电子受板极排斥，因而没有电流流通。爱迪生如实地记录了他所观察到的结果，但却未能认识到这一发现的重要意义。

十九世纪末，二十世纪初。人们对电子学的兴趣主要集中在无线电报上，其中一个问题就是无线电信号的检测。当时曾采用过许多种检测器，但每一种都各有不同的缺点。直到1905年，约翰·安布罗斯·弗列明对一种较完善的电子二极管检测器取得了专利。这一器件便是爱迪生效应的一种应用。电子二极管用现代符号表示如图1-2所示。大多数电子管都有一个

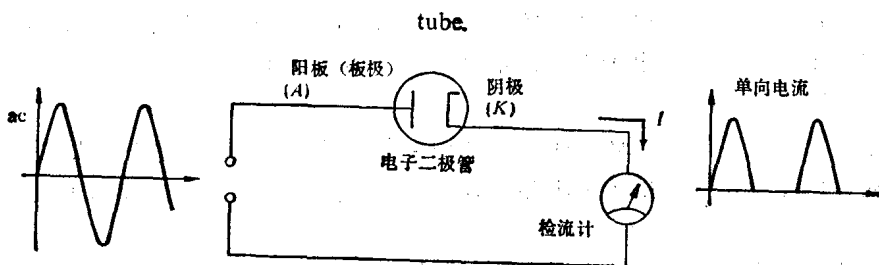


图 1-2 用电子二极管把交流电流转换成单向电流

个环绕着灯丝的金属圆筒，称为阴极(K)，代替灯丝本身作为电子发射源。因此，图中阴极就是电子发射源。环绕着阴极的极板称为电子管的阳极(A)。

电子二极管的基本运用原理示于图1-2。交流信号是与电子管和检流计串联的。信号为正半周时，板极相对阴极为正，因此，二极管导通。负半周时，板极相对阴极为负，因而没有电流流通。这样，交流电流便转换成单向电流了。检流器便可把它检测出来。

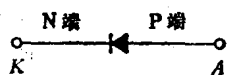


图 1-3 半导体二极管的电符号

1906年，达沃迪发现，可以把人造金刚砂（碳化硅）进行加工，使之具有类似于弗列明二极管的性能，称为晶体检波器，这一器件在无线电早期非常流行，直到今天仍然有广泛的用途。在目前技术术语中，晶体检波器指的就是半导体二极管或称固态二

极管。它的电符号如图1-3所示。今后在本书中还要更多地讲到这种器件。

## 1.1 第一次电子学革命

李·德弗列斯特是另一位发现优质无线电信号检测器的工作者。他曾对弧光检波器进行研究，并在1907年研制了电子三极管，他称之为三极管。电子三极管的现代符号示于图1-4。

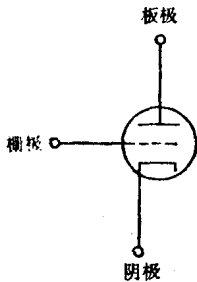


图1-4 电子三极管的电符号

三极管工作原理的关键是安装在阴极和板极之间的栅极。由于栅极紧靠着阴极，因此，电子从阴极逸出时，栅极对这些电子产生很强的影响。

如果在三极管的栅极和阴极加上一个小电压（三极管有适当的直流供电时），便有相当大的（经过放大的）、而且是不失真的复制信号出现在电子管的板极和阴极之间。这一作用称为放大，而这种电路便称为放大器。此外，如果板极通过适当的电路和栅极连接，那么，不需外加信号就能产生固定振幅和频率的正弦波。这种电路便称为振荡器。

由于有了放大器和振荡器这两种电子管电路，才使我们今天所熟悉的无线电和电视广播成为现实。其他诸如雷达、自动导航、立体声放大器和计算机等的应用，也无不归功于电子管的发明。可以说，正是在这一发明推动下，开创了伟大的技术和社会革命，改变了我们的生活方式和思想方法。当然，这还不是对这一发明的全面评价。

1907年以来，三极管历经多次变革，都是致力于改进它的运用特性和可靠性方面。然而，电子管有它固有的弱点。管子的灯丝必需加热至足够的温度以便使阴极发射电子。要做到这一点，灯丝必需有电压和电流供电，其典型值分别为6.3伏 ( $V$ ) 和0.3安 ( $A$ )。电压乘以电流，便求得供给灯丝的功率，即大约是2瓦 ( $W$ ) ( $6.3\text{伏} \times 0.3\text{安}$ )。最早的第一台电子数字计算机大约用了18,000只电子管。假定每只管子加热灯丝需要2瓦，则需供36,000瓦的功率，这是一种巨大的功率损耗。

电子管还有其他一些缺点。体积较大、结构松散就是其中之一。他的使用寿命虽然长，但也没有装放大器和振荡器所用的电阻和电容的寿命长。这就是管子做成易于从电路中插、拔的原因。

如果现代的计算机依靠电子管进行工作，那是很难想像的，因为采用这种早期器件实际上是行不通的。那么，需要什么样的器件，它既具有电子管的一切功能但又不消耗灯丝功率、体积小和可靠性高呢？晶体管的发明正满足了这种需要，也正是晶体管器件引起了电子学领域的第二次革命。

