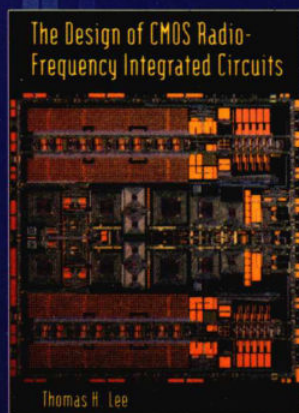


教育部高等教育司推荐
国外优秀信息科学与技术系列教学用书

CMOS射频 集成电路设计

The Design of CMOS Radio-Frequency
Integrated Circuits



[美] Thomas H. Lee 著
余志平 周润德 等译



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

7N710
107

教育部 高等教育司 推荐
国外优秀信息科学与技术系列教学用书

CMOS 射频集成电路设计

The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits

[美] Thomas H. Lee 著

余志平 周润德



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面深入地介绍了如何设计千兆赫兹 (GHz) CMOS 射频集成电路。本书首先回顾了集成电路元件的特性、MOS 器件物理和晶体管模型, RLC 并联、串联和其他形式的振荡网络, 以及分布式系统的特点及其与集总参数电路的区别。然后详细讨论了现代高频宽带放大器的设计。接下来介绍了关键的射频功能块, 包括低噪声放大器 (LNA)、基准电压源、混频器、射频功率放大器、振荡器和频率综合器。最后探讨了发送接收器的总体结构并展望了射频电路未来发展的前景。书中包括许多非常有用的电路图和其他插图, 除第1章和最后一章外, 每章的后面都附有许多启发性的习题, 是高年级本科生和研究生学习有关射频电子学方面课程的理想教科书, 对于从事射频集成电路设计或相关领域的工程技术人员来说也是一本非常有益的参考书。

Authorized translation from the English language edition published by the Press Syndicate of the University of Cambridge. Copyright © Cambridge University Press 1998.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

This edition is licensed for distribution and sale in the People's Republic of China only excluding Hong Kong, Taiwan and Macau and may not be distributed and sold elsewhere.

Simplified Chinese language edition published by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2004.

本书中文简体专有翻译出版版权由 Cambridge University Press 授予电子工业出版社。其原文版权及中文翻译出版版权受法律保护。未经许可, 不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

本书中文简体字版仅限于在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区) 发行与销售, 并不得在其他地区发行与销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2003-0368

图书在版编目 (CIP) 数据

CMOS 射频集成电路设计 / (美) 李 (Lee, T. H.) 著; 余志平等译. - 北京: 电子工业出版社, 2004.7
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits

ISBN 7-121-00073-3

I. C... II. ①李... ②余... III. 射频电路: 集成电路-电路设计-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 063742 号

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 北京兴华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 27.25 字数: 698 千字

印 次: 2004 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换; 若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

目 录

第 1 章 无线电发展历史的间断回顾	1
1.1 引言	1
1.2 麦克斯韦尔和赫兹	1
1.3 真空管发明前的电子学	2
1.4 真空管的诞生	6
1.5 Armstrong 和再生放大器/检波器/振荡器	9
1.6 其他无线电电路	11
1.7 Armstrong 和超再生电路	13
1.8 Oleg Losev 及第一个固态电路放大器	14
1.9 结束语	15
1.10 附录：真空管基础	16
第 2 章 无源集成电路 (IC) 元件的特性	24
2.1 引言	24
2.2 电阻	24
2.3 电容	26
2.4 电感	33
2.5 小结	40
2.6 附录：电容方程总结	40
第 3 章 MOS 器件物理回顾	44
3.1 引言	44
3.2 简短历史	44
3.3 场效应管：一个小故事	44
3.4 MOSFET 物理：长沟道近似	45
3.5 弱反型区 (亚阈值区) 的工作情况	51
3.6 短沟情况下的 MOS 器件物理	51
3.7 其他效应	54
3.8 渡越时间的影响	56
3.9 小结	57
3.10 附录：0.5 μm Level-3 的 SPICE 模型	57
第 4 章 无源 RLC 网络	61
4.1 引言	61

4.2	并联 RLC 谐振回路	61
4.3	串联 RLC 网络	64
4.4	其他 RLC 谐振网络	65
4.5	作为阻抗变换器的 RLC 网络	66
4.6	实例	74
第 5 章	分布参数系统	82
5.1	引言	82
5.2	集总和分布参数范畴之间的联系	84
5.3	重复结构的策动点阻抗	84
5.4	关于传输线的更详细讨论	85
5.5	有限长度传输线的特性	90
5.6	传输线公式小结	92
5.7	人工传输线	92
5.8	小结	95
第 6 章	史密斯圆图和 S 参数	97
6.1	引言	97
6.2	史密斯圆图	97
6.3	S 参数	100
6.4	附录: 对于单位的一些说明	102
6.5	附录: 为什么采用 50 (或 75) Ω	102
第 7 章	频带宽度估算方法	106
7.1	引言	106
7.2	开路时间常数方法	106
7.3	短路时间常数方法	117
7.4	补充读物	121
7.5	上升时间、延时及带宽	121
7.6	小结	126
第 8 章	高频放大器设计	130
8.1	引言	130
8.2	利用零点增大带宽	130
8.3	并联-串联放大器	139
8.4	采用 f_T 倍频器增大带宽	144
8.5	调谐放大器	145
8.6	中和与单向化	148
8.7	级联放大器	151
8.8	小结	157

