

晶体管电路

下 册

第 二 版

黄昌宁 夏莹 改编

科学出版社

PDG



第七章 模拟集成电路基础.....	531
第一节 集成化元件的结构特点.....	581
一、集成化晶体管	582
二、集成化的无源元件	586
小结	592
第二节 基本单元电路.....	592
一、差动输入级	593
二、电流源电路	606
三、中间级	617
四、输出级	625
第三节 集成运算放大器的典型电路.....	630
一、集成运算放大器 BG305	630
二、集成运算放大器 F007	636
三、集成电压比较器 BG307	643
第四节 运算放大器的参数规范及测试方法.....	649
一、集成运算放大器的检测	651
二、参数规范及测试方法	653
参考文献.....	673
第八章 集成运算放大器的应用.....	674
第一节 运算放大器的理想模型.....	674
一、理想模型	674
二、基本结论	675
第二节 运算放大器的三种基本组态.....	677
一、反相输入组态	677
二、同相输入组态	683
三、差动输入组态	691
第三节 误差分析.....	704
一、失调和漂移误差	705

二、闭环增益误差	713
三、共模误差	719
第四节 信号运算电路	726
一、积分和微分放大器	727
二、对数和反对数放大器	740
三、乘法和除法放大器	743
*附录: 利用运算放大器求解微分方程	748
第五节 有源校正和调节器	756
一、比例-积分校正	756
二、比例-微分校正	762
三、比例-积分-微分校正	768
第六节 有源滤波器	773
一、低通滤波器	773
二、高通滤波器	781
三、带通滤波器	787
四、带阻滤波器	790
第七节 电压比较器	795
一、单限比较器	796
二、迟滞比较器(施密特触发器)	799
三、双限比较器	805
四、比较器的应用	806
参考文献	815
第九章 自动稳零直流放大器	816
第一节 调制与解调的原理	816
一、调制式直流放大器怎样抑制漂移	816
二、调制器原理	817
三、解调器原理	825
第二节 调制器与解调器	827
一、机械斩波器	827
二、晶体管调制器	829
三、场效应管调制器	835
四、晶体管作为开关用的解调器	847
五、晶体管作为放大用的解调器——相敏放大器	850
六、二极管环形解调器	855
第三节 调制式直流放大器实用电路	859

一、温度变送器	859
二、JF-12 型晶体管放大器	866
三、自激振荡的调制式直流放大器	871
第四节 自动稳零直流放大器	876
一、调制式双通道放大器	876
二、动态校零放大器	879
三、HA2900 稳零集成运算放大器	882
本章小结	889
参考文献	889
第十章 功率放大器	890
第一节 从单管功率放大电路看功率放大的矛盾	890
一、什么是功率放大	890
二、单管变压器耦合功率放大电路	896
三、功率放大的矛盾	905
第二节 乙类推挽放大	906
一、乙类推挽放大电路的引出和工作原理	906
二、乙类推挽电路的图解分析	909
三、输出功率、效率、管耗和耐压的计算	912
四、计算举例	919
*五、设计举例	921
*附录：输出变压器的制造工艺	926
第三节 互补对称推挽功率放大器	936
一、一分二看变压器	936
二、互补对称式电路	936
三、无输出变压器的功率放大器 (OTL) 举例	940
四、无输出电容器的功率放大器 (OCL) 举例	948
五、集成功率放大器举例	950
*第四节 功率放大管的散热和并联	958
一、衡量散热能力的一个参数——热阻	959
二、热阻的计算	960
三、晶体管散热问题计算举例	962
四、晶体管并联时的考虑	964
五、晶体管并联后的均流问题	967
*第五节 功率管的损坏和保护	970
一、由于热不稳定现象而损坏	970