## 1.2 第二次电子学革命

晶体管是约翰·巴丁、沃尔特·布雷登和威廉·肖克莱在1947年发明的。鉴于它的重要价值，这些人共同获得了1956年诺贝尔物理奖金。图1-5是一页复制的他们的实验记录。此页记下了最后的结果并写道：“此电路实际上是传送话音，当开关把器件接入和切除时，可以听到话音电平有截然不同的增益，并从示波器的图形看出质量上没有显著的变化。”

最早制造的第一只晶体管器件是点接触式晶体管。点接触式晶体管和电子管一样，可以



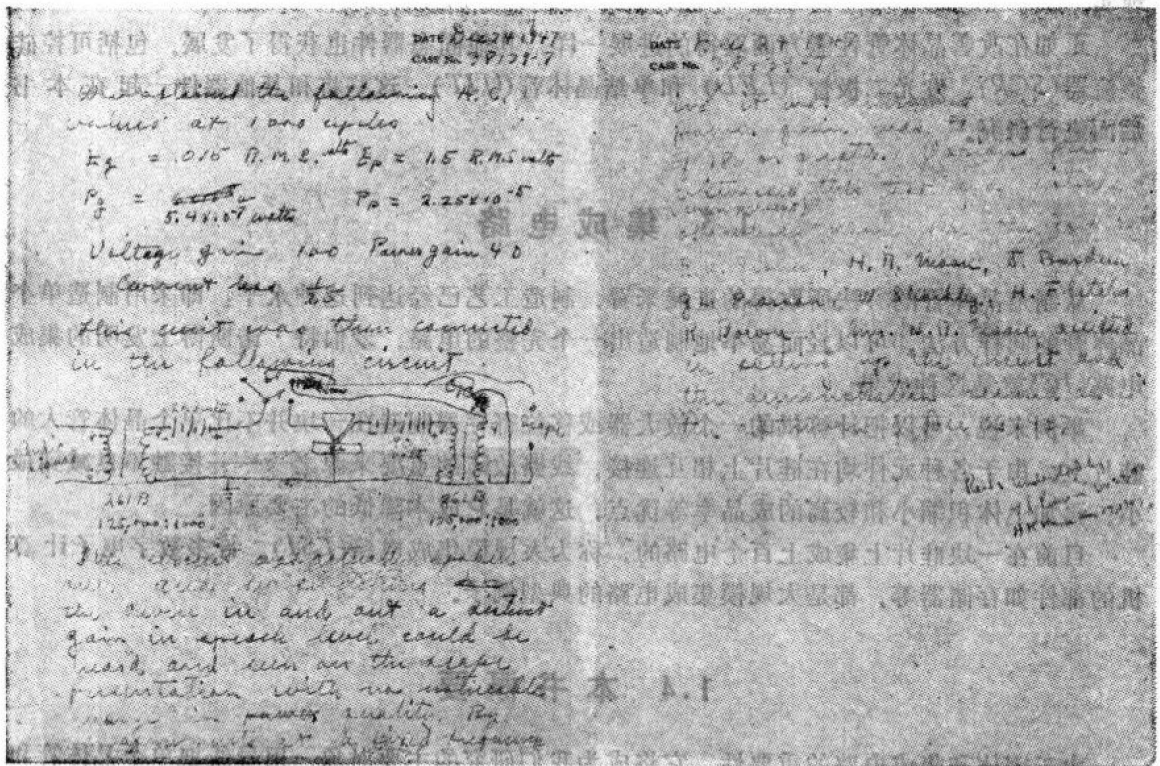


图 1-5 这一页实验记录记下了1947年12月24日发现晶体管效应时的实验结果（承蒙贝尔电话实验室供稿）

用来放大信号，也可以用作振荡。但它的工作特性有时出现异常现象，不容易确切地掌握。数年之后，根据肖克莱的理论研究，研制成双极型晶体管（BJT）。BJT具有较优越的性能，没有点接触式晶体管的局限性。直到今天，这种晶体管仍在普遍地应用着。

NPN双极型晶体管的电符号如图1-6所示。基极与电子管的栅极大致类似，集电极与

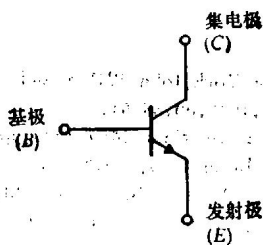


图 1-6 NPN双极型晶体管 (BJT) 的电符号

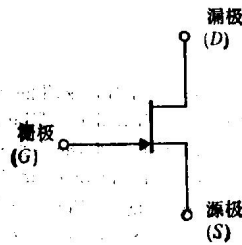


图 1-7

板极类似，而发射极与阴极类似。这种晶体管只不过是固态器件族中的一种典型器件。它的工作原理将和其他固态器件一起在下面几章中详细地讨论。

另一种重要的固态器件是场效应管（FET）。N-沟道场效应管的一种电符号表示法示于图1-7。这里的栅极相当于电子管的栅极，漏极相当于板极，而源极相当于阴极。场效应管实际上比结型晶体管更类似于电子管。

晶体管已经成为电子工业的标志。克服电子管的缺陷后，晶体管已促成了电子学的加速成长和发展，使精密复杂的数字计算机、人工操作的电子计算器、廉价晶体管收音机等成为