第 9 章 基准电压和偏置电路	162
9.1 引言	162
9.2 二极管特性回顾	162
9.3 CMOS 工艺中的二极管和双极型晶体管	163
9.4 独立于电源电压的偏置电路	164
9.5 带隙基准电压	165
9.6 恒 g_m 偏置	171
9.7 小结	173
第 10 章 噪声	177
10.1 引言	177
10.2 热噪声	177
10.3 散粒噪声	182
10.4 闪烁噪声	183
10.5 爆米噪声	185
10.6 经典的二端口网络噪声理论	186
10.7 噪声计算举例	189
10.8 一个方便的匡算规则	191
10.9 典型的噪声性能	191
10.10 附录: 各种噪声模型	192
第 11 章 低噪声放大器设计	197
11.1 引言	197
11.2 MOSFET 两端口网络噪声参数的推导	197
11.3 LNA 的拓扑结构: 功率匹配与噪声匹配	201
11.4 功耗约束噪声优化	206
11.5 设计举例	209
11.6 线性度与大信号性能	214
11.7 无失真信号的动态范围	219
11.8 小结	220
第 12 章 混频器	223
12.1 引言	223
12.2 混频器基础	223
12.3 作为线性混频器的非线性系统	226
12.4 基于乘法器的混频器	230
12.5 亚采样混频器	242
12.6 附录: 二极管环路混频器	243

第 13 章 RF 功率放大器	248
13.1 引言	248
13.2 一般考虑	248
13.3 A、AB、B 和 C 类功率放大器	248
13.4 D 类放大器	256
13.5 E 类放大器	257
13.6 F 类放大器	259
13.7 功率放大器的调制	262
13.8 功率放大器特性小结	263
13.9 RF 功率放大器的几个设计范例	263
13.10 其他设计考虑	268
13.11 设计小结	274
第 14 章 反馈系统	278
14.1 引言	278
14.2 现代反馈理论的简短历史	278
14.3 一个令人费解的问题	281
14.4 负反馈系统灵敏度的降低	282
14.5 反馈系统的稳定性	285
14.6 衡量稳定性的增益与相位裕量	285
14.7 根轨迹技术	287
14.8 稳定性准则小结	291
14.9 反馈系统建模	291
14.10 反馈系统的误差	294
14.11 一阶和二阶系统的频域和时域特性	296
14.12 实用的匡算规则	298
14.13 根轨迹举例和补偿	299
14.14 根轨迹技术小结	304
14.15 补偿	304
14.16 通过降低增益获得补偿	305
14.17 滞后补偿	307
14.18 超前补偿	309
14.19 补偿小结	311
第 15 章 锁相环	315
15.1 引言	315
15.2 PLL 的简短历史	315
15.3 线性化的 PLL 模型	317
15.4 PLL 的一些噪声特性	321

15.5	鉴相器	323
15.6	序列鉴相器	327
15.7	环路滤波器和电荷泵	334
15.8	PLL 设计实例	338
15.9	小结	344
第 16 章	振荡器与频率合成器	348
16.1	引言	348
16.2	纯粹线性振荡器存在的问题	348
16.3	描述函数	349
16.4	谐振器	360
16.5	调谐振荡器举例	363
16.6	负阻振荡器	367
16.7	频率合成	370
16.8	小结	377
第 17 章	相位噪声	382
17.1	引言	382
17.2	一般性考虑	382
17.3	详细讨论: 相位噪声	383
17.4	Hajimiri 模型: 时变相位噪声理论	386
17.5	小结	392
第 18 章	系统结构	396
18.1	引言	396
18.2	动态范围	396
18.3	亚采样	406
18.4	发送器结构	406
18.5	振荡器的稳定性	408
18.6	小结	408
第 19 章	射频电路历史回顾	410
19.1	引言	410
19.2	Armstrong	410
19.3	“全美 (All-American)” 5 管超外差结构	413
19.4	Regency TR-1 晶体管收音机	415
19.5	三管玩具民用波段对讲机	416

第1章 无线电发展历史的间断回顾

1.1 引言

集成电路工程师们毫不吝惜地把增加管子所需要的成本理所当然地认为基本上是零，这就导致了今天有大量器件的电路非常普遍。当然，这是近期的发展情形；在电子学的大部分历史中，电路设计在经济学方面的考虑恰好与它们今天的情况相反。其实并不是太久以前迫于有源器件的相对高成本，工程师们还在像试图从石头中榨出油那样来获取廉价性能（或者至少对整流是如此）。而且确实令人惊奇的正是无线电的开创者们只用少量的元件就能榨取出如此多的性能。例如我们将会看到美国无线电的天才 Edwin Armstrong 在 20 世纪 20 年代初期设计了电路可以用增益的对数来换取带宽，而不是像通常认为的那样增益和带宽多多少少应当直接互换。我们也将看到就在 Armstrong 正在开发这些电路的时候，自学成才的前苏联无线电工程师 Oleg Losev 正在做蓝色 LED（发光二极管）的实验并建造可工作至 5 MHz 的全固态电路的无线电，而这发生在晶体管发明的 1/4 世纪之前。

很少有人会讲到这些奇妙的故事，因为它们往往处在历史课程和工程课程之间的夹缝中。然而应当有人来讲这些故事，因为这样可以回答许多经常问到的问题（“为什么他们不这样做？”，回答是“他们过去曾这样做过，但它引起了关键部件质量变差”）。这一极为曲折的无线电历史简短触及了这些主要故事中的一些，并为那些想要进一步探索的读者列出了参考文献。

