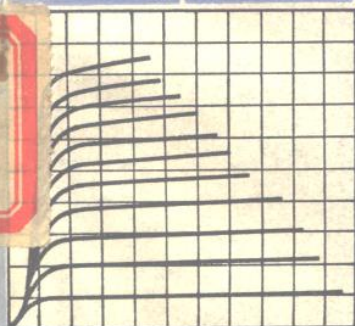


半导体手册  
第 6 編



# 晶体三极管 晶体二极管 的特性



科学出版社

73.67072  
157  
6:1

《半导体手册》第6編

晶体二极管和  
晶体三极管的特性

《半导体手册》翻译组译

3K500/23



## 毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

外国有的，我們要有，外国沒有的，我們也要有。

对于外国文化，排外主义的方針是錯誤的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借鏡；盲目搬用的方針也是錯誤的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

## 译者的话

本书是根据〔日〕半导体手册编委会编《半导体手册》1963年初版本译出。内容包括半导体物理学、半导体材料、晶体二极管和晶体三极管的工作原理、晶体二极管和晶体三极管、特种半导体器件、晶体二极管和晶体三极管特性、半导体电路理论、线性放大、振荡、调制与解调、脉冲电路、数字电路、电源、微波电路、参量放大器、数据等16编。

本书于1966年已全部译完，因工作量较大，未能及时出版。最近，我们征求读者意见，认为做为一般了解和查阅半导体电子技术的参考书，还应出版。我们遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，为适应读者的要求，又继续进行审查校对，现将其单行出版。

本书主要特点是将半导体基础知识和应用技术综合汇编在一起的半导体电子技术的资料性参考书。书中在基础知识方面涉及的范围较为广泛，在应用技术方面介绍的比较全面，各编重点不一样，仅供读者参考。

原书中主要缺点表现在：有些编的内容尚有形式化的数学推导较多，物理分析较少；有些编在讲解概念和理论分析上有些模糊；有些编在文字和数字上有错误；有些编则为一些资产阶级学术权威和厂商吹嘘、捧场；有些编内容是从别的资料中传抄过来的，未经过实践验证。我们遵照伟大领袖毛主席“一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收”的教导，加以删

节和校正。

本书在译校过程中,很多工厂、学校、科研单位给予了很大的支持和热情帮助,并提出不少宝贵意见,我们对这些单位表示衷心的感谢。

由于外文、专业知识的限制,在文字翻译及技术概念的表达上不免会有错误,又由于我们毛泽东思想学习的不够好,所以对原书中的其他错误观点及存在的问题,未能指出和很好的批判,恳切希望广大读者批评指正。

