

# 第1章 概述及目的

*“The world, as we all know, is analog”*

—Seen outside teaching assistant's office in the 5th floor lab, MIT building 38, mid-1980s

本章概述本书的基本原理和典型范围。简短介绍晶体管的发展历史、模拟集成电路(IC)的发明和运算放大器的优势。

## 1.1 模拟设计者的需求

近些年，“数字化”趋势很明显——换句话说，由于灵活性的需要，在数字领域出现了越来越多的数字信号处理过程。而世界还是模拟的，而且利用模拟处理可以把电子线路和物理世界连接起来。这里不讨论数字信号处理(DSP)和其他数字技术的重要性，许多模拟单元电路诸如运算放大器、晶体管放大器、比较器、模数(A/D)和数模(D/A)转换器、锁相环及基准电压(很少)等都还在使用，且未来还会一直用下去。因此，在发展过程中一直需要学习模拟电路设计基本的和先进的原理。

进行模拟电子线路设计的原因之一是它很有趣，它包括很多不同学科。下面有部分“清单”，不按照特殊的顺序，根据模拟电路设计的范围确定的学科如下所示。

- **模拟滤波器**：分立或梯形滤波器、有源滤波器、开关电容滤波器及石英滤波器。
- **音频放大器**：功率运算放大器和输出(话筒)级。
- **振荡器**：包括LC、石英、张弛和反馈振荡器；锁相环和图像解调器。也可以包括自激振荡器这一类，例如在高频时可以振荡的射极跟随器。
- **器件制造及其物理特性**：金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)、双极型晶体管、二极管、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、硅控制的整流器(SCR)、金属-氧化物半导体(MOS)控制的晶闸管等。
- **集成电路制造**：运算放大器、比较器、基准电压、锁相环(PLL)等。
- **模数(A/D)接口**：A/D和D/A、基准电压。
- **射频电路**：射频放大器、滤波器、混频器及传输线路、电视。
- **控制**：控制系统的设计及补偿、伺服系统级速度控制。
- **能量电子学**：该领域需要了解MOSFET驱动器、控制系统设计、个人计算机(PC)电路板布线及温度和磁场理论；电机驱动器，以及晶体管、MOSFET、IGBT和SCR器件的制造。
- **医疗电子学**：仪器(心电图和核磁共振源)、心脏除颤器和植入式医疗器件。
- **仿真**：SPICE和其他电路仿真器。
- **印刷电路板布线**：需要了解电感和电容效应、接地、屏蔽及印刷电路板设计规则。
- **电路设计的应用**：利用机械、磁场、热或声学“电路”来对系统性能进行建模。

因为我们的生活中出现了越来越多的数字处理过程,所以模拟设计较之数字处理概念必须变得非常方便才能一起工作。在数字世界中,有些分系统设计是基于模拟而言的。在设计数字滤波器时,必须首先设计一个模拟原型,然后通过 A/D 转换将之转换到数字域。例如,在  $s$  域(模拟,利用电感、电容和/或有源器件)设计滤波器时,可以利用双线性转换将滤波器变换到  $z$  域(数字,利用增益和延时器件)。

该技术主干在某种程度上来说,设计者在模拟域进行滤波时一般更方便工作。设计一个二阶模拟巴特沃思滤波器(可以在很多参考书或模拟滤波器手册中找到)很容易,但是,在数字域中实现就需要更多的步骤或其他仿真工具。

而且在非常高的频率时,必须把印刷电路板上的数字传输线路或高速信号看成是电压和电流的行波分布式模拟系统。随着数字 IC 的密度增加和开关速度越来越快,好的印刷电路板设计的挑战也在增加,这是因为需要额外的电源和其他要求,例如接地反冲。

下面是数字设计者也需要知道的有关模拟设计的有关知识。

## 1.2 模拟集成电路技术优势的早期历史

半导体器件的时代可以大约追溯到 Julius Lilienfeld 博士,他在多种 MOS 结构方面有几个美国专利(见图 1.1)。在其中 3 个专利中,他给出了 MOSFET、金属-半导体场效应晶体管(MESFET)和其他 MOS 器件的结构。