1.2 麦克斯韦尔和赫兹

每一个电气工程师至少都知道一点有关麦克斯韦尔（James Clerk Maxwell, Clerk 读做“Clark”）的事情：他写下的那些方程使那些二三年级学生的生活变得极为忙碌。他不仅写下了以他名字命名的电动力学方程^①，而且也第一个发表了对反馈系统稳定性的数学论述（即“On Governors”，它解释了为什么蒸气引擎的速度控制器有时可能不稳定^②）。

麦克斯韦尔收集了那时所知的所有有关电磁的现象，并且不可思议^③和才气横溢地发明了位移（电容性）电流的概念，这使他推导出一个方程。而这个方程导致了对电磁波传播的预测。

接着是赫兹（Heinrich Hertz），他第一个用实验证明了麦克斯韦尔的预测，即存在着电磁波，它以有限的速度传播。他设计的“发送器”就是按照这一个简单的想法工作的：使一个线圈通过一个火花隙放电并且连在某种天线上以发射一个谐波丰富（这是无意的）的波。

他的设备自然只提供对这一“不干净”信号最基本的滤波，所以需要不寻常的细心和毅力来验证这一干扰信号零值和峰值的存在（并进行量化），这些信号是电磁波传播的印证。他也设法

① 实际上 Oliver Heaviside 是第一个使用向量积分的符号惯例把麦克斯韦尔方程转变为今天大多数工程师都熟悉的形式。

② Proc. Roy. Soc., (皇家学会论文集), 1868.

③ 许多电和磁（E&M）的教科书提供了符合逻辑但在历史上却是错误的解释，即认为麦克斯韦尔发明位移电流的概念是在认识到在已知的 E&M 定律与电流的连续性方程之间存在着不一致性之后。事实是麦克斯韦尔是一位天才，而天才的灵感常常具有无从捉摸的来源。这里就是这些情形中的一个。

演示如衍射和偏振这样的波的典型特性。你也许会感到奇怪，为什么他工作的基波频率是在 50 MHz 至 500 MHz 之间。他实际上不得不采用这些频率，因为他的实验室确实太小了，所以无法容纳较低频率时信号的几个波长。

因为赫兹的探测器是另一个火花隙（与环路谐振器是一个整体），所以被接收的信号必须足够大才能感应出可见的火花来。尽管这一设备对于验证麦克斯韦方程的合理性是合适的，但你可以体会到，试图用这一设备进行无线通信是很困难的。总之，如果所接收的信号必须强到足以产生可见的火花，那么信号放大到适合全球的范围时，对于我们中间镶有金属假牙的人来说会有相当不愉快的感觉。

然后赫兹就去世了——很年轻。接着是马可尼（Marconi）登场。

1.3 真空管发明前的电子学

马可尼的无线电实验采用了与赫兹完全相同的发送器，但进行了不遗余力的修改，其惟一的意图是采用这个系统进行无线通信（而不是碰巧在这个过程中赚了许多钱）。他认识到赫兹火花隙探测器的内在局限，所以改用了 Edouard Branly 在 1890 年提出的奇怪的创作。从图 1.1 中可以看到，这一器件 [Oliver Lodge 爵士称为金属屑检波器 (coherer)] 由一个玻璃容器构成，里面充以松散的也许有些氧化了的金属粉末，结果，它的电阻具有有趣的滞回特性。这里必须强调检波器工作所基于的细节原理一直没有得到满意的解释^①。然而我们肯定可以描述它的特性，即使我们并不完全理解它如何工作的全部细节。



图 1.1 Branly 检波器

一个检波器的电阻在它没有被“激活”（静态）时具有很高的电阻值（兆欧），而在电磁（EM）波照射到它上面时，电阻值会下降好几个数量级（降为千欧或更少）。电阻值的这一较大变化通常用来触发一个螺线管以产生一个听得见的咔哒声，并打印一条纸带作为被接收信号的永久记录。为了使检波器准备好接受下一个电磁脉冲，必须摇晃它或拍打它以恢复成“不粘聚”的高阻状态。图 1.2 显示了一个检波器是如何实际用在接收器上的。

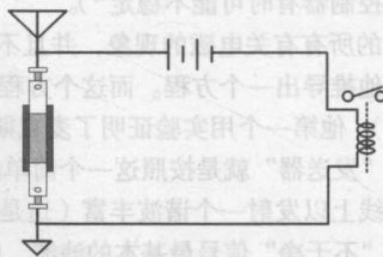


图 1.2 典型的带检波器的接收器

正如可以看到的那样，当一个被接收的信号触发检波器使它处于低阻状态时，检波器激励了

^① 在大信号激励下，可以看到这些填充物粘聚在一起（因此得到“coherer”的名字），在这一情形中电阻值的降低是不难理解的。然而对大多数作者显然不了解的是，这一检波器在输入能量很小以至没有观察到这样的“粘聚”时也能工作，所以我断定它的细节工作原理仍然未知。

一个继电器（产生可听得见的咔哒声）或一个纸带打印机（作为永久的记录）。显然检波器基本上是一个数字器件，因而不适合除无线电报以外的应用。

马可尼花费了大量的时间来改善从本质上讲是极差的检测器，并且最终得到了如图 1.3 所示的结构。他大大减小了在两端插塞之间的距离（最小为 2 mm），在中间的空间充以特别的经仔细选择颗粒大小的镍和银粉的混合物（比例为 19 : 1），并且把整个装置密封在部分抽真空的管子中。这一接收器的另外一个改进是在每次接收到一个脉冲之后就自动拍打这个检测器，使它回到初始状态，在这一过程中螺线管提供了一个可以听得见的信号作为指示^①。

