



手把手教你学系列丛书

DSP

# 手把手教你学 DSP

——基于TMS320F28335

(第2版)

张卿杰 徐友 左楠 卞康君 编著



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

手把手教你学系列丛书

# 手把手教你学 DSP

## ——基于 TMS320F28335

### (第 2 版)

张卿杰 徐友左 楠 卞康君 编著



北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书详细地阐述了 TMS320F28335 处理器内部各功能模块的硬件结构、工作原理、资源分配、功能特点以及应用等内容,同时每个模块都配了实验教程,方便学生掌握提高。本书是再版书,相比第 1 版,本书增加了 DSP 编程开发环境一章,并对各章节的部分内容进行了修订,使内容更加充实。

本书配套资料包括:书中所有实例例程、烧写软件工具、配套 PPT、配套视频以及常用的调试工具软件,读者可以在研旭电气提供的交流论坛([www.armdsp.net](http://www.armdsp.net))相关版块或 [www.f28335.com](http://www.f28335.com) 网站免费获取。

本书可作为 DSP 开发应用的入门级教材,也可作为其他层次 DSP 开发应用人员的参考手册。

### 图书在版编目(CIP)数据

手把手教你学 DSP: 基于 TMS320F28335 / 张卿杰等  
编著. -- 2 版. -- 北京: 北京航空航天大学出版社,  
2018.1

ISBN 978-7-5124-2645-0

I. ①手… II. ①张… III. ①数字信号处理 ②数字信  
号—微处理器 IV. ①TN911.72②TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 020341 号

版权所有,侵权必究。

### 手把手教你学 DSP——基于 TMS320F28335(第 2 版)

张卿杰 徐友左 楠 卞康君 编著

责任编辑 董立娟

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: [emsbook@buaacm.com.cn](mailto:emsbook@buaacm.com.cn) 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:710×1 000 1/16 印张:31 字数:661 千字

2018 年 2 月第 2 版 2018 年 2 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2645-0 定价:79.00 元

## 第 2 版前言

本书第一版问世后,深受广大 DSP 爱好者的欢迎,很多读者也对此书的内容、编排提出了诸多宝贵意见。于是,我们对本书进行了修订:增加了 DSP 编程开发环境一章,也对各个章节的例程介绍做了修改,使内容更加充实。

TMS320F28335 是 TI 公司研发的一款经典 DSP,深受市场欢迎。随着产品需求的不断提升, TI 公司之后又推出了 TMS320F283xx 系列产品,但都是基于 TMS320F28335 架构进行拓展的;不管是高主频的 TMS320C28346,还是双核的 TMS320F28377,都与 TMS320F28335 内部结构类似。因此,只要掌握了 TMS320F28335,那么之后的 TMS320F283xx 系列在使用上都是大同小异。

随着操作系统的不断更新,近两年 TI 公司也在不断升级 DSP 集成开发环境 CCS,升级过程中出现了各个版本 CCS 与各类操作系统、各个版本的 DSP 烧写仿真工具使用上的兼容性问题。于是本书新增一个章节,专门对 DSP 编程开发环境做了详细的介绍,目的就是让开发者少走弯路,事半功倍。

本书共享的资料包括例程、烧写软件工具、配套 PPT、配套视频以及常用的调试工具软件,读者可以在研旭电气提供的 ARMDSP 技术交流论坛([www.armdsp.net](http://www.armdsp.net))相关版块、QQ 技术交流群共享或 [www.f28335.com](http://www.f28335.com) 网站获取。改版过程中因篇幅等原因,部分内容未能选编入册,典型的如 MCBSP、CAN 等应用章节,感兴趣的读者也可以通过以上渠道获取。

本书编写过程中主要参考了 TI 提供的数据手册,这对于芯片应用来说是最权威、最准确的技术资料,建议读者在使用本书过程中与 TI 资料对照起来理解。同时,本书也参考了互联网上、专业论坛上、网络教学视频中大量的资料,部分资料可能未得以列举,在此对资料的提供者表示感谢;若有相关侵权,可及时提出,定做修改。

在此,感谢所有对本书提供帮助的人员,包括同事、家人、读者等。

由于作者水平、经验、精力有限,书中定有不妥之处,恳请读者和同行批评指正。对于书中存在的问题或需要共同进一步学习和探讨之处,可通过电子邮件联系:[zjq518@vip.qq.com](mailto:zjq518@vip.qq.com)。