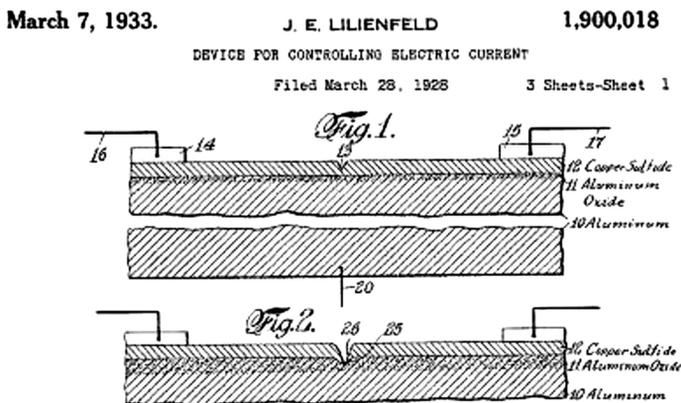


图 1.1 引自 Lilienfeld 博士的美国专利#1900018<sup>①</sup>(1933 年)

50 多年以前进入了双极型晶体管半导体时代,早期的工作是固态物理和双极型晶体管的发明,以及模拟电路设计的显著技术优势和现在还在用的器件制造。在 1947 ~ 1948 年间,Bardeen、Brattain 和 Shockley 给出了单极型晶体管(见图 1.2)<sup>②</sup>。

第一批 IC 是在 1959 年前后,由仙童半导体和德州仪器(TI)团队生产的(见图 1.3)。TI 在 1959 年 2 月 6 日由 J. S. Kilby 申请的美国专利“Miniaturized Electronic Circuits”#3138743 中宣布发明了 IC。不久,仙童申请了第一片平面 IC 专利(可查证其制造比 TI 发明更早),具体见

① Lilienfeld 连续有 3 个专利覆盖基本的 MOS 晶体管结构。

② 参见美国专利#2569347,“Circuit Element Utilizing Semiconductive Materials”,1951 年 9 月 25 日授予 William Shockley。Bardeen、Brattain 和 Shockley 因为发现晶体管而获得 1956 年诺贝尔物理学奖。Shockley 在 1956 年 12 月 11 日发表的诺贝尔演讲“Transistor Technology Evokes New Physics”中精彩描述了半导体晶体管的物理特性。

1959 年 7 月 30 日 R. N. Noyce 申请的美国专利“Semiconductor Device and Lead Structure” #2981877<sup>①</sup>。

Sept. 25, 1951                      W. SHOCKLEY                      2,569,347  
 CIRCUIT ELEMENT UTILIZING SEMICONDUCTIVE MATERIAL.  
 Filed June 26, 1948                      3 Sheets-Sheet 1

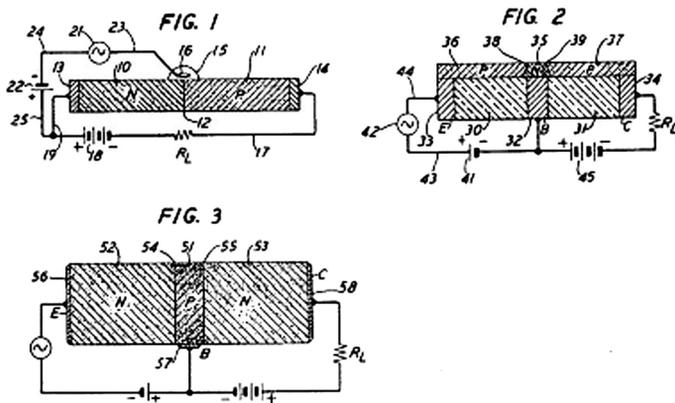


图 1.2 引自 Shockley(肖特基)的美国专利#2569347(1951 年)