87100

# 目 录

## 第一章 晶体二极管的特性.....(1)

### 1.1 晶体二极管的静态特性 .....(1)

#### 1.1.1 一般静态特性 .....(1)

#### 1.1.2 静态特性随温度的变化 .....(6)

#### 1.1.3 在高反向电压区域里的特性 .....(7)

#### 1.1.4 在高电导区域里的特性 .....(14)

### 1.2 晶体二极管的静态电容 .....(21)

#### 1.2.1 杂质浓度的分布 .....(21)

#### 1.2.2 静态电容对电压的依从关系 .....(22)

### 1.3 晶体二极管的频率特性 .....(29)

### 1.4 晶体二极管的等效电路 .....(35)

### 1.5 晶体二极管的容许功率损耗 .....(38)

#### 1.5.1 容许功率损耗与容器温度的关系 .....(39)

#### 1.5.2 晶体二极管的热阻 .....(40)

### 1.6 晶体二极管的可靠性和稳定性 .....(42)

### 1.7 晶体二极管的噪声 .....(47)

#### 1.7.1 晶体二极管的噪声源 .....(47)

#### 1.7.2 可变电阻二极管的噪声 .....(49)

#### 1.7.3 隧道二极管的噪声 .....(49)

## 第二章 晶体三极管的特性.....(52)

### 2.1 晶体三极管的静态特性 .....(52)

#### 2.1.1 一般静态特性 .....(52)

#### 2.1.2 电子雪崩区域的静态特性 .....(54)

|       |                                         |       |
|-------|-----------------------------------------|-------|
| 2.2   | 晶体三极管的小信号参数及其等效电路                       | (57)  |
| 2.2.1 | 作为四端网络的一般表示方法                           | (57)  |
| 2.2.2 | 晶体三极管的器件参数                              | (61)  |
| 2.3   | 晶体三极管的频率特性                              | (76)  |
| 2.3.1 | $h_{21,b}$ , $h_{21,e}$ , $\alpha$ 截止频率 | (76)  |
| 2.3.2 | $h_{11,e}$ , $h_{11,b}$ 的频率特性           | (80)  |
| 2.4   | 晶体三极管的温度特性                              | (82)  |
| 2.4.1 | 静态特性随温度的变化                              | (82)  |
| 2.4.2 | 热漂移                                     | (85)  |
| 2.4.3 | $h$ 参数的变化                               | (87)  |
| 2.5   | 晶体三极管的噪声                                | (88)  |
| 第三章   | 晶体三极管的大信号工作原理                           | (91)  |
| 3.1   | 大信号脉冲的工作理论 (I)                          | (91)  |
| 3.1.1 | 工作区域的划分                                 | (91)  |
| 3.1.2 | 直流特性                                    | (92)  |
| 3.1.3 | 晶体三极管内部的电荷分布                            | (95)  |
| 3.2   | 大信号脉冲的工作理论 (II)                         | (97)  |
| 3.2.1 | 延迟时间                                    | (99)  |
| 3.2.2 | 上升时间                                    | (100) |
| 3.2.3 | 存储时间                                    | (100) |
| 3.2.4 | 下降时间                                    | (102) |
| 3.2.5 | 电荷控制理论的应用                               | (102) |
| 3.2.6 | 利用任意电流波形的激励                             | (104) |
| 3.2.7 | 集电结电容和基区过渡相移的分析                         | (106) |
| 3.2.8 | 几点补充                                    | (108) |
| 3.3   | 实际的大信号开关特性                              | (113) |
| 3.3.1 | 合金型晶体三极管和漂移型晶体三极管                       | (113) |
| 3.3.2 | 表面势垒型微合金扩散晶体三极管                         | (113) |
| 3.3.3 | 台面型晶体三极管                                | (117) |

|            |                          |              |
|------------|--------------------------|--------------|
| 3.3.4      | 外延台面型晶体三极管               | (119)        |
| 3.4        | 晶体三极管的正弦波大信号工作原理         | (121)        |
| 3.4.1      | C类工作与高次谐波的发生             | (121)        |
| 3.4.2      | 大信号导纳                    | (123)        |
| 3.4.3      | 小信号正弦波与大信号正弦波的重迭(频率变换作用) | (126)        |
| <b>第四章</b> | <b>晶体二极管和晶体三极管的测量</b>    | <b>(128)</b> |
| 4.1        | 静态特性的测量                  | (128)        |
| 4.1.1      | 概说                       | (128)        |
| 4.1.2      | 直接观察装置                   | (128)        |
| 4.2        | 小信号参数的测量                 | (131)        |
| 4.2.1      | 低频四端网络参数的测量              | (131)        |
| 4.2.2      | 高频四端网络参数的测量              | (133)        |
| 4.2.3      | 器件参数的测量                  | (137)        |
| 4.2.4      | $r_{bb'}$ , $C_c$ 的测量    | (138)        |
| 4.2.5      | $f_{ab}$ 和 $f_T$ 的测量     | (139)        |
| 4.2.6      | 在超高频下的测量                 | (141)        |
| 4.2.7      | 结电容的测量                   | (142)        |
| 4.3        | 大信号参数的测量                 | (143)        |
| 4.3.1      | 开关特性的测量                  | (143)        |
| 4.3.2      | 基区存储电荷量的测量               | (148)        |
| 4.3.3      | 晶体二极管的过渡特性               | (149)        |
| 4.4        | 噪声的测量                    | (154)        |
| 4.4.1      | 信号发生器(SG)法               | (154)        |
| 4.4.2      | 噪声源法                     | (155)        |
| 4.5        | 热阻的测量                    | (157)        |
| 4.5.1      | 概说                       | (157)        |
| 4.5.2      | 结温测量法(I)                 | (157)        |
| 4.5.3      | 结温测量法(II)                | (158)        |
| 4.5.4      | 最大容许功率损耗                 | (161)        |

|       |                          |       |
|-------|--------------------------|-------|
| 4.6   | 晶体三极管其他参数的测量.....        | (161) |
| 4.6.1 | $f_{osc\ max}$ 的测量 ..... | (161) |
| 4.6.2 | 功率增益的测量 .....            | (162) |
| 4.6.3 | 失真系数的测量 .....            | (163) |
| 4.7   | 特殊晶体二极管的测量.....          | (165) |
| 4.7.1 | 可变电容二极管的测量 .....         | (165) |
| 4.7.2 | 隧道二极管的测量 .....           | (170) |
| 参考资料  | .....                    | (175) |