作者

2018 年 1 月

# 第1版前言

TMS320F28335 是 TI(Texas Instruments,德州仪器)推出的 32 位浮点数字控制处理器,主频 150 MHz,外设丰富,性价比高,封装多样,广泛应用于电机控制、变频电源、UPS 电源、光伏并网逆变器、风力发电并网变流器、SVC、SVG 类 FACTS 装置、通信、医疗、航空航天等领域,是 TI 推出的 F2812、F2407、F2808 的升级产品,可以有效替代这些 DSP 控制器。TI 作为全球最大的 DSP 供应生产商之一,TMS320 系列 DSP 以强大的控制、信号处理能力以及高性价比的优势、相对易开发的特点,具有极高的市场占有率。南京研旭电气科技有限公司为此推出了系列的配套学习开发板,获得了极高的市场认可,同时不少高校也开始以 F28335 为基础开设 DSP 控制、信号处理、电机控制等相关课程,本书就是为这些学习者提供入门级的引导。

TI 提供了权威的、详细的数据手册,但是英文版的资料妨碍了初学者的深入理解。研旭电气提供了学习板卡以及数据手册,但是原理叙述不够全面。目前也有 F28335 参考书籍,但版本尚少,或有模块欠缺,或实践欠缺。本书在研旭 DSP 工程师开发使用经验的基础上,博众家之长,历经两年编写而成。书中详细阐述了 F28335 处理器内部各功能模块的硬件结构、工作原理、资源分配、功能特点以及应用等内容,同时每个模块都配上了实验教程,希望能对读者有所帮助。本书共享的资料包括例程、烧写软件工具、配套 PPT、配套视频以及常用的调试工具软件,可以在研旭电气提供的 ARMDSP 技术交流论坛([www.armdsp.net](http://www.armdsp.net))相关版块、QQ 技术交流群共享或 [www.f28335.com](http://www.f28335.com) 网站获取。

全书共 17 章,由张卿杰、徐友、左楠、卞康君编写,其中,第 15 章由南京农业大学工学院张橙宇编写,第 16 章由南京航空航天大学曹瑞武编写,第 14 和第 17 章由安徽大学丁石川编写,南京研旭电气工程师陈晋、徐伟、褚嵩参与了大量的素材提供、文字翻译、校对等工作,最终全书由张卿杰统稿、修订。

本书编写过程中,作者们参考了互联网上、专业论坛上、网络教学视频中很多的资料,并没有得一一列举,在此对资料的提供者表示感谢,若有相关侵权,可及时提出,定做修改。在此,还要感谢南京农业大学工学院电气系尹文庆教授、沈敏霞教授以及电气系众多同事的关怀、鼓励与支持,也要感谢我的导师东南大学博士生导师陆广香教授、夏安邦教授、花为教授的谆谆教导,循循善诱,还要感谢我的母亲、妻子、妹妹、岳父、岳母给我的关爱、鼓励和支持。最后,感谢所有关心南京研旭电气科技有限



公司发展的用户、朋友、合作者,有了他们的支持,才会有本书更具体的意义。

由于作者水平、经验、精力有限,书中定有不妥之处,恳请读者和同行批评指正,对于书中存在的问题或需要共同进一步学习和探讨之处,可通过电子邮件联系: zqj518@vip.qq.com。

作者

2014 年 12 月于南京农业大学工学院



# 目 录

<b>第 1 章 初识 DSP</b> .....	1
1.1 DSP 前世今生 .....	1
1.1.1 混沌之初——硅谷之父 肖克莱 .....	1
1.1.2 硅谷摇篮——仙童沉浮“硅谷 8 叛逆” .....	6
1.1.3 硅谷之外——德州仪器 杰克·基尔比 .....	10
1.2 DSP 的发展与应用 .....	12
1.3 如何成为一名优秀的 DSP 工程师 .....	24
<b>第 2 章 DSP 编程开发环境</b> .....	25
2.1 CCS 集成开发环境与开发流程 .....	26
2.2 CCS 集成开发环境搭建主要步骤 .....	28
2.2.1 CCS6.1 安装 .....	28
2.2.2 仿真器驱动识别 .....	32
2.2.3 CCS6.1 建立目标板配置文件 .....	33
2.2.4 目标板连接 .....	35
2.3 CCS 的基本操作 .....	39
2.3.1 CCS 中常用文件名和应用界面 .....	39
2.3.2 导入工程 .....	40
2.3.3 工程编译 .....	43
2.3.4 下载并运行程序 .....	45
2.3.5 常用断点设置 .....	45
2.3.6 显示图形 .....	46
2.4 TMS320X28xx 的 C/C++ 编程 .....	48
2.4.1 传统的宏定义方法 .....	48
2.4.2 位定义和寄存器文件结构方法 .....	48
2.4.3 COFF 文件格式与模块化编程 .....	52
2.4.4 链接命令文件 CMD 编写 .....	52