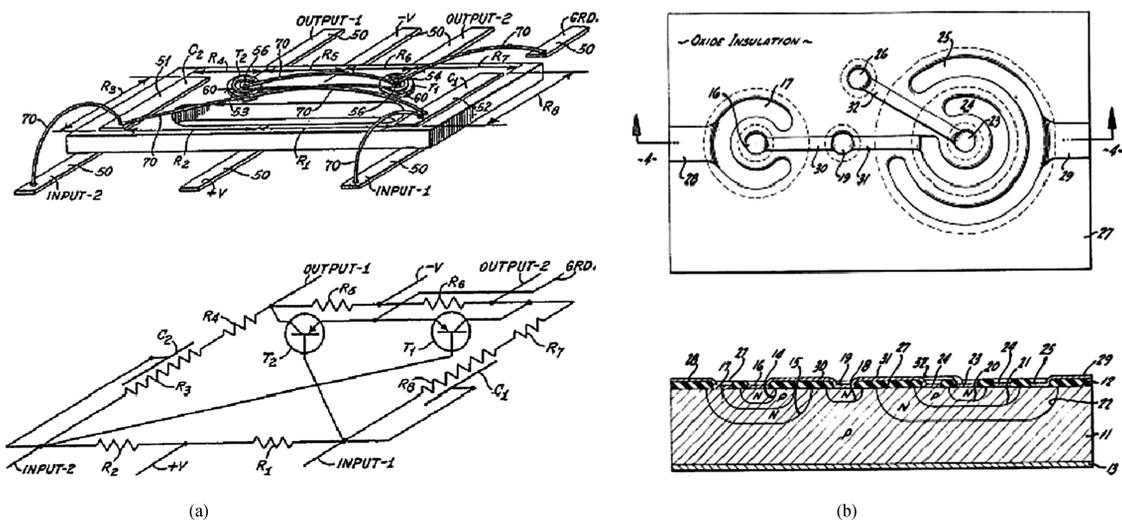


图 1.3 (a)德州仪器公司和(b)仙童半导体公司的 IC 专利竞争框图

这些 IC 最小的几何尺寸约为  $125 \mu\text{m}$ 。从此，随着 IC 的发明和快速改进，器件的尺寸越来越小。以 Fairchild 和 Intel 的奠基者摩尔命名的摩尔定律预测，在 IC 中晶体管封装的密度每 18 个月大约增加 1 倍，这个趋势在过去 30 年中得到了非常准确的验证。

在撰写本书时<sup>②</sup>，IC 制造商正在利用 22 nm 的制造工艺，且预计晶体管的尺寸会越来越

① 完整的文本和图像可以从美国专利局的专利中查到 <http://www.uspto.gov>。

② 第二版，2012 年秋天。注意 1983 年，一个 IC 典型的最小线宽为  $1.5 \mu\text{m}$  (1500 nm)。制造商正在关注更小的门电路的长度。参见 Gordon Moore 的论文“The Role of Fairchild in Silicon Technology in the Early Days of ‘Silicon Valley’”，文中讲述了 Fairchild IC 的发展历史。

小。尺寸越小,就可以在给定的区域内封装越来越复杂的结构。研究人员还积极开展三维 IC 结构工作<sup>①</sup>,试图在一个给定的空间内,集成越来越多的功能器件。

1958~1959 年期间, TI 和仙童半导体的技术人员发明了 IC,之后,在 20 世纪 60 年代中期出现了第一片 IC 运算放大器。第一片商业成功的运算放大器为 Fairchild  $\mu$ A709(1965 年),以及由传说中的模拟才子 Bob Widlar 设计的 LM101(1967 年)<sup>②</sup>。这些器件的偏置电压有几毫伏,单位增益带宽约为 1 MHz,且需要额外的器件进行频率补偿。不久(1968 年),工业上无处不在的第一片有内部补偿的运算放大器 Fairchild  $\mu$ A741 出现,它利用金属氧化物技术,并将一个 30 pF 的补偿电容集成进该芯片。这是一种“插塞式”运算放大器,与 LM101 正相反,因为其补偿电容被加到 IC 内部<sup>③</sup>。与早期的分立设计(例如 Philbrick 设计的 4 级放大器)<sup>④</sup>相比,整片 IC 运算放大器的价格下降了,而性能提高了,从而促成了 IC 运算放大器的不断成功。