二、由于超过晶体管的耐压而损坏	972
三、由于二次击穿现象而损坏	974
小结	979
第六节 伺服功率放大器	980
一、对功率输出级的要求	980
二、伺服功率放大器输出级的接法	981
三、设计、制造快速伺服放大器应注意的几个问题	984
本章小结	989
参考文献	990
第十一章 直流稳压电源	991
第一节 整流和滤波	992
一、单相半波整流和滤波	993
二、常用的整流滤波电路	997
三、整流滤波电路参数的选择	1006
四、复式滤波器	1010
小结	1014
*附录一：整流滤波电路的参数和曲线	1017
*附录二：小功率电源变压器的设计与制造	1021
第二节 直流稳压电源	1026
一、硅稳压管稳压电路	1027
二、串联型晶体管直流稳压电源	1036
三、串联型晶体管稳压电源的设计	1045
四、稳压电源的调试步骤及安装测试中的注意事项	1050
*第三节 串联型稳压电源的稳定度计算及改善电源性能的措施	1057
一、稳压电源稳定度的计算及其改善措施	1058
二、提高稳压电源温度稳定性的措施	1068
三、扩大稳压电源输出电压调节范围的措施	1071
四、稳压电源的安全措施——过流保护	1073
五、提高稳压电源效率的措施——开关型稳压电源	1080
第四节 集成稳压电源及其它应用电路	1085
一、集成稳压电源	1086
二、精密电路稳压电源	1089
三、放大部分为“直流源负载”的稳压电源	1092
四、两级差动放大、集电极输出型稳压电源	1096

五、采用辅助电源 U_0 的晶体管稳压电源	1097
六、高稳定度的稳压电源	1098
七、宽范围可调的稳压电源	1099
第五节 换流器和直流变换器	1102
一、单管间接振荡式的换流器和直流变换器	1102
二、推挽式多谐振荡的换流器和直流变换器	1106
参考文献	1115
检查试卷	1116
试卷答案	1131
本书部分习题答案	1137

注：章节标题前面注有“*”号的是用小字排印的内容。

第七章 模拟集成电路基础

内 容 提 要

同分立元件相比,大多数集成化元件的参数误差大,温度稳定性也较差,但在同一块硅片上生产的相邻元件却具有良好的匹配性能;此外,集成工艺目前还无法生产电感和大容量的电容。这些因素形成了模拟集成电路的独特风格,它们大都以直接耦合的参数补偿式电路为基础。

本章首先说明集成化元件的工艺结构和性能特点,进而通过集成电路的一些基本单元,阐明模拟集成电路的一般设计思想,最后介绍几个典型的集成运算放大器及其参数规范,为下一章讨论运算放大器的应用打好基础。

第一节 集成化元件的结构特点

集成电路是六十年代初期发展起来的一种新型电子器件,它采用同硅平面晶体管相类似的掩模光刻、扩散和外延等生产工艺,把晶体管、二极管、电容、电阻等元件和它们之间的连接线等整个电路集成在一块半导体基片上,封装在一个管壳内,构成一个完整的、具有一定功能的电路,所以又叫做固体组件。和传统的分立元件电路相比,集成电路的元件密度高,体积小,重量轻,进一步推动了电子设备的微型化过程;同时由于外部焊点大大减少,互连线缩短,从而也大大提高了设备的可靠性,降低了生产成本。

然而采用集成工艺制造的晶体管、电阻、电容等元件,不仅参数的离散性很大,而且PN结的反向击穿电压低,温度系数又大,所以集成化技术起初只能在数字逻辑电路(如TTL电路)中得到广泛应用,因为在逻辑电路中,晶体管通常工作在“开”、“关”状态

下,对元件参数的精确性并无严格要求。

随着集成工艺的发展,1964年美国首先制造出第一个单片集成运算放大器产品 $\mu A702^*$,它利用同一块集成电路上相邻元件的参数所固有的匹配性能,采用差动电路作为放大器的输入级,从而使电路的偏置和温度稳定性主要取决于元件参数的匹配程度而极少依赖于参数值本身。 $\mu A702$ 作为集成运算放大器的雏型,为模拟集成电路的大量生产开辟了道路。

为了更好地了解集成电路的特点,有必要粗浅地介绍一下集成化元件的构造和性能。

一、集成化晶体管

1. NPN 晶体管

在组成一个模拟集成电路的各种元件中,NPN 晶体管不仅数量最多,而且它们的质量对放大器的性能影响最大,因此在集成电路中,NPN 晶体管的生产工艺比起其他的集成化元件来必然占有主导地位。

图 7-1 表明,集成化的 NPN 晶体管和分立元件的硅平面型 NPN 晶体管具有基本相同的工艺结构,不同的是:

(1) 由于集成化晶体管同其他许多器件制作在一块硅片上,因此这些元件相互之间以及它们同公共的衬底之间均存在着寄生参数的影响。这些因素使得集成化晶体管的高频性能下降,分立元件的晶体管则不存在这种不利的影响。