第 3 章 芯片资源 .....	57
3.1 封装信息 .....	57
3.2 F28335 内核主要特点 .....	58
3.3 与 F2812 的性能对比 .....	62
3.4 引脚分布及引脚功能 .....	63
第 4 章 时钟电路及系统控制 .....	78
4.1 时钟源与锁相环电路 .....	78
4.2 系统控制及外设时钟 .....	80
4.3 看门狗电路 .....	81
4.4 时钟单元相关寄存器 .....	83
4.5 手把手教你应用看门狗 .....	90
第 5 章 存储器及其地址分配 .....	93
5.1 存储空间的配置 .....	93
5.2 存储器特点 .....	95
5.3 代码安全模块 CSM .....	99
5.4 外部存储器接口 XINTF .....	103
5.5 手把手教你访问 F28335 外部 SRAM .....	115
5.6 手把手教你访问 F28335 片外 FLASH .....	119
第 6 章 中断系统及应用 .....	126
6.1 概 述 .....	126
6.2 3 级中断机制 .....	128
6.3 中断向量 .....	131
6.4 中断操作 .....	139
6.5 中断相关寄存器 .....	143
6.6 手把手教你应用定时器中断 .....	148
6.7 手把手教你应用按钮触发外部中断 .....	155
第 7 章 通用数字量输入/输出 GPIO .....	158
7.1 GPIO 工作原理 .....	158
7.2 GPIO 寄存器以及编程 .....	161
7.3 手把手教你实现基于 F28335 GPIO 的跑马灯实验 .....	167



<b>第 8 章 增强型脉宽调制模块 ePWM</b> .....	170
8.1 PWM 控制基本原理 .....	170
8.2 PWM 结构及组成单元 .....	172
8.3 时基模块 TB .....	176
8.4 计数比较模块 CC .....	182
8.5 动作模块 AC .....	185
8.6 死区产生模块 DB .....	193
8.7 斩波模块 PC .....	196
8.8 错误联防模块 TZ .....	200
8.9 事件触发模块 .....	201
8.10 PWM 模块寄存器 .....	205
8.11 手把手教你实现 PWM 输出 .....	222
8.12 高精度脉宽调制模块 HRPWM .....	225
<b>第 9 章 增强型脉冲捕获模块 eCAP</b> .....	236
9.1 脉冲捕获基本原理 .....	236
9.2 增强型 CAP .....	237
9.3 捕获单元的 APWM 操作模式 .....	237
9.4 捕获操作模式 .....	239
9.5 CAP 寄存器 .....	244
9.6 手把手教你实现 CAP 捕获信号发生器信号边沿 .....	250
9.7 手把手教你实现 CAP 捕获 PWM 信号边沿 .....	252
<b>第 10 章 增强型正交编码模块 eQEP</b> .....	257
10.1 正交编码器 QEP 概述 .....	257
10.2 增强型正交编码模块 eQEP 概述 .....	261
10.3 正交解码单元 QDU .....	262
10.4 位置计数和控制单元 PCCU .....	266
10.5 位置比较单元 .....	270
10.6 边沿捕获单元 .....	272
10.7 看门狗电路 .....	274
10.8 定时器基准单元 .....	275
10.9 中断结构 .....	275
10.10 寄存器 .....	276
10.11 手把手教你实现基于 eQEP 的电机测速 .....	286