从那时起开始设计运算放大器,偏置电压和带宽性能显著改善,并且其他一些性能,如输入电流、转换速率、通用模式范围及类似性能都有改进。20 世纪 70 年代出现了场效应晶体管输入运算放大器,其输入电流比双极型运算放大器的小。新的拓扑学带来电流反馈运算放大器在高速方面的成功应用<sup>⑤</sup>。目前典型的高速运算放大器的带宽可达几百兆赫兹<sup>⑥</sup>。现有的功率运算放大器<sup>⑦</sup>可以为扬声器或其他阻抗或感抗很大的负载提供几安培的负载电流。现在具有亚毫瓦级备用功耗的低功率运算放大器非常常见。现在也有了端到端运算放大器。

这些进步开启了基于模拟信号处理和 DSP 器件的新的应用和制造市场。目前,蜂窝式电话、电缆 TV 和无线网络技术都在驱动射频模拟电路设计和小型手持式功率电子设备事业的发展。低功耗器件可以增加电池供电设计的电池寿命。

### 1.3 数字与模拟的实现:设计师的选择

在许多情况下,与相对简单的模拟电路相比,有些功能在数字域实现起来很难,且成本高,功耗大。接下来举例说明能在模拟域中用几个元件就可实现的功能(不用时钟电路)。

① 参考 Matrix Semiconductor 公司和 Thomas H. Lee 的 Vertical Leap 微芯片公司。

② 早期的  $\mu$ A702 运算放大器是由 Widlar 设计的,1963 年由 Fairchild IC 公司引进,但从未取得商业上的成功。Widlar 回到绘图板上,并且在 1965 年前后设计了 709,这是第一个运算放大器,成本不到 10 美元。他与 Fairchild IC 公司发生工资纠纷后,辞职到了美国国家半导体公司。在那里他设计了 LM101,后来改进设计出 LM101A(1968 年)。关于 LM101 和 709 的细节和历史在本章结尾给出的 Widlar 的论文“Design Techniques for Monolithic Operational Amplifiers”中有描述。

③ 741 不同于以前的运算放大器,如 LM101 和 709,它不需要外部补偿电容。741“即插即用”使用方便,这显然弥补了在大多数闭环应用中增益大于 1 时器件被过度补偿这一事实。更多关于运算放大器的细节在本书的后面章节给出。709、LM101 和 741 运算放大器的细节和历史也在 Walt Jung 的 IC Op - Amp Cook book, 3rd edition, pp. 75 ~ 98 中给出。有很多关于运算放大器外部补偿的精彩讨论在 James K. Roberge 关于运算放大器的经典著作中给出。

④ 例如,Philbrick 的 K2-W 运算放大器用分立元件(真空管!)构成,在 1951 ~ 1971 年出售。它的小信号带宽约 300 kHz,开环增益约 10 000 左右,每个约 22 美元。参见 Bob Pease 的文章“‘What’s all this K2-W Stuff, Anyway?’”。他也做出了 P2,这是一个输入电流很小的分立运算放大器,由少数的晶体管和其他分立元件构成,售价约为 200 美元。参见 Bob Pease 的“The Story of the P2—The First Successful Solid - State Operational Amplifier with Picoampere Input-Currents”,发表于 Jim Williams 编辑出版的 Analog Circuit Design Art Science and Personalities。

⑤ 电流反馈运算放大器不同于标准的电压反馈运算放大器,它没有增益带宽积恒定的限制。

⑥ 参见 National 的 LM6165,其增益带宽积 (GBP) 为 725 MHz,线性技术 LT1818 的 GBP 为 400 MHz,或模拟器件 AD8001 的 GBP 为 600 MHz。

⑦ 还有一个例子是 National 的 LM12,也由 Bob Widlar 设计。他在一篇优秀的 IEEE 论文“A Monolithic Power Op Amp”中讨论了 LM12 的设计,在本章最后给出。LM12 最近被弃用了。

首先考虑对数放大器的设计。对数放大器可以利用数字信号处理器(DSP)的数据表和类似的工具来设计,或者在模拟域中,利用众所周知的双极型晶体管在正向有源区中的基极和发射极之间的电压与集电极电流之间的对数/指数电压电流关系来设计,如下所示:

$$I_C \approx I_S e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} \quad (1.1)$$

$$V_{BE} \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right)$$

这种关系包括许多级晶体管集电极电流幅度。因此,可以利用晶体管的 PN 结来实现一个低成本的对数放大器(见图 1.4)。假设理想晶体管和放大电路的输入输出传递函数为

$$v_o = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{v_i}{RI_S}\right) \quad (1.2)$$