(2) 由于工艺条件完全相同,在同一块衬底材料上制作的相邻的晶体管通常具有精良的匹配特性。例如, β 的相对偏差小于 $\pm 10\%$, U_{be} 的偏差小于 $\pm 2mV$,等等。

2. PNP 晶体管

利用 NPN 管的生产工艺,在同一块硅片上制作性能优良的

* $\mu A702$ 是美国 Fairchild 公司的产品,七十年代初我国仿制,型号为 F001 (或 5G922, BG301, FCI 等)。

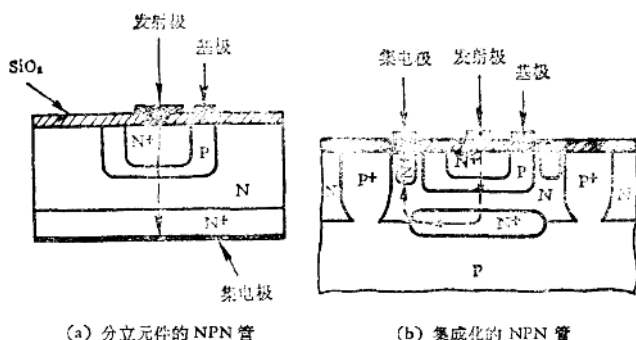


图 7-1 NPN 晶体管

PNP 管比较困难。因此在早期的模拟集成电路中，几乎无法发挥 NPN 和 PNP 管互补电路的优越性，随着集成工艺的发展，这个难题获得了部分解决，目前已能生产图 7-2 所示的两种 PNP 晶体管。

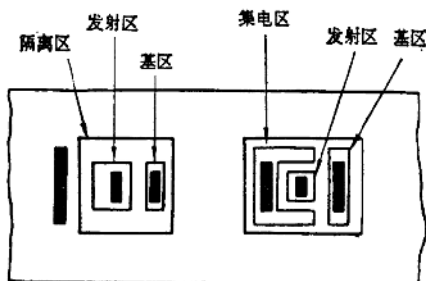
(1) 衬底 PNP 晶体管

衬底 PNP 管的集电极是公共的 P 型衬底。在制作 NPN 管的 P 型基区时，同时制作了衬底 PNP 管的发射区。由于载流子是沿着晶体管断面的垂直方向运动的，所以又叫做纵向 PNP 管。这一点同图 7-1 所示的 NPN 管是一样的，换句话说，无论是分立元件还是集成化的 NPN 管都只有纵向结构。

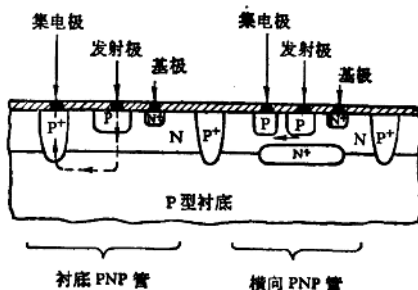
根据 PN 结隔离的要求，P 型衬底必须接到整个电路电位最低的一端，所以衬底 PNP 管在电路中通常只能作为射极跟随器（即共集电极电路）使用。此外，衬底 PNP 管的基区（相当于 NPN 管的集电区）较宽，它的电流放大系数 β 一般小于 50，而且高频性能 (f_T 约 10 MHz) 也比 NPN 管差。

(2) 横向 PNP 晶体管

横向 PNP 管的 P 型发射区和集电区是在制作 NPN 管的 P 型基区时同时形成的，它的 N 型基区则对应于 NPN 管的集电区。由于它的载流子是沿着断面的水平方向运动的，故得名为横向 PNP 管。



(a) 顶视图(涂黑的部分表示金属电极)



(b) 断面图

图 7-2 两种集成化 PNP 晶体管

由于受到掩模光刻工艺水平的限制,横向 PNP 管的集电区与发射区之间的间隔不可能做得太小(一般在十几到几十微米之间),所以它的 β 值极低(典型值为 3—5),频率特性也很差(f_T 约在 1 MHz 左右)。但它的结构特点却使它的 $b-e$ 结和 $b-c$ 结一样具有较高的反向击穿电压,一般可达到 80V 以上,比一般的 NPN 管的 $b-e$ 结反向击穿电压(约 5—7V)高得多。在模拟集成电路的设计中,如果将普通的 NPN 管和横向 PNP 管接成共射-共基组态或其他复合组态,不仅可以弥补横向 PNP 管 β 低、频响差的缺陷,而且充分发挥了它反向击穿电压高的特长,将形成各种性能优良