<b>第 11 章</b>	<b>ADC 转换单元</b>	290
11.1	A/D 转换基本原理	290
11.2	ADC 转换模块	292
11.3	ADC 的排序器操作	294
11.4	ADC 的时钟控制	308
11.5	ADC 电气特性	309
11.6	ADC 单元寄存器	312
11.7	手把手教你实现片内 A/D 数据采集	320
<b>第 12 章</b>	<b>直接存储器访问模块 DMA</b>	325
12.1	DMA 模块概述	325
12.2	F28335 的 DMA 模块	326
12.3	F28335 的 DMA 模块的寄存器	338
12.4	手把手教你实现 DMA 传输数据	348
<b>第 13 章</b>	<b>串行通信 SCI</b>	351
13.1	串行通信基础知识	351
13.2	F28335 的 SCI 模块	352
13.3	F28335 的 SCI 相关寄存器	364
13.4	手把手教你实现 SCI 数据收发	372
<b>第 14 章</b>	<b>高速同步串行输入/输出端口 SPI</b>	378
14.1	SPI 概述	378
14.2	F28335 的 SPI 模块	379
14.3	SPI 寄存器	385
14.4	手把手教你实现 SPI 数据自发自收	394
<b>第 15 章</b>	<b>串行通信 I<sup>2</sup>C</b>	397
15.1	I <sup>2</sup> C 总线概述	397
15.2	F28335 的 I <sup>2</sup> C 总线	404
15.3	F28335 的 I <sup>2</sup> C 总线操作	406
15.4	F28335 的 I <sup>2</sup> C 寄存器	414
15.5	手把手教你实现 I <sup>2</sup> C 数据传送	427
<b>第 16 章</b>	<b>引导模式和程序 BOOT ROM</b>	434
16.1	BOOT ROM 简介	434

16.2 DSP 的引导过程 .....	437
16.3 FLASH 引导及应用 .....	447
<b>第 17 章 基于 F28335 的 <math>\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}</math> 移植 .....</b>	<b>452</b>
17.1 嵌入式实时操作系统的基本概念 .....	453
17.2 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 概述 .....	453
17.3 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 在 F28335 上移植及应用 .....	456
17.4 手把手教你实现 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 在 F28335 上的应用 .....	461
<b>第 18 章 基于 F28335 的无刷直流电机控制应用 .....</b>	<b>465</b>
18.1 无刷直流电机及其控制器概述 .....	465
18.2 无刷直流电机控制基本原理 .....	467
18.3 无刷直流电机驱动电路设计 .....	475
18.4 程序演示 .....	481
<b>参考文献 .....</b>	<b>483</b>

# 第1章

## 初识 DSP

### 1.1 DSP 前世今生

在正式介绍 DSP 之前,下面以 3 段故事开始,“鉴于往事,有资于治道”。

#### 1.1.1 混沌之初——硅谷之父 肖克莱

##### (1) 良好的启蒙教育——赢在起跑线

肖克莱于 1910 年 2 月 13 日生于英国伦敦,自幼就接受过良好的启蒙教育。读初中期间,肖克莱深受好友的父亲——斯坦福大学物理系教授、X 射线领域专家罗斯(P. Ross)的影响,并被其收为义子。1936 年获麻省理工学院固体物理学博士学位。

##### (2) 先有伯乐,而后有千里马

博士毕业后,1936 年 6 月即被贝尔基础研究部主任凯利邀请加盟贝尔,并被凯利委以重任,担任电子管部门负责人。由于当时电子管存在着启动需要预热时间,以及能耗大、散热难、寿命短等不足,故凯利很早就产生了另辟蹊径,研制固体放大器以替代电子管的想法。

##### (3) 点接触晶体检波器的解释

第二次世界大战中美国的很多科研机构都投向了军事技术,贝尔也不例外。第二次世界大战结束后,凯利带着肖克莱等人前去拜访贝尔实验室的同事、超短波无线电通讯专家、P-N 结光生伏打效应的发现者奥尔(R. Ohl)。会面时,奥尔展示了一台无线电接收机,该接收器使用点接触晶体检波器作为信号放大器。尽管这种放大器非常粗糙,且性能极不稳定,但奥尔用其制作成无线电接收机,这仍是了不起的创举。凯利当时希望肖克莱发挥其固体物理学理论专长给奥尔的放大器做出一个合理的解释。

受奥尔演示实验的影响,肖克莱开始清理战前的研究思路,重新思考固体放大器问题。他认为,战时其好友塞茨(F. Seitz)等人在参与开发雷达用晶体检波器时已经掌握了制取超高纯硅晶体的方法,并能将硼和磷掺入其中,制造出具有较好导电性能的 P 型半导体和 N 型半导体,这应该成为固体放大器的新的研究起点。依据量子力学理论,肖克莱勾画出了 P 型和 N 型硅半导体的能带和能级图;并对这些能带、能级在外部强电场的作用下可能的变化情况进行了分析。之后,肖克莱意识到这一系统