在该电路中,输出电压与输入电压成自然对数比例关系。在数字域中实现需要考虑更多因素。利用同样的原理可以构建模拟乘法器、除法器 and 平方根电路,就像 Barrie Gilbert<sup>①</sup>之前提到过的一样。下面来看如图 1.5 所示电路。图中虚线框内是基极与发射极之间电压的回路,可以利用“跨导线性原理”(本书稍后讨论),因为有一个  $v_{BE}$  回路,所以可以得到各晶体管集电极电流之间的关系为

$$I_{C1}I_{C2} = I_{C3}I_{C4} \quad (1.3)$$

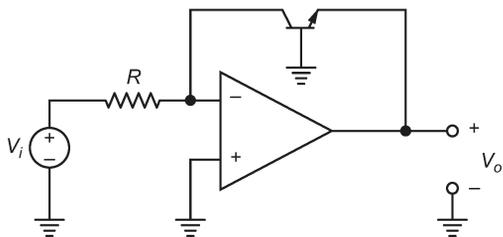


图 1.4 简单的对数放大器

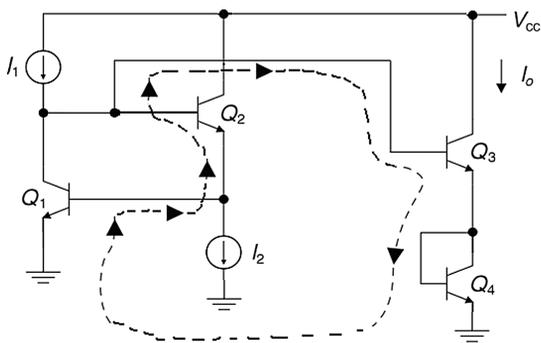


图 1.5 跨导线性电路,虚线表示“Gilbert 循环”,输出电流  $I_0$  等于两个输入电流  $I_1$  和  $I_2$  的乘积的平方根

这意味着输出电流  $I_0$  可以表示为两个输入电流的乘积的平方根:

$$I_0 = \sqrt{I_1 I_2} \quad (1.4)$$

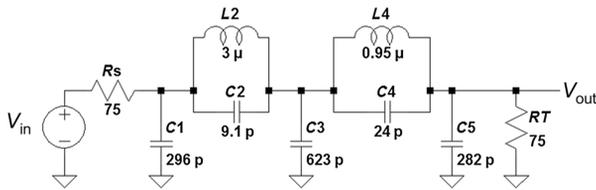
现在考虑截止频率为 5 MHz 的五阶椭圆低通滤波器<sup>②</sup>的设计。这是一个典型的用于抗混淆的规范视频低通滤波器,其中信号的典型模拟带宽约为 5 MHz,系统的 A/D 采样率约为 13.5 MHz。也可以利用方便的分立元件设计这种陡峭的滤波器<sup>③</sup>(见图 1.6)。注意,在这种滤

① 参见 Barrie Gilbert 的最初参考文献,包括“A Precise Four-Quadrant Multiplier with Subnanosecond Response”, IEEE Journal of Solid-State Circuits, December 1968, pp. 365~373。“跨导线性原理”告诉我们如何计算。