的放大电路。

由于横向 PNP 管在电路中的接法不受限制,所以它比前述的衬底 PNP 管有用得多。

(3) 多极晶体管

利用集成工艺,很容易根据电路设计人员的要求制造出多发射极或多集电极的多极晶体管。

在模拟集成电路中用得比较多的是图 7-3 所示的多集电极横向 PNP 晶体管。它相当于两个发射结并联在一起的 PNP 晶体管。

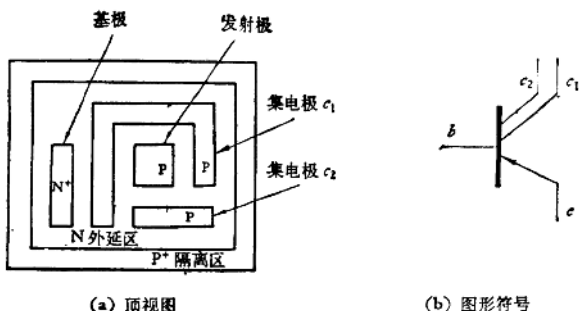


图 7-3 多集电极横向 PNP 晶体管

在电路中,这种多极 PNP 管通常接成恒流源使用。为了减小由于 β 值的制造偏差所造成的恒流源输出电流的偏差,常常将多极 PNP 管按图 7-4 的接法形成内部的电流负反馈。图中 I_b 是基极电流, I_a , I_{a1} 分别是集电极 c_1 和 c_2 的电流,假设它们的电流放大系数分别为 β_1 和 β_2 , 即 $I_{a1} = \beta_1 I_b$, $I_{a2} = \beta_2 I_b$ 。现在把上述接线的多极 PNP 管等效为一个普通的 PNP 管,其等效的基极电流和集电极电流分别为 I_B 和 I_a , 则等效的电流放大系数

$$\beta = \frac{I_a}{I_B} \quad (7-1)$$

假设两个集电区 c_1 和 c_2 的面积比为 N , 则在相同的 I_b 下, 两个集电极电流之比等于对应的集电区面积比 N , 即

$$\frac{I_{c1}}{I_{c2}} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = N \quad (7-2)$$

由于 $I_B = I_b + I_{c2}$, 所以

$$\beta = \frac{I_{c1}}{I_B} = \frac{I_{c1}}{I_b + I_{c2}} = \frac{N}{\frac{1}{\beta_2} + 1} \quad (7-3)$$

如果令 $\beta_2 \approx 1$ (即 $I_{c2} \approx I_b$), 则上式简化为

$$\beta \approx \frac{N}{2} \quad (7-4)$$

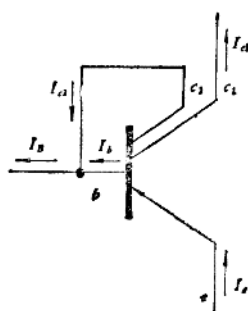


图 7-4 具有内部电流负反馈的横向 PNP 管

式(7-4)表明, 在 $\beta_2 \approx 1$ 的条件下, 等效 PNP 管的电流放大系数将近似正比于两个集电区的面积比 N 。换句话说, 等效 PNP 管的 β 值是比较稳定的, 这种稳定的含意当然也可以通过电流负反馈来解释, 即不论是工艺因素还是环境温度引

起的 β_1 和 β_2 的变化, 借助电流负反馈都得到了了一定程度的补偿。

二、集成化的无源元件

1. 二极管

在模拟集成电路中, 通常把 NPN 晶体管的集电极和基极短

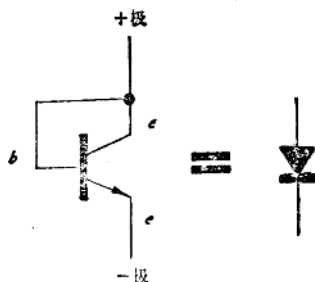


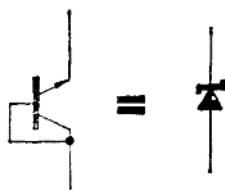
图 7-5 b-c 结二极管的图形符号

接以后形成所谓的 $b-e$ 结二极管,如图 7-5 所示。

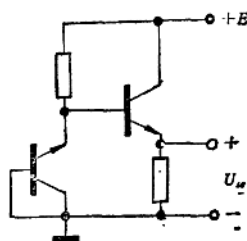
值得注意的是,这种 $b-e$ 结二极管的反向击穿电压通常只有 5—7V,虽然在大多数场合下这个指标已能满足电路的要求。