# 第一章 晶体二极管的特性

## 1.1 晶体二极管的静态特性

**1.1.1 一般静态特性** 晶体二极管有点接触型、键合型和面结型三种。由于效率和电压-电流的关系,广泛使用的晶体三极管是面结型。而晶体二极管则不同,由于点接触型在性能上和经济上具有独特的优点,所以点接触型同键合型和面结型一样被广泛使用。

一般静态特性是指直流特性,同时也把市电频率的低频整流特性包括在内加以考虑。晶体二极管因通电方向的不同而有低电阻的正向和高电阻的反向,其整流特性如图 6.1 所示。

图 6.1 表示牺牲了最高反向电压而特别提高了正向特性的 Si 高电导型晶体二极管的特性。此外,还有根据用途的需要提高一部分特性而牺牲另一些特性的晶体二极管,如特别提高了最高反向电压的高反向电压二极管(图 6.2)和提高反向电阻而减少饱和电流的高反向电阻二极管或低漏泄电流二极管(图 6.3)等。

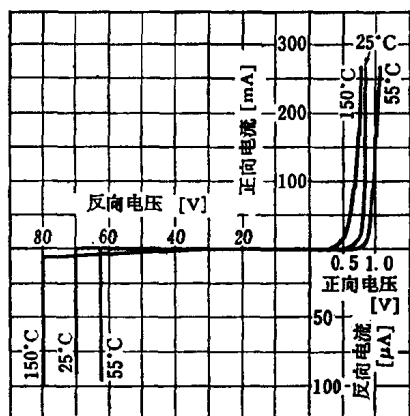


图 6.1 晶体二极管的静态特性

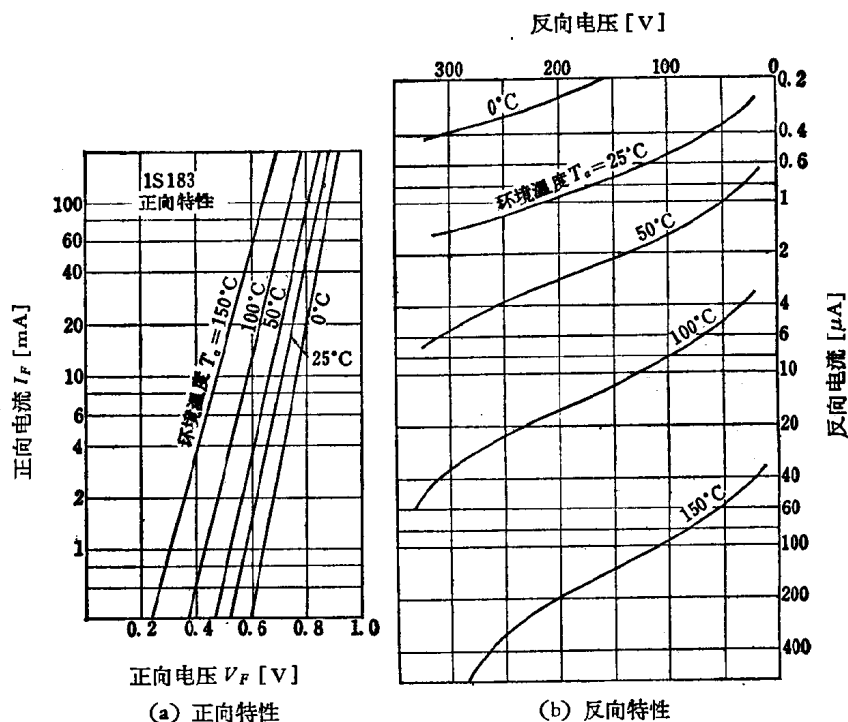


图 6.2 硅高反向电压晶体二极管的特性 (1S183)