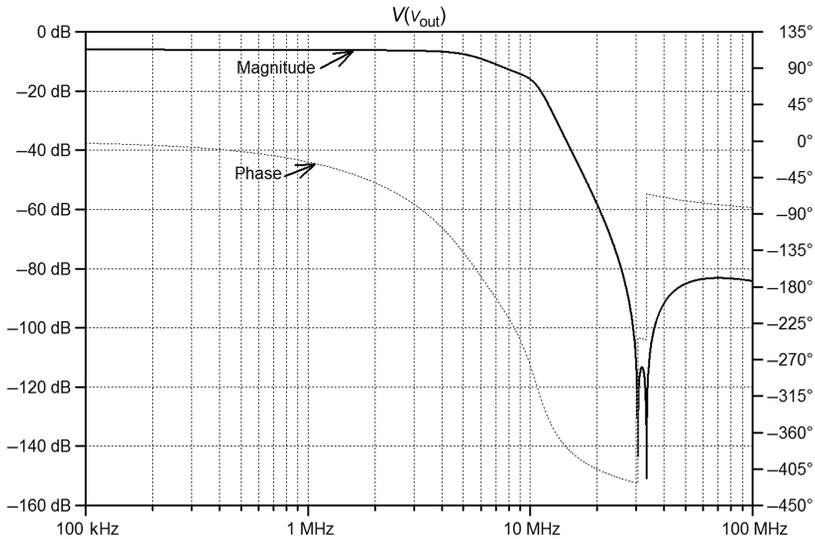
② 可以利用电感来设计模拟滤波器。

③ 椭圆滤波器常用于模拟视频滤波用来抗混淆,其中需要陡峭的传输频带。椭圆和其他梯型滤波器设计以列表形式在 Anatol Zverev 的滤波器合成手册中给出。可以利用电感构建实际的模拟滤波器。由于这种特殊滤波器有 75 Ω 的电阻分压器,故有  $\frac{1}{2}$ (或 6 dB)的衰减。

波器中,信号源的阻抗可以达到  $75\ \Omega$ , 对应于一个典型的视频同轴(BNC)电缆的特性阻抗。而要在数字域中实现就会复杂得多,特别是需要高频截止频率时。



(a) 电路



(b) 频率响应

图 1.6 截止频率为  $5\ \text{MHz}$ ,  $3\ \text{dB}$  的五阶椭圆梯型滤波器。注意,由于信号源的阻抗为  $75\ \Omega$  的电阻分压器,故滤波器的直流(DC)响应为  $6\ \text{dB}$

数字设计师会说,前面的功能可以很容易地由 DSP 提供。他们也许是对的。但很难反驳的事实是,利用一个晶体管和其他元件设计一个动态范围很宽的对数放大器更有效且更好。要用一个电路产生一个时域波形,没有比 555 定时器电路更简单的了,该定时器于 20 世纪 70 年代初出现,40 多年后一直在用。

## 1.4 为什么要成为模拟设计师呢

这个假设问题可能的答案是,在任何给定的模拟设计问题中,没有一个绝对的、独一无二的且正确的或“完美”的设计。事实上,如果你认为自己在模拟域找到了独特、完美的解决方案,无疑就错了。在模拟电路设计领域,要实现某一功能有无限的可能性。对于模拟设计者来说,挑战和最终所得是在一个给定的设计空间中,通过满足成本、尺寸和/或性能约束来满足这些需求的。

## 1.5 本书中的命名法

这里说明一下信号的术语命名。一般来说,运算放大器的晶体管终端电压有一个静态直流(DC)工作点和一个小信号交流变化工作点。本书中晶体管的基极与发射极之间电压的命名法如下:

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \quad (1.5)$$

其中,  $v_{BE}$  (“ $v$ ”小写, “BE”大写) 是整个变量,  $V_{BE}$  (“ $V$ ”大写, “BE”大写) 是静态工作点,  $v_{be}$  (“ $v$ ”小写, “be”小写) 是小信号变化量。

## 1.6 本书的范围

本书只是一个单一的教科书, 不可能涵盖模拟电路设计的所有方面。我试图在本书中提供在现实世界的模拟电路设计中我认为很有用的重要技术、技巧和分析工具的综合。在必要时, 也提供一些数学推导理论技术。在其他领域, 也利用工程技术和仿真给出从一个设计领域到模拟电路设计领域的解决方案“路线图”, 从而避开复杂的数学推导。

其他参考资料, 包括教科书和学术期刊, 都在每一章的最后提供给读者以便进行更深入的探索。作者提供了注解, 包括许多引用的意见。这些是假设读者熟悉拉普拉斯转换、零极点图、伯德图、系统阶跃响应的概念和微分方程的基本理解。本书的第 2 章回顾了这些信号处理的基础知识。在后面章节中要理解更高级的主题时需要这些基础知识。