也许可以用于放大器的设计。肖克莱的想法是,如果半导体内的诱导电荷是可移动的载体,那么,在硅片做得足够薄的情况下,给平行于硅片表面的电极板施加电压后,硅片内的电子或空穴便会在电场的作用下涌向硅片的表面,从而使硅片的导电性获得改善。这种利用空间场效应设计放大器的思想形成后,肖克莱便开始尝试用实验来验证自己的设想。然而,无论怎么努力,当初的设想都无法获得确证。

#### (4) 点接触晶体管的诞生

1945年7月,升任贝尔执行副总裁不久的凯利宣布,重新组建物理部门下属研究机构,由肖克莱和化学家摩尔根(S. Morgam)领导固体物理组,该组下设半导体和冶金两个研究小组,分别负责器件和材料的研究开发,并明确由肖克莱兼任半导体研究小组组长。研究小组成立后不久,肖克莱在贝尔的一些伙伴——实验物理学家布拉顿(W. H. Brat-tain)和皮尔逊(G. L. Pearson)、物理化学家吉布尼(R. Gibney)和电路专家穆尔(H. Moore)等人便先后加盟半导体研究小组。在肖克莱的推荐下,同年10月凯利又以高薪为半导体研究小组引进了精通固体物理的杰出理论物理学家巴丁(J. Bard-een)。

巴丁加盟贝尔后不久,肖克莱便带着困惑同他谈起自己的“场效应放大器”实验。巴丁对上司肖克莱早期的空间场效应思想未得到确证的问题颇感兴趣,经过一段时间的冥思苦想后,提出了“表面态理论”。巴丁认为,在肖克莱使用N型半导体进行的空间场效应实验中,由于半导体内部自由的额外电子来到表面时被捕获,形成了严密的屏蔽层,致使电场难以穿透到半导体内部,从而使半导体内部的电荷载流子的行为免受影响,而负电荷载流子被紧紧地束缚在半导体表面上的结果是,肖克莱预言的电场中的半导体导电性会增强的现象观测不到。听取巴丁汇报完自己的猜想后,早年曾从事过表面态问题研究的肖克莱鼓励他对表面态问题进行深入探索。于是,此后的一段时期,半导体研究小组将研究重点由场效应放大器的研制转向了半导体基础理论问题——表面态的研究。因为表面态问题不弄清楚,场效应放大器的实验设计就无法人手。

经过一年多反反复复的实验,半导体研究小组的表面态研究在1947年9月取得了重大进展,研究小组确认表面态效应确实存在。进一步研究后发现,在电极板与硅晶体表面之间注入诸如水之类的含有正负离子的液体,加压后会使得表面态效应获得增强或减弱。因为在电极的作用下,正离子或负离子会向硅晶体表面迁移,进而增强或减弱那儿的电荷载流子的浓度。当给电极施加足够的负电压后,硅晶体表面被束缚的负电荷就会同电解质中的正离子发生中和,这样,外加电场便可对硅晶体内部产生作用。表面态效应长期以来一直是导致场效应放大器实验失败的主要原因,其作用机理明确之后,设计、试制半导体放大器的一个重大障碍便被排除了。

1947年11月21日,巴丁向布拉顿提出了着手进行半导体放大器研制实验的建议。巴丁的实验设想是,将一涂有绝缘层的金属的尖端刺到硅片上,形成点接触,并在其周围注满电解质,然后通过调节加在电解质上的电压来改变点接触下方硅晶体

的导电性能,从而控制流经硅片与金属的电流。二人当天便按此思路进行了实验,并在输出回路中观测到了微弱的放大电流信号。接下来的实验虽然又取得了一些进展,但也遇到了一些难题。主要是他们的放大装置几乎没有电压增益以及只能在小于 10 Hz 的超低频范围内工作,而实用放大器必须能够放大数千赫兹的输入信号。1947 年 12 月 8 日,肖克莱与巴丁、布拉顿等人开会就实验中所遇问题的解决方案进行了讨论。巴丁提议用耐高反向电压的锗晶体取代硅晶体试一试。当天下午,巴丁与布拉顿使用锗晶体进行实验时发现,随着给硼酸脂液滴施加的负电压值的增大,电路中的反向电流也随之明显增大,而且他们还观察到输出信号的电压也随之成倍增加。两天后,布拉顿用一个特制的耐高反向电压的锗晶体做重复实验时发现,功放系数虽有较大程度的提升,但响应频率并没有获得改善。布拉顿认为,这也许是因为电解质的响应频率具有滞后性之故。因此,接下来需要做的就是如何摆脱电解质的滞后影响了。