2. 稳压管

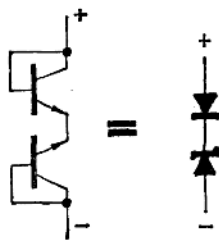
反向击穿电压比较低的 $b-e$ 结二极管可以作为稳压管来使用,它的动态内阻约为 $60-100\ \Omega$,电压温度系数约为 $+2\text{mV}/^\circ\text{C}$ (即 $+3\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 左右)。



(a) 图形符号



(b) 利用射极跟随器以减小动态电阻



(c) 具有温度补偿的稳压管

图 7-6 集成化稳压管

图 7-6(a) 是集成化稳压管的图形符号。图(b)是利用射极跟随器来减小稳压管动态内阻的原理,但这时跟随器输出电压的温度系数增大为 $+4\text{mV}/^\circ\text{C}$ 左右,原因是跟随器晶体管的发射结处于正向偏置,它的 U_{be} 温度系数约为 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。图(c)利用另外

一个正向偏置 PN 结所具有的负温度系数，对稳压管进行温度补偿，从而获得较佳的温度特性。但是采用这种补偿原理，增加了稳压管的动态内阻。不言而喻，为了造成动态电阻和温度漂移都更小的稳压电路，应将图 (b) 和图 (c) 所示的两种措施结合起来。

3. 电阻

常见的集成化电阻元件，包括半导体扩散电阻和金属膜电阻两大类。

(1) 扩散电阻

利用集成工艺制造的三种扩散电阻，分别称为基区电阻、发射区电阻和窄基区电阻，它们的结构如图 7-7 所示。最常用的基区电阻，它的阻值范围约为 100Ω — $20k\Omega$ ，阻值与标称值之间的误差约为 $\pm 20\%$ 、温度系数约为 $+0.2\%/^{\circ}\text{C}$ 。发射区的电阻率很低，因此发射区电阻的阻值也很低，约为 20 — 100Ω 。窄基区电阻的阻值最高，大约可以达到 10 — $500k\Omega$ ，这是因为它的导电通路的有效截面被 N 型发射区大大压缩。然而它的阻值误差一般达到 -50 — $+100\%$ ，温度系数也比其他两种扩散电阻大，约为 $+1\%/^{\circ}\text{C}$ 。

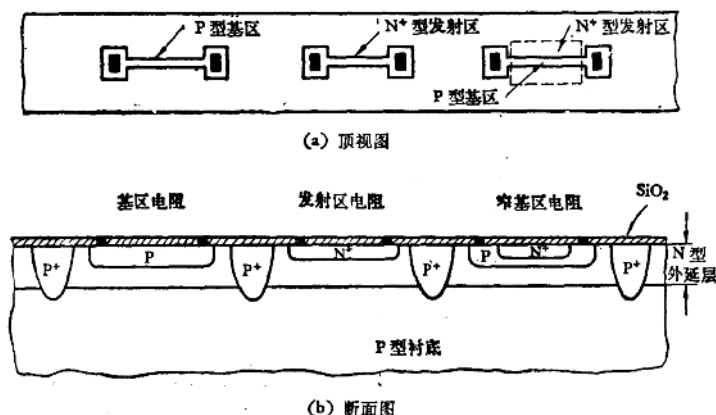


图 7-7 三种半导体扩散电阻的结构形式

然而,在同一块硅片上几何尺寸相同的两个相邻的电阻,阻值可以较好地匹配,它们之间的阻值误差大约在 $\pm 3\%$ 以内。

(2) 金属膜电阻

集成工艺中的金属化技术不仅可以用来制作器件的电极和相互连线,还可以在表面氧化层上面制作金属膜电阻。用来制作金属膜电阻的合金材料有:镍-铬、硅-钼、硅-铬等。金属膜电阻的特点是具有较低的温度系数,约为 $-0.01\%/^{\circ}\text{C}$,而且比扩散电阻具有更加优良的匹配性能。