## 深入阅读

- [1] Analog Devices. *Nonlinear circuits handbook*. Analog Devices; 1976. Good coverage of logarithmic amplifiers and other nonlinear analog circuits.
- [2] Bardeen J, Brattain WH. The transistor, a semiconductor triode. *Phys Rev* 1948;**74**(2):230–1. Reprinted in *Proc IEEE* 1998;**86**(1):29–30.
- [3] Bondyopadhyay P. In the beginning. *Proc IEEE* 1998;**86**(1):63–77.
- [4] Bondyopadhyay P. W = Shockley, the transistor pioneer—portrait of an inventive genius. *Proc IEEE* 1998;**86**(1):191–217.
- [5] Brinkman W, Haggan D, Troutman W. A history of the invention of the transistor and where it will lead us. *IEEE J Solid-State Circuits* 1997;**32**(12):1858–65.
- [6] Brinkman W. The transistor: 50 glorious years and where we are going. In: 1997 IEEE international solid-state circuits conference. Feb 6–8, 1997. pp. 22–6.
- [7] Fullagar D. A new high performance monolithic operational amplifier. *Fairchild Appl Brief* 1968. Description of the 741 op-amp by its designer.
- [8] Jung W. *IC op-amp cookbook*. 3rd ed. SAMS; 1995.
- [9] Kilby J. The integrated circuit’s early history. *Proc IEEE* 2000;**88**(1):109–11.
- [10] Lee TH. A vertical leap for microchips. *Sci Am* January 13, 2002. This note describes Matrix Technologies’ efforts and motivation for producing 3D integrated circuits. Tom Lee was a protégé of Jim Roberge at MIT.
- [11] Manglesdorf C. The changing face of analog IC design. *IEEE Trans Fundam* 2002;**E85-A**(2):282–5.
- [12] Manglesdorf C. The future role of the analog designer. ISSCC 93, session WE3, pp. 78–9.
- [13] Melliar-Smith CM, Borrus MG, Haggan D, Lowrey T, Sangiovanni-Vincentelli A, Troutman W. The transistor: an invention becomes a big business. *Proc IEEE* 1998;**86**(1):86–110.
- [14] Moore G. The role of Fairchild in silicon technology in the early days of “Silicon Valley”. *Proc IEEE* 1998;**86**(1):53–62.
- [15] Moore G. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics* 1965:114–7. The original paper where “Moore’s Law” was first published.
- [16] National Semiconductor. Log converters. National Application Note AN-30.