1947 年 12 月 11 日,吉布尼提供了一个表面生成了氧化层(旨在替代电解质)的 N 型锗片,吉布尼在氧化层上面沉积了 5 个小金粒。布拉顿在金粒上面打了一个小洞,用钨丝穿过小洞和氧化层插入锗晶体作为一个电极,希望通过改变金粒块和锗晶体之间的电压以改变钨丝电极与锗晶体之间的导电率。布拉顿在做实验时发现,金粒与锗晶体之间的电阻很小,二者几乎形成短路,即氧化层没有起到绝缘的作用。而当布拉顿在金粒和钨丝电极加上负电压后发现,没有任何输出信号。在操作过程中,布拉顿不小心将钨丝和金粒短路,致使第一个金粒烧毁。12 月 12 日,布拉顿在分析实验失败的原因时意识到,可能是由于沉积金粒前曾用水冲洗过锗晶片,致使锗晶体上面的氧化膜一起被冲走,从而造成金粒与锗晶体之间的短路。布拉顿决定在抛弃只剩下 4 个金粒的锗片前再试一试。他将钨丝电极移到金粒的旁边,碰巧在钨丝上加了负电压,在金粒上加了正电压,没有料到输出端出现了和输入端变化相反的信号。初步测试的结果是:电压放大倍数为 2,上限频率可达 10 kHz。这意味着无需在锗晶体表面特意制作一层氧化膜,简单地让金粒和锗晶体表面直接接触就可获得良好的响应频率。

理论物理学家巴丁敏锐地意识到金粒与锗晶体的接触界面上已经出现了一种新的、与加电解质完全不同的物理现象。巴丁认为,在金粒电极加正电压后,注入锗晶体表面的应该是空穴,而此时流经钨丝与锗晶体之间的电流是反向的,那么随着钨丝触点与金属电极之间距离的缩小,流经钨丝与锗晶体之间的电流应该会相应增大。也就是说,实验的关键是尽可能地使锗晶体表面上的钨丝触点与金属电极靠得近一点。巴丁推算后指出,两者之间的距离应达到 50  $\mu\text{m}$  的数量级。这对实验物理学家布拉顿来讲不是难事。他和技师很快就制作出了一套符合巴丁要求的实验装置,并于 12 月 16 日下午,与巴丁一起进行了改进后的首次实验。在这次实验中,他们获得了 1.3 倍的输出功率增益和 15 倍的输出电压增益。因此,有学者主张应该将这一天确定为晶体管的发明日。



一周后的 12 月 23 日,肖克莱领导的半导体研究小组使用含有这种新发明的固体放大器的实验装置为贝尔的主管领导演示了音频放大实验。这是一次没有使用电子管的音频放大实验。实验如人们期待的那样获得了成功。后来,贝尔将这种固体放大器命名为 transistor。由于这种晶体管主要由两根金属丝与半导体进行点接触而构成,故被称为点接触晶体管。

### (5) 多项晶体管技术的发明

肖克莱半导体研究小组在点接触晶体管上取得的突破着实让人感到高兴,但肖克莱却并不是这项突破性研究工作的主角,更令他难堪的是他竟然不能被列入点接触晶体管专利发明人名单。原因主要有两个:一是尽管他是半导体研究小组的负责人,但他并没有直接参与有关点接触晶体管发明的后期关键性实验;二是早在 20 年前就有人提出了内容与肖克莱的场效应思想相近的专利申请,并于 1930 年获得了批准,故不能再将场效应思想作为专利申请书的基本内容。肖克莱为此感到沮丧,但他并没有因此而气馁。在此后的一段时间里,除半导体之外,肖克莱几乎别无所思,甚至是除夕夜都不例外。