根据以上讨论可以引伸出两条有用的结论:其一是在集成电路中应当充分发挥电阻元件匹配性能好的特点;其二是应当尽量避免采用高值电阻,因为这种元件不仅占用较大的硅片面积,而且成本也高于普通晶体管。

4. 电容

$b-c$ 结电容和 MOS 电容是两种常见的集成化电容,其工艺结构如图 7-8 所示。

一般说来,任何一个反向偏置的 PN 结都可以当作电容器来使用。图中表示的是 $b-c$ 结电容,在单位面积内它的电容量较高,但反向击穿电压也只有 5—7V。PN 结的电容量与结面积成正比,但随着反向电压的增加,空间电荷区加宽,电容量将减小。后面的这种特性使它可以作为振荡或调谐电路中的压控元件来使用。必须指出,PN 结电容只有在反向偏置的条件下才有实用价值,因为处于正向偏置的 PN 结阻抗极低,可见 PN 结电容是有极性的电容器。

另一种集成化电容是利用二氧化硅保护层作为绝缘介质的 MOS (金属-氧化物-半导体)电容,又叫氧化物介质电容。它以覆盖在氧化层上面的铝箔作为上极板,以紧贴着氧化层的 N 型硅作为下极板,构成一个平行板电容器。MOS 电容具有较高的击穿电压。

由于集成化电容器的电容量几乎和它所占用的硅片面积成正

比,因此在集成电路中目前仍只限于使用容量很小(小于 200 pF)的电容器。

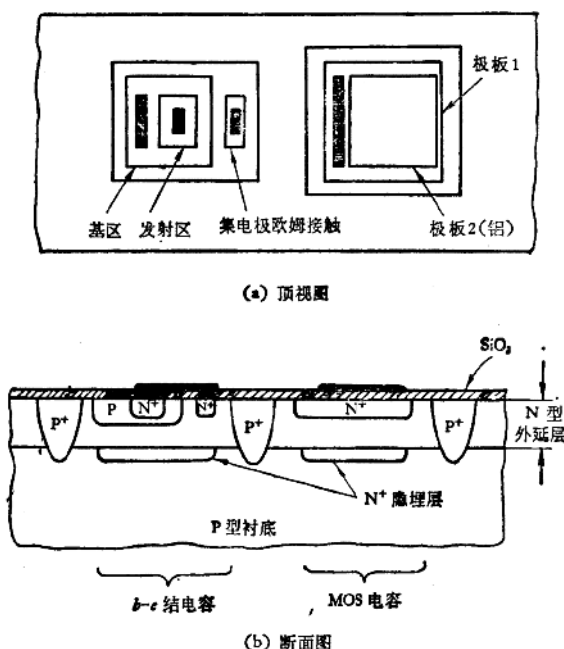


图 7-8 两种集成化电容的结构形式

集成化电容器的另一个缺点是存在寄生参数的影响。如图 7-8 所示,这些集成化电容器通常至少有一个极板是和衬底上的某些区域连接在一起的,因此不可避免地会在这些部位产生寄生电容效应。

最后,同其他集成化器件一样,集成化电容器的电容量也存在较大的偏差,通常达到 $\pm 50\%$ 左右。由于这些原因,在模拟集成电路中往往只适用于对电容量没有严格要求的场合,例如运算放大器的相位补偿和高频旁路等。

表 7-1 部分集成化元件的参数特点

元 件 参 数	典 型 值	公 差	温度系数
NPN 晶体管	电流增益 β	20—100	$-30\% \sim +50\%$
	相邻管的 $\frac{\Delta\beta}{\beta}$	$\pm 10\%$	
	发射结正向压降 U_{be}	$\pm 3\%$	$-2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
	相邻管的 ΔU_{be}	$\pm 2\text{mV}$	$\pm 10\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
基区扩散电阻	电阻值 R	$\pm 20\%$	$+0.2\%/^{\circ}\text{C}$
	相邻电阻的 $\frac{\Delta R}{R}$	$\pm 3\%$	$\pm 0.005\%/^{\circ}\text{C}$
PN 结电容	电 容 量 C	$\pm 50\%$	