- [17] National Semiconductor. Linear applications handbook.
- [18] Pearson GL, Brattain WH. History of semiconductor research. *Proc IRE* 1955;**43**(12):1794–806.
- [19] Pease B. What's all this K2-W stuff, anyhow? *Electron Des* 2003.
- [20] Pease B. "The story of the P2—the first successful solid-state operational amplifier with picoampere input currents. In: Williams J, editor. *Analog circuit design: art, science and personalities*. Butterworth-Heinemann; 1991. p. 67–78. A history and description of the K2-W operational amplifier, a discrete op-amp sold in the 50s and 60s by Philbrick, and built with vacuum tubes, and the P2, a discrete-transistor Philbrick operational amplifier.
- [21] Pease R. *Troubleshooting analog circuits*. Butterworth-Heinemann; 1991. We'll miss you, Bob.
- [22] Perry TS. For the record: Kilby and the IC. *IEEE Spectrum* 1988;**25**(13):40–1. Description of the history of Kilby's invention.
- [23] Roberge JK. *Operational amplifiers, theory and practice*. John Wiley; 1975. A classic text on op-amps, now out of print but available in lots of libraries.
- [24] Sah CT. Evolution of the MOS transistor—from conception to VLSI. *Proc IEEE* 1988;**76**(10):1280–326.
- [25] Schaller R. Moore's law: past, present and future. *IEEE Spectrum* 1997;**34**(6):52–9.
- [26] Shockley W. Transistor technology evokes new physics. 1956 Physics Nobel Prize Lecture December 11, 1956. An amazingly interesting and clear description of transistors and transistor physics.
- [27] Shockley W. Transistor electronics—imperfections, unipolar and analog transistors. *Proc IEEE* 1997;**85**(12):2055–80.
- [28] Shockley W. Theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. *Bell Syst Tech J* 1949;**28**(7):436–89.
- [29] Shockley W. Electrons, holes and traps. *Proc IRE* 1958;**46**(6):973–90.
- [30] Siebert WMC. *Circuits, signals and systems*. McGraw-Hill; 1986.
- [31] Small J. General-purpose electronic analog computing: 1945–1965. *IEEE Ann Hist Comput* 1993;**15**(2):8–18.
- [32] Soloman J. A tribute to Bob Widlar. *IEEE J Solid-State Circuits* 1991;**26**(8):1087–9. Tribute and anecdotes about Bob Widlar.
- [33] Sporck C, Molay RL. *Spinoff: a personal history of the industry that changed the world*. Saranac Lake Publishing; 2001.
- [34] Sugii T, Watanabe K, Sugatani S. Transistor design for 90-nm generation and beyond. *Fujitsu Sci Technol J* 2003;**39**(1):9–22.
- [35] United States Patent Office. Website: <http://www.uspto.gov>.
- [36] Warner R. Microelectronics: its unusual origin and personality. *IEEE Trans Electron Devices* 2001;**48**(11):2457–67.
- [37] Widlar RJ. Design techniques for monolithic operational amplifiers. *IEEE J Solid-State Circuits* 1969;**SC-4**(4):184–91. Describes in detail the designs of the 709 and LM101A op-amps.
- [38] Widlar RJ. Monolithic op amp—the universal linear component. National semiconductor linear applications handbook. Application Note no. AN-4.
- [39] Widlar RJ, Yamatake M. A monolithic power op-amp. *IEEE J Solid-State Circuits* 1988;**23**(2). A detailed description of the design and operation of the LM12, an integrated circuit power op-amp designed in the 1980s. Applications of the LM12 are given in National application note AN-446, "A 150W IC Op Amp Simplifies Design of Power Circuits," also written by Widlar and Yamatake.
- [40] Williams AB, Taylor FJ. *Electronic filter design handbook LC, active and digital filters*. 2nd ed. McGraw-Hill; 1988.
- [41] Williams J, editor. *The art and science of analog circuit design*. Butterworth-Heinemann; 1998.

- [42] Williams J. *Analog circuit design: art, science and personalities*. Butterworth-Heinemann; 1991. These books edited by Jim Williams present a potpourri of design tips, tricks, and personal histories by some of the most noteworthy analog designers in the world.
- [43] Zverev A. *Handbook of filter synthesis*. John Wiley; 1967. An excellent overview of analog ladder filter design with special emphasis on Butterworth, Bessel, Chebyshev and elliptic implementations. Lowpass to highpass and lowpass to bandpass transformations are also discussed in detail.

### 美国专利<sup>①</sup>

- [1] Bardeen J, Brattain WH. Three-electrode circuit element utilizing semiconductive materials. U.S. Patent # 2,524,035, filed June 7, 1948; issued October 3, 1950.
- [2] Kilby JS. Miniaturized electronic circuits. U.S. Patent # 3,138,743, filed February 6, 1959; issued June 23, 1964.
- [3] Lilienfeld J. Method and apparatus for controlling electric currents. U.S. Patent # 1,745,175, filed October 8, 1926; issued January 28, 1930; Amplifier for electric currents. U.S. Patent # 1,877,140, filed December 8, 1928; issued September 13, 1932; Device for controlling electric current. U.S. Patent # 1,900,018, filed March 28, 1928; issued March 7, 1933.
- [4] Noyce RN. Semiconductor device-and-lead structure. U.S. Patent # 2,981,877, filed July 30, 1959; issued April 25, 1961.
- [5] Shockley W. Circuit element utilizing semiconductive materials. U.S. Patent # 2,569,347, filed June 17, 1948; issued October 3, 1950; Semiconductor amplifier. U.S. Patent # 2,502,488, filed September 24, 1948; issued April 5, 1950. Reprinted in *Proc IEEE* 1998;**86**(1):34–6.

<sup>①</sup> 列出的所有专利都可以在美国专利和商标网站 [www.uspto.gov](http://www.uspto.gov) 或谷歌专利中查到。