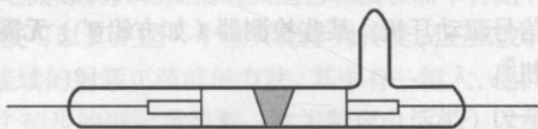


图 1.3 马可尼的检波器

正如你可以想像到的，除了所希望的信号以外，其他发生的许多电磁波也能触发一个检波器，从而使读信息发生困难。即使这样，马可尼仍有能力改进他的设备，使得在 1901 年实现了横越大西洋的无线通信，这归因于他许多成功的努力，实现了功能更强的发送器、以地为一个终端的巨大高架天线（他的发送器也是以地为一个终端）以及他改进的检波器。

然而也许你不会奇怪，检波器即便在最佳状态下性能也是很差的。由于感到检波器的不稳定性而不易取得成功，于是大大推动了人们去寻找一种更好的检测器。但是由于没有合适的理论基础作为指导，这一研究常常走入死胡同。甚至曾经有人拿刚死的人的脑子来作为检波器，实验者甚至声称他的设备有显著的灵敏性^②。让我们一起庆幸这种奇特的检波器从来也没有为人们所欣赏过。

大多数研究是在模糊的直觉概念指导下进行的，即检波器的工作取决于某种神秘的非理想接触，并且各种实验事实上都同时驻足在点接触晶体探测器上（见图 1.4）。这一器件的第一个专利于 1904 年授予了 J. C. Bose 发明的采用 galena（方铅矿）的检测器^③。这似乎是对半导体检测器授予的第一个专利，尽管当时还没有认识到这一点（事实上，“半导体”这个字当时还没有造出来）。沿着这些方面的工作继续进行，Henry Harrison Chase Dunwoody 将军在 1906 年下半年由于采用金刚砂（碳化硅）的探测器而获得了专利，之后在 1907 年上半年 Greenleaf Whittier Pickard（一位 MIT 的研究生，他的了不起的叔父是诗人约翰·格林里夫·惠蒂，John Greenleaf Whittier）由于他的硅（！）探测器而获得专利。正如图中所示的，与这类探测器一端相连的是一根细导线（奇怪地称它为“触须”），它与晶体表面间形成一个点接触。另一端连接的是晶体周围的大面积接触，一般由低熔点的合金形成（通常是铅、锡、铋和镉的混合物，称之为“木头”金属，其熔点在 80°C 以下）。我们可以把这样构成的器件称为点接触式肖特基二极管，尽管测量并不总是那么容易地与这一描述相一致。不论怎样，我们可以看到现在的二极管符号是如何从这一实际装置的描述中进化而来的，二极管符号中的箭头代表触须的点接触，如图中所示的那样。

① 检波器距现在最近的应用是 20 世纪 50 年代末无线电控制的玩具车。

② A. F. Collins, *Electrical World and Engineer*, v. 39, 1902; 他从研究其他种类生物的脑子着手，一直研究到人脑。

③ J. C. Bose 美国专利号 # 755,840, 于 1904 年 3 月 19 日批准授予。事实上 Ferdinand Braun 早在 1874 年就在“Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle（“论通过金属硫酸盐的电流”），*Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie*, v. 153, pp. 556-63 一文中报告过在方铅矿和黄铜矿中的不对称导电。大面积的接触是通过部分浸泡在水银中，而另一个接触则采用铜、白金和银导线。这些样品中没有一个显示超过 2 : 1 的正向/反向电流比。Braun 后来由于对无线电技艺的贡献而与 Marconi 共享了诺贝尔奖金。

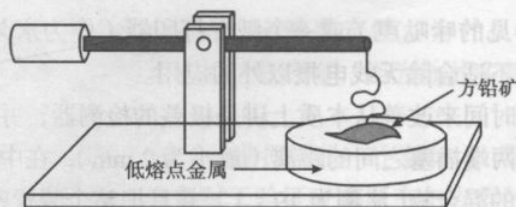


图 1.4 典型的晶体检测器

图 1.5 为用这些器件^①制作的简单的晶体^②收音机。LC 电路调谐到想要的信号，然后晶体进行整流，所得到的解调声波信号驱动耳机。某些检测器（如方铅矿）无需偏置源，所以有可能制作一个“无需能量”的收音机^③。

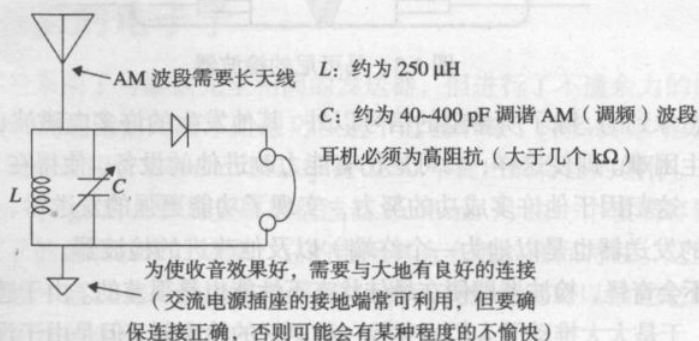


图 1.5 简单的晶体收音机

Pickard 在发明晶体检测器时比任何其他人工作得更努力, 他最终试验了 30000 种由导线和晶体构成的组合, 其中除了硅以外, 还有黄铁矿石 (“假”金) 和生锈的剪刀。方铅矿探测器曾非常普及, 因为它们价格低廉且不需要任何偏置。遗憾的是, 触须线接触的压力调节合适后很难维持, 因为只要在方铅矿上的压力稍微大一点就会破坏其整流性能, 而且还得先在晶体表面搜寻一个灵敏点。另一方面, 尽管金刚砂检测器需要有几伏的偏置, 但它们在机械上比较稳定 (较高的接触压力也毫无问题), 因此被广泛地应用在船上^④。