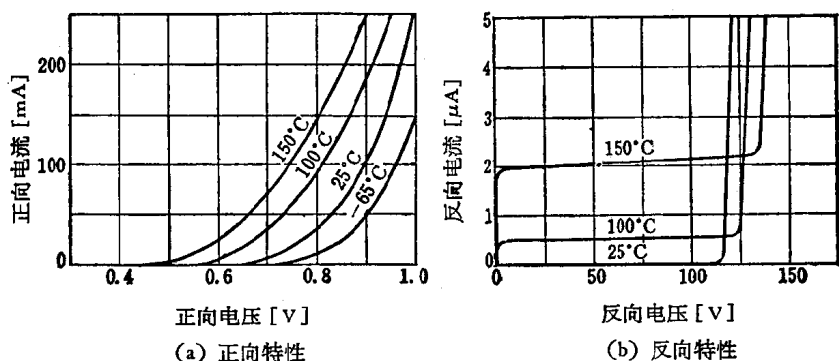
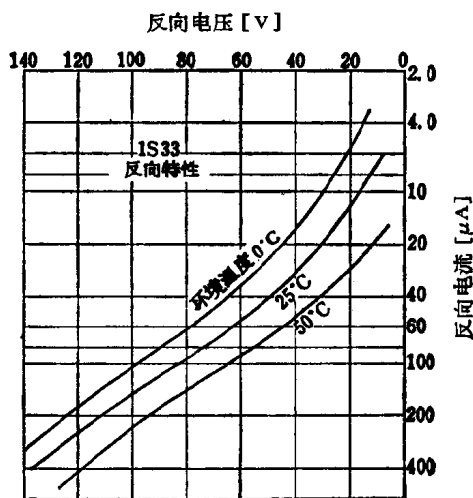
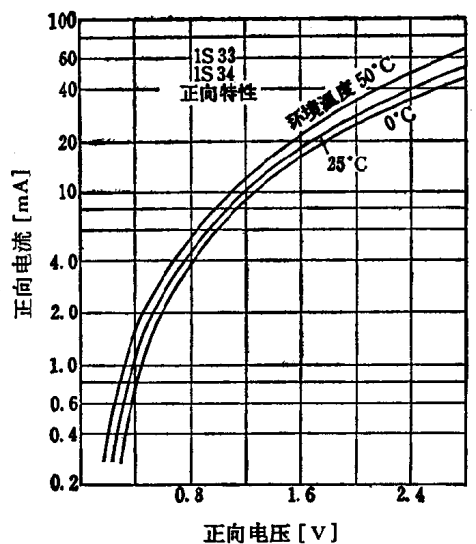


图 6.3 高反向电阻型或低漏泄电流型晶体二极管的特性  
(硅面结型晶体二极管 RD1359)

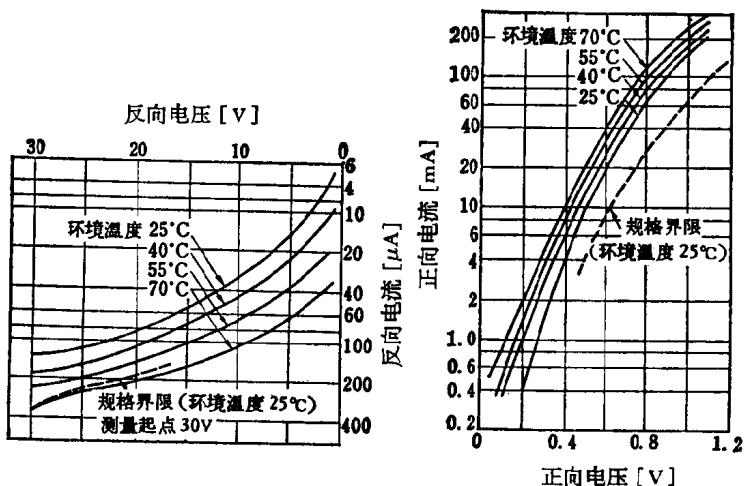
点接触型晶体二极管的整流作用是金属-半导体的接触整流作用和在内形成中所形成的 pn 结的整流作用相结合。键型晶体二极管的结构基本上和点接触型一样,但探针是用含有三价杂质 Ga 的 Au 丝或 Ag 丝制成的,并用脉冲电流使探针中的 P 型杂质扩散而形成 pn 结。用 Au 丝作探针的叫做金键二极管,用 Ag 丝作探针的叫做银键二极管。通常的 Ge 晶体二极管是金键或银键, Si 晶体二极管是银键。键合型晶体二极管由于在制造上容易控制特性,能形成明显的 pn 结,所以正向特性 [图 6·4(b)] 比点接触型 [图 6·4(a)] 良好;又由于同点接触型一样,结面积非常小,所以结电容比面结型小一个数量级,高频特性良好。

面结型晶体二极管有合金型、扩散型和生长型三种,生长型虽然反向特性良好,但由于扩展电阻太大而不能实际应用。面结型晶体二极管,工作温度范围很宽,能使用到温度约  $200^{\circ}\text{C}$ ,由于最大反向电压大,所以常用 Si 制成。面结型晶体二极管结面积大,所以适合于作低频整流用。图 6·5 是 Ge 面结型晶体二极管和 Si 面结型晶体二极管的特性比较。Si 面结型晶体二极管虽然正向特性不太好,但反向特性却非常良好。这是因为 Si 和 Ge 禁带宽度不同的关系, Si 的禁带宽度为 1.12 电子伏, Ge 的禁带宽度为 0.78 电子伏,因而 Si 面结型晶体二极管的反向饱和电流约为 Ge 面结型晶体二极管的  $1/1000$ 。相反, Ge 面结型晶体二极管的正向电流的上升比 Si 面结型晶体二极管优越 1.5 倍左右。