经过一段时间的思考之后,肖克莱于 1948 年 1 月 23 日想出了在半导体中加一个调节阀的方法。即设计一种类似于三明治结构的晶体管,这种晶体管最外两层使用性质相同的半导体材料,中间夹层使用性质完全相反的半导体材料,3 根导线分别与各层相连。这样人们便有可能通过给中间薄层施加不同的电压来调控由其中的一个外层流向另一个外层的电子或空穴的流量。由于这个中间薄层的功能与自来水道中的阀门相似,故肖克莱把这种器件称为“半导体阀”。显然,这个中间薄层的功能与肖克莱的“场效应放大器”中的电极板相似,只是一个被平行地置于半导体表面之外,一个被拦腰置于半导体之中罢了。这种“半导体阀”的一个明显优点是,3 根导线和半导体层都采用结连接。因此,可克服点接触晶体管具有的对振动过于敏感、性能不稳定等缺点。

三明治结构的结型晶体管的构想提出来了,接下来摆在肖克莱面前的问题就是,如何从理论上确认其是可行的以及如何用实验验证其可行性。理论解释上,存在两个关键点:一是必须确认电子和空穴可以在 N 型和 P 型半导体内部流动;二是必须把 P-N 结的作用机理先弄清楚。至于实验验证则主要是如何用高纯度半导体材料制作出具有 3 层结构的结型放大器,并确保导线能够与各层相连。

点接触晶体管发明之后,巴丁和布拉顿对其作用机理进行了一系列研究。他们的研究结论是,电子和空穴是沿着半导体反转层表面流动的。至于电子和空穴是否可以在半导体内部流动则不得而知。

1948 年 7 月,半导体研究小组的新成员海恩斯(R. Haynes)用实验证明 N 型锗晶片上的空穴不仅仅沿着晶体表面流动,其中的大部分实际上是通过晶体内部穿过去的。显然,这个结论部分地支持了肖克莱的结型晶体管构想。接下来的问题就是弄清 P-N 结的作用机理。

P-N 结的存在早在 1940 年前后就已被贝尔的斯卡夫(J. H. Scaff)等人发现,但由于战时高纯度的硅和锗不易入手,而且即使有也因掺入杂质不易控制而很难制成合适的 P-N 结,故对 P-N 结的研究进展不大。1949 年,研究小组的物理化学家斯帕克斯(M. Sparks)将溶化了的 P 型锗晶液体滴滴到炽热的 N 型锗晶片上让其融合后形成了 P-N 结。对这种 P-N 结进行实验研究后,斯帕克斯于当年 4 月确认可以使用 P-N 结实现功率放大。

受这些研究的鼓舞,肖克莱加快了对 P-N 结以及基于 P-N 结的晶体管的研究进程,并于 1949 年 7 月分别在《物理评论》和《贝尔系统技术杂志》上发表了题为《流经 P-N 结的电流》和《半导体的 P-N 结理论及 P-N 结晶体管》的论文。在论文中,肖克莱指出,在 P-N 结的两侧,载流子会由浓度高的一侧向另一侧扩散,并与另一侧的异性载流子结合形成电流。在论文的最后部分,他还公开了一年半前形成的由两个背靠背的 P-N 结组成的晶体管设想,并认为它在理论上具有可行性。

尽管理论研究表明结型晶体管具有可行性,但是实际制作这种晶体管却遇到了很多困难。经过物理化学家蒂尔(C. Teal)等人的艰苦努力,1950 年初,总算用单晶生长技术直接从熔晶中制作出 P-N 结。其后,蒂尔与斯帕克斯紧密合作,终于于 1950 年 4 月中旬借助拉晶机,使用双掺杂技术,制成了第一只 N-P-N 型晶体管。经检测,这只晶体管具有信号放大功能,但它的响应频率远低于点接触晶体管的工作频率。进一步分析后得知,问题出在中间层太厚。可是将中间层做薄后导线又很难焊接上去。尽管如此,肖克莱仍为这一重大研究进展的取得而感到十分高兴。

结型晶体管问世后不久,朝鲜战争便爆发了。肖克莱很快便为结型晶体管找到了用处,那就是用其制作迫击炮炮弹的近爆电子引信,以增强对地面部队的杀伤力。军方的需求刺激小组成员对结型晶体管进行了一系列改进。至 1951 年初,除响应频率外,结型晶体管的性能几乎在每一个方面都超出了点接触晶体管。

结型晶体管问世后,肖克莱并没有陶醉在取得重大突破的喜悦之中,仍以饱满的热情从事着他的晶体管研究。他将结型晶体管的原理与自己早期提出的场效应理论结合起来思考,1952 年正式提出了单极场效应晶体管的构想。不到一年,肖克莱的合作者戴西(C. C. Dacey)和洛斯(L. M. Ross)便将此一构想成功地转化为现实,制作出了第一个结型场效应晶体管。