在大约与这些粗糙的半导体初次使用的同时, 无线电工程师们开始与当时看来越来越明显的一个问题在斗争: 干扰。

火花信号的宽频谱使企图传送除莫尔斯 (Morse) 码类型以外的信号变得不现实 [尽管某些勇敢的工程师确实试过用火花隙设备进行调幅 (AM) 传送, 但几乎都没有成功]。这一宽带特性倒是很好地适合检波器技术, 因为检波器变化的阻抗反正也很难对电路实现调谐。然而随着发送者数目的成倍增长, 不能提供更多的有效选择范围在当时已越来越成为一种麻烦。

马可尼在 1899 年与两家报刊 (即 *New York Herald* 及 *Evening Telegram*) 签约刊登了大字标题, 表示要提供多达一分钟的有关美国杯赛艇比赛的无线电新闻报道, 他非常成功地使另外两组人也被鼓励要在 1901 年试做同样的事情。这两组中的一组是由 Lee de Forest 领导的, 我们将在以

① 在现代电子学中, “晶体” 通常是指石英谐振器, 例如它可用在振荡器中作为决定频率的元件, 这些与用在晶体收音机中的晶体绝对没有任何关系。

② 1N34A 锗二极管能很好地工作且比较容易得到, 但不如方铅矿、木头金属以及触须那样迷人 and 有趣。

③ 也许我们应当感谢人类的听觉系统: 人能听到的最小声音大约相当于耳膜的一个氢原子直径那么大的位移!

④ 金刚砂探测器一般封装在一个盒子里, 并且它们的调节常常通过专门的步骤把它们一下子放在一个硬表面上。

后谈及他，而另一组是由一个意想不到的闯入者领导的（他其实就是 Pickard），他来自美国无线电话电报公司（American Wireless Telephone and Telegraph）。遗憾的是，就在那一年三组同时发报时，没有人能接收到可理解的信号，所以竞赛结果不得不用老办法即信号机来报告。气恼之极的 de Forest 把他的发送机扔到船外，而在岸上急等着新闻的中继站则不得不设法弥补他们报告中的许多内容。

这一失败使马可尼、Lodge 以及怪才 Nikola Tesla 更加感到沮丧，因为实际上他们已经拥有了调谐电路的专利，而马可尼的设备也已采用了带通滤波器来减少干扰^①。

问题在于尽管把调谐电路加到火花发报的发送器和接收器中肯定有助于信号滤波，但从来没有一个实际可行次数的滤波可以真正把一个电火花序列转变成正弦波。在认识了这一基本事实之后，许多工程师寻找产生连续的射频正弦波的方法。其中有一组人，他们中有丹麦工程师 Valdemar Poulsen^②（他也发明过一个初步的磁记录装置，称为留声电话机）以及美籍澳大利亚工程师（也是斯坦福大学的研究生）Cyril Elwell，他们采用了与直流弧光的负电阻特性来保持 LC 电路的不断振荡^③，从而提供一个正弦波的射频（RF）载波。工程师们迅速发现这一方法可以使功率加大到显著的水平：超过 1 兆瓦的弧光发送器在第一次世界大战后不久就开始使用了！

通用电气（GE）公司的 Ernst F. W. Alexanderson 则采用略有不同的方法，他根据 Reginald Fessenden 的要求设法用巨大的交流发电机（它实际上与开车时给汽车电池充电的发电机一样，只是很大，速度很高）来产生大功率的射频正弦波。这一走到头了的技术最后构造了一个能在 100 kHz 的频率下发出 200 kW 的功率的交流发电机！它在第一次世界大战结束时刚刚完成，但在它开始要工作时就已经被放弃了^④。

连续的波比火花信号更有优势这一点很快就明朗了，并由此刺激了人们开发更好的接收设备。令人高兴的是，检波器逐渐为许多改进的器件（包括前面提到的半导体器件）所代替，它到 1910 年时已慢慢消失（尽管迟至 20 世纪 50 年代至少有一种无线电控制的玩具还用检波器）。

其中一个的改进是由 Fessenden 发明的，即为“液体镇流器”（barretter），如图 1.6 所示。这一检测器包括一根很细的镀银白金线（称为“Wollaston 线”）封在玻璃杆中。其中一小段线从杆中露出并接触一个小的硝酸池。这一装置的 $V-I$ 特性在接近原点处呈准平方关系，因而确实可以用来解调 RF 信号。这一镇流器曾广泛用于许多具体实例中，因为它是一个“自复原”的器件（不同于典型的检波器）并且不需要调节（不同于晶体检波器）。除了与酸有关的害处外，这一镇流器显然是一种令人满意的检波器，这可以从对 Fessenden 专利的许多侵权中得到证实（包括声名狼藉的 de Forest 侵权在内）。

到 1906 年下半年有足够多的整流检测器已在使用，使得在美国东海岸的船员们大为惊奇地听到由 Fessenden 本人在圣诞节前夜^⑤的第一个调幅广播（尽管三天前已通过无线电报做了预告）。

① 马可尼是唯一一个有很强财团支持的人（本质上是英国政府），而他的英国专利 [# 7777，即著名的“四个 7”（“four sevens”）专利是在 1900 年 4 月 26 日授予的] 是早期无线电时代主导的调谐专利。它也涉及到在技术史上一些历时最长和强度最大的诉讼案件。美国最高法院在 1943 年最终裁定马可尼被 Lodge、Tesla 和其他人占先。

② 有些资料总是把他的名字不正确地说成是“Vladimir”，然而这是一个完全不像丹麦人的名字！

③ 用于工业照明的弧光技术在当时是一种成熟的工艺。在斯坦福大学 Leonard Fuller 的博士论文中，他在理论上推断出弧光功率可以发送超过 30 kW 的功率，这是别人从未逾越过的限度。由于 Fuller 的贡献，1000 kW 的弧光发送器于 1919 年成为了可能。

④ 这一先进的旋转机器用尽了当时最高水平的冶金技术。

⑤ Aitken（见 1.9 节）错误地把这一日子当成圣诞节。

高兴的收听者受到的款待是一个包括有诗歌、Fessenden 小提琴演奏的圣诞赞歌以及一些唱歌的节目。他采用了一个水冷的碳精粉麦克风与一条天线相串联来调制一个 5 kW (近似) 50 kHz (也是近似) 的载波, 载波是由放在美国麻省 Brant Rock 的一个原型的 Alexanderson 交流发电机产生的。那些使用检波器的人却十分遗憾地错过了这一历史事件, 因为一般使用的检波器完全不适合于调幅解调。Fessenden 在一周之后即在新年前夜又重复了他的技艺, 以使更多的人有机会享受这一乐趣。

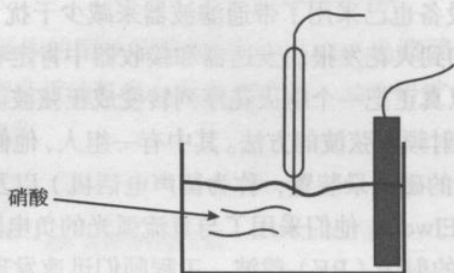


图 1.6 Fessenden 液体镇流器

第二年 (即 1907 年) 对电子学是很有意义的一年。除了继续沿第一个调幅广播 (它标志着从无线电报过渡到无线电话) 发展以外, 那一年还出现了半导体。除了硅探测器的专利而外, 那一年还发明了 LED (发光二极管)! 在无线杂志 (*Wireless World*) 一篇题为“金刚砂简讯”的短文中, 英国人 Henry J. Round 报告了在一定条件下 (通常是在触须的电势相对于晶体是非常负的时候) 金刚砂探测器能令人迷惑地发射出冷的蓝光^①。但它的影响多半被忽略并最终被遗忘, 因为当时在无线电方面还有太多更紧迫的问题。然而今天, 金刚砂事实上用在了蓝光 LED 中^②, 并且为制造出能在较高温度下工作的晶体管而被一些人研究过。至于硅, 我们大家都知道那是怎么回事。

1.4 真空管的诞生

1907 年也产生了 Lee de Forest 发明的第一个能放大的电子器件的专利, 即真空三极管。可惜的是, de Forest 并不理解他的发明实际上是如何工作的, 只是通过来回试验 (有时甚至是没有道理的) 方式碰上这一发明的。

真空管实际上可以追溯到它的祖先即爱迪生 (Thomas Edison) 的低度发光的白炽灯泡。爱迪生的灯泡有一个问题, 由于烟垢 (碳灯丝的蒸发所致) 在灯泡内表面的积累而逐渐变黑。为了解决这个问题, 他插入了一个金属电极, 希望多少能把一些烟垢吸收到这个电极而不是玻璃上。不愧是一位真正的实验家, 他对这一电极同时应用了正电压和负电压 (相对于灯丝的一个接头), 并在 1883 年注意到当这个电极是正电压时会有电流神秘地流过, 但当这个电极是负电压时则没有任何电流, 而且流过的电流取决于灯丝有多热。爱迪生当时还没有任何理论可以解释这些观察到的现象 (注意, “电子”这个词直到 1891 年才“造”出来, 并且直到 1897 年 J. J. Thomson 的实验之前, 这一粒子本身还没有确切的定义), 但他继续研究下去并在 1884 年获取了第一个电子 (而不是电气) 器件的专利, 这一器件利用极板电流与灯丝温度的关系来间接测量导线电压。这

① 他说他也看到了橙色和黄色, 他也许一直在喝酒。

② 应当提及, 以 GaN (氮化镓) 为基础的 LED 有更高的效率, 但直到最近人们才发现如何掺杂这一材料而不会引入严重的缺陷。GaN 的蓝光 LED 比起 SiC (碳化硅) 的来效率要高得多。

一“小题大做”的仪器从来没有生产过，因为它要比标准的电压计差；爱迪生只是希望得到另一个专利而已，这就是他最终获取千百个专利的一种方式。

关于这一插曲有意思的是，就基本原理而言，Edison 可以说是从来没有发明过什么东西，如他偶然碰上了电子整流器但却认识不到他所发现的东西的含义。认识不到这些含义的部分原因无疑是由于他对于直流电力传输在情感上（和财政上）的专一，而在直流电力传输中，整流器却没有任何作用。