## (6) 下海创业,硅谷播火种

1954 年 2 月,肖克莱决定暂时离开贝尔,到加州理工学院担任客座教授。离开贝尔的主要原因是在 1951 年贝尔人事大调整中,过去的部下有不少获得了升迁,一些人甚至还变成了他的领导,而他这位新当选的美国国家科学院最年轻的院士仍然只是研究小组的负责人。贝尔管理层认为肖克莱虽是一位出色的科研带头人,但不适宜担任行政管理职务。因为其管理方式过于简单,很多人都不愿意与他共事。巴丁离开了,布拉顿也转投到了贝尔的其他部门。此外,在晶体管专利使用费分配问题上贝尔对他的贡献也没有给予足够的尊重。在加州理工学院执教 4 个月后,肖克莱

发现这里并不尽如人意。于是,他于 1954 年 7 月接受军方的邀请,到华盛顿担任了国防部武器系统鉴定组副组长。干了不到一年,他又觉得没有太大的意思。1955 年 7 月,肖克莱辞去了国防部的工作,并决定不再回贝尔搞科研,而去“下海”创办高科技公司。

在加州理工学院的老同学贝克曼(A. O. Beck - man)的资助下,以及在斯坦福大学校长特曼(F. Terman)的鼓动下,肖克莱筹备一段时间后,于 1956 年 2 月在旧金山的海湾地区正式创办了肖克莱半导体实验室,并因此而被称为硅谷的奠基人之一。凭着自己在电子工业界的威望,肖克莱很快便从美国各地招聘来了一批从事半导体研究开发的精英。当年 6 月,肖克莱指定年仅 29 岁的物理学家诺伊斯(R. Noyce)负责一个 8 人研发小组,这个小组的故事就是本章的第 2 个故事。

### 1.1.2 硅谷摇篮——仙童沉浮“硅谷 8 叛逆”

#### (1) 8 个天才的叛逆——“硅谷模式”、仙童降生

“叛逆!你们这群叛逆!”

1957 年的一天,肖克莱在接到包括罗伯特·诺伊斯、戈登·摩尔等 8 位年轻学者的辞职信时,勃然大怒,把他们臭骂了一顿。年轻人面面相觑,但还是义无反顾地离开了他们曾经的“伯乐”,离开了肖克莱半导体实验室。怒气未平的肖克莱后来接受媒体采访时,口气稍微改了一下,把此事称为“8 个天才的叛逆”。这 8 个天才分别是:诺伊斯(N. Noyce)、摩尔(R. Moore)、布兰克(J. Blank)、克莱尔(E. Kliner)、赫尔尼(J. Hoerni)、拉斯特(J. Last)、罗伯茨(S. Roberts)和格里尼克(V. Grinich)。

肖克莱是天才的科学家,却缺乏经营能力;他雄心勃勃,但对管理一窍不通。特曼曾评论说:“肖克莱在才华横溢的年轻人眼里是非常有吸引力的人物,但他们又很难跟他共事。”一年之中,实验室没有研制出任何象样的产品。8 位青年瞒着肖克莱开始计划出走。

1956 年 12 月,肖克莱获得了诺贝尔奖后,肖克莱对年轻学者们的态度更让人无法承受。实验室里气氛异常压抑,知情人后来回忆说,肖克莱获奖后的数月内,实验室像一个精神病院。不满情绪在酝酿,包括摩尔在内的 8 个人串联出走,自行创业,后来成为这个“叛逆”小组领头羊的诺伊斯是最后一个加入的,这又埋下了下一场“叛逆”的伏笔。

这个小组向一家投资公司发去一封信,这也是最初的创业融资计划书,整封信只有一页纸,主要内容是“我们这个团队经验丰富,技能多样,精通物理学、电子学、工程学、冶金学和化学领域”,并表示他们会在半导体领域开展业务。这封信辗转到了仙童照相和仪器公司的老板谢尔曼·费尔柴尔德手中。当“8 叛逆”向他寻求合作的时候,已经 60 多岁的费尔柴尔德先生刚开始仅仅提供了 3 600 美元的种子基金,要求他们开发和生产商业半导体器件,并享有两年的购买特权。于是,“8 叛逆”创办的企业被正式命名为仙童半导体公司,“仙童”之首自然是诺伊斯。成功远没述说的简单