大约就在此时，一个叫 John Ambrose Fleming 的英国爱迪生公司的顾问碰巧去参加了一个在加拿大的会议，他在美国逗留期间去拜访他在新泽西的兄弟的同时，也去了爱迪生的实验室。他对“爱迪生效应”产生了极大的兴趣（他比爱迪生要感兴趣得多，爱迪生很难理解为什么 Fleming 会对没有任何实际应用希望的某些东西如此兴奋不已），并最终在 1890 年至 1896 年发表了有关爱迪生效应的论文。尽管他的实验引起了最初的轰动，但伦琴（Röntgen）在 1896 年声明发现 X 射线——以及在同一年的后些时候发现天然放射现象——很快成为物理学界的主要兴趣，而爱迪生效应则很快便销声匿迹了。

然而，几年后，Fleming 成为英国马可尼公司的顾问并参加探索改进的探测器。他想到了爱迪生效应，测试了一些灯泡，发现它们完全能像射频整流器那样工作，于是在 1905 年申请了 Fleming 真空管（Fleming Valve）（见图 1.7）的专利（真空管因此在英国仍称为 valve）。几乎完全耳聋的 Fleming 采用了一个镜像电流计（mirror galvanometer）来显示接收到的信号，并把这一特点作为他专利的一部分。

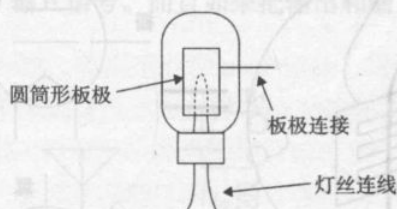


图 1.7 Fleming 真空管

尽管并不特别灵敏，但 Fleming 真空管至少能连续做出响应而不需要任何机械上的调整。马可尼公司的许多种设备都采用它们（多半是由于契约义务的关系），但 Fleming 真空管从来没有普及过（这与某些肤浅的历史研究所做的判断恰好相反）——它需要太大的功率，灯丝的寿命很短，而且这一东西又很贵。当与 Fessenden 的镇流器或制作良好的晶体检测器相比时，它显然是一个很不灵敏的检测器。

此时 de Forest 正忙于在美国建立一些“灰色”的无线电公司，他惟一的目的是通过出售股票赚钱。他在 1902 年上半年的杂志上写道，“很快，我们相信，鱼儿就会上钩。”一个无线设施的股票一经售出，他和他的好朋友们就卷走赌注（而不管这个无线电站是否完成）并搬到下一个城市。另一个说明他敛财性格的是他在访问 Fessenden 的实验室后公然窃取了 Fessenden 的检波器 [只是把渥拉斯顿（Wollaston）线改成铲形]，并且甚至厚颜无耻地去申请这一发明的奖励。然而在这个案例中公正占了上风，Fessenden 赢得了对 de Forest 的侵权诉讼。

de Forest 有点运气，因为 Dunwoody 恰好及时发明了金刚砂检测器，从而使 de Forest 免于破产。然而 de Forest 不满足于开发这一合法的发明^①，他开始窃取 Fleming 的真空二极管并且真的

① Dunwoody 是作为 de Forest 的顾问完成这一工作的，他没能使 de Forest 为此付给他应得的报酬。

在 1905 年取得了一个专利。他只是用一个耳机代替镜像电流计，但因此加进了很大的正向偏置（于是降低了本来已经不太灵敏的检测器的灵敏度）。de Forest 一生都在不断地、毫无说服力地否认他知道 Fleming 先前的工作（尽管 de Forest 惯于并且勤勉地浏览 Fleming 发表在专业杂志上的文章）。为了支持自己的说法，de Forest 指出他采用偏置的地方 Fleming 一点也没有用过^①。证明 de Forest 完全是在撒谎的结论性证据最终出现了，一位历史学家 Gerald Tyne 得到了 W. McCandless 的工作记录，后者制造过 de Forest 所有第一批真空管（de Forest 称它们为“声频管”）。这一记录清楚地表明 de Forest 在申请专利的几个月前曾要求 McCandless 复制过某些 Fleming 真空管，因此根本不可能有宽容的解释说明 de Forest 独立发明了真空二极管。

然而之后不久 de Forest 就有了无上光荣的成就。他在灯丝和侧电极（后来称为板极）之间增加了一个曲折的导线电极，de Forest 把它称为栅，于是就诞生了三极真空管（见图 1.8）。这个三个部件的三极真空管有放大的能力，但 de Forest 直到若干年之后才认识到这一事实。事实上，他的专利申请描述的三极声频管只是作为一个检测器而不是一个放大器^②，所以增加栅极的目的仍然是个谜。他增加这个栅肯定不是像某些史料所声称的那样是经过仔细考虑后的结果，事实是他到处加电极，他甚至想在极板外面加“控制电极”！因此我们必须把他增加栅仅仅看成是他在寻找他自己的检测器时所做的一种偶然但却持久的修修补补的结果。如果说他偶然发明了三极真空管的说法是确切的，那么必须要由别人来向他解释这个东西是如何工作的却是无可辩驳的事实^③。

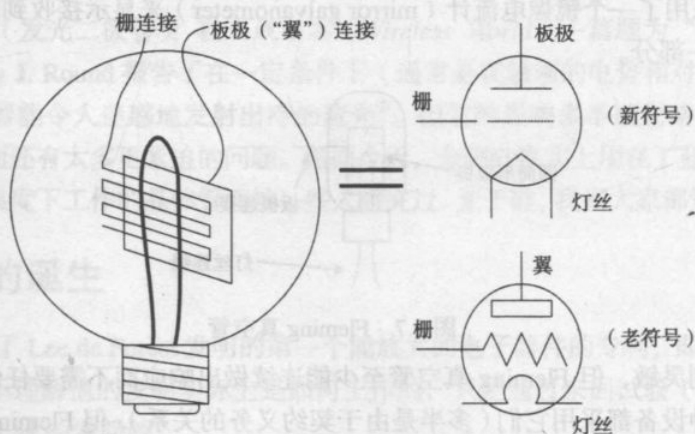


图 1.8 de Forest 的三极管声频管及其符号

根据已有的证据，无论是 de Forest 还是其他任何人都没有对三极真空管太在意（1906~1909 年在三极真空管方面基本上没有什么活动）。事实上当 de Forest 在他其中的一个公司倒闭之后好不容易避免了由于股票欺诈引起的罪责及坐牢时，他不得不放弃他所有发明的利益，以作为他以后重新组织公司的条件，但只有一个发明例外：律师们允许他保留三极管的专利，认为三极真空管没有任何价值^④。

① de Forest 力图说明他的工作与 Fleming 无关，他反复唠叨正是由于他对于光焰导电特性的研究才给他在真空管方面的工作增添了活力，他争辩说离子导电是真空管工作的关键。结果他把自己一拳打在了一个角落，在其他发明了超高真空管之后，连他自己也发现以后很难从这个角落中跳出，因为在超高真空管中基本上没有什么离子。

② 然而足够奇怪的是，他的两部件声频管专利确实提到过放大。

③ Aitken（见 1.9 节）争辩说 de Forest 曾不公平地被谴责为不理解他自己的发明。然而一大堆证据都是与 Aitken 的天才看法相矛盾的。

④ 于是刚失业的 de Forest 去了 Palo Alto 市的联邦电话电报公司，为 Elwell 工作。

他断断续续地慢慢研究三极真空管并且最终和其他人（包括火箭先驱 Robert Goddard）几乎同时发现了三极真空管潜在的放大作用^①。他设法把这一器件在 1912 年卖给了 AT&T 作为电话的接续放大器，但最初一个时期很困难，因为声频管特性很不规律。器件特性的再现性相当差并且管子具有有限的动态范围。它对小信号能工作得很好，但在过载时性能很差（在管子中的残留气体会电离，产生蓝光以及在输出信号中的尖杂噪声）。最后，声频管的灯丝（它是用钽制作的）寿命只有约 100~200 小时，因此在真空管占领整个世界前还需要经历一段时间。

1.5 Armstrong 和再生放大器/检波器/振荡器

幸运的是，一些天才的人们终于对三极真空管感兴趣了。在 Schenectady 的通用电气公司（GE）实验室的 Irving Langmuir 成功地获得了高度真空，于是消除了由于存在（容易电离的）残留气体引起的不规则的特性。de Forest 从来没有想到过做这一点（而且事实上，他还警告不要这样做，他认为这会降低灵敏度），因为他从来也没有真正相信电子的热发射（确实不清楚他在那时甚至是否相信电子），就断定三极真空管的工作基本上取决于电离的气体。

Langmuir 成果的发表为一位聪明的工程师铺平了道路，使他设计出有用的电路来利用声频管的潜力。这位工程师就是 Edwin Howard Armstrong，他于 1912 年在 21 岁时发明了再生的放大器/检测器^②。这一电路（它现在的形态如图 1.9 所示）采用了正反馈（通过一个“屏极回授线圈”将输出能量中的一些以合适的相位耦合送回输入端）来同时提高系统的增益和 Q 值。于是高的增益（可产生高灵敏度）和窄的带宽（可得到好的选择性）就可以相当简单地用一个管子来实现。此外，这一管子的非线性解调了输入信号。而且如果把输出和输入过度耦合就可以使它变成一个极好的小巧 RF 振荡器。

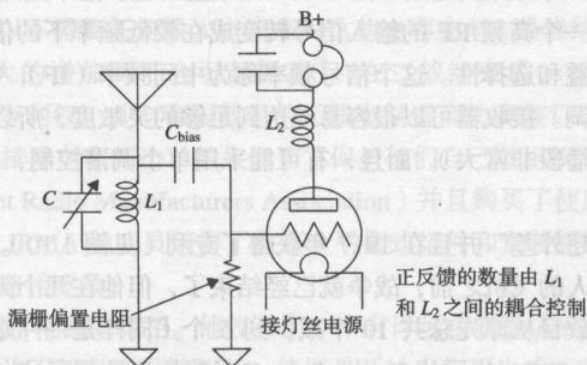


图 1.9 Armstrong 再生接收器

在 1914 年题为“三极真空管的工作特点”^③的论文中，Armstrong 首次发表了关于三极真空管是如何工作的正确解释，并提供了实验证据来支持他的论点。在这篇论文之后他又发表了另一篇论文（“三极真空管接收器当前进展”）^④，在这篇论文中他还附带解释了再生放大器/探测器的工作，并且显示了如何用它来构成一个振荡器。这篇论文是一个论述清晰的典范并且对于现代的读

① 他的美国专利 1,159,209 号在 1912 年 8 月申请，在 1915 年 11 月 2 日被批准，它描述了一个三极真空管振荡器，因此实际上甚至比 Armstrong 的有文档证明的工作更早。

② 他经公证的笔记本登记的日子实际为 1913 年 1 月 31 日。

③ *Electrical World*, 12 December 1914.

④ *IRE Proceedings*, v. 3, 1915, pp. 215-47.