根据晶体二极管的直流静态特性,大致可以判断晶体二极管在低频情况下的整流特性,反向电流大致为正向电流的  $1/1000$ ,因而除了最大反向电压以外,其他整流特性几乎都取决于正向特性。图 6·6 是各种晶体二极管的整流特性的比较。



(a) 点接触型晶体二极管



(b) Ge 金键型晶体二极管

图 6.4 晶体二极管的电流-电压特性及其随温度的变化

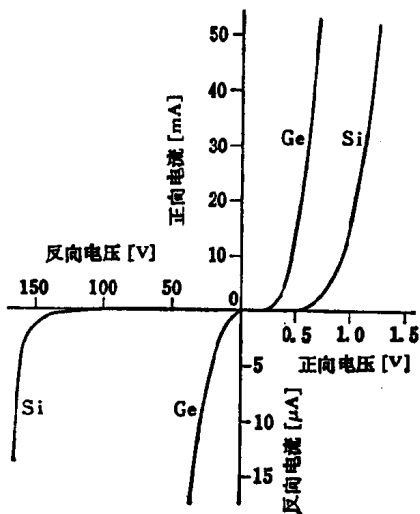


图 6.5

**1.1.2 静态特性随温度的变化** 一般来说,半导体对温度是非常敏感的。晶体二极管也不例外,特别是其反向特性

强烈地受到温度的影响。点接触型晶体二极管的伏安特性与温度关系和键合型的差别不大,面结型可以利用其正向的非线性或温度特性作为变阻器使用。图 6.7 所示是以反向电流(漏泄电流)特别小为特点的低漏泄晶体二极管(M 8477 A)温度特性的实例。高电导型由于电阻率低,温度的影响不大,所以电流的变化量小,可是,高反向电压型由于电阻率高,所以,由于热激发而引起的电阻的变化就大,从而使电流的变化量也比高电导型大 20—40%。

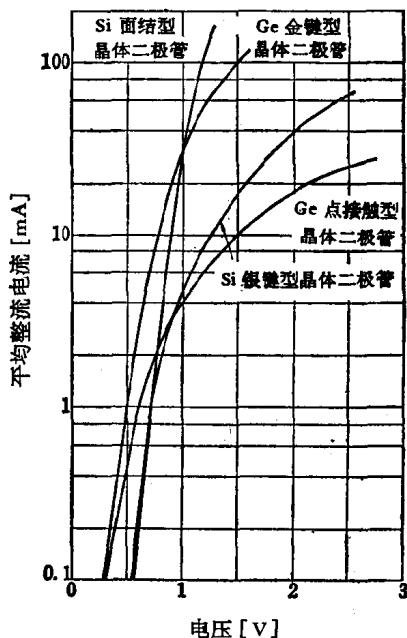


图 6.6 各种晶体二极管的整流特性的比较

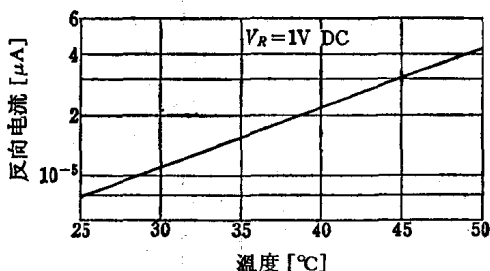


图 6.7 反向电流的温度特性  
(反向电流特别小的 M 8477 A 的曲线)

晶体二极管的正向电流可以用下式表示:

$$I = \text{常数} \cdot [\exp(qV/nkT) - 1] \quad (6.1)$$

在理论上  $n = 1$ , 但在实验上如图 6.8 所示,  $n \approx 1-1.3$  左右<sup>[1,2]</sup>.

**1.1.3 在高反向电压区域里的特性** 一般说来, 晶体二极管的反向电阻非常高, 所以即使加反向电压, 最初也只有很小的饱和电流通过. 如果再加更高的反向电压, 无论点接触型或面结型都会发生电流急剧增加的击穿现象. 这里所说的击穿现象, 是指除了热击穿以外的其他可逆的击穿现象, 并且这种击穿现象是针对在大电流情况下所消耗的功率不致烧坏晶体二极管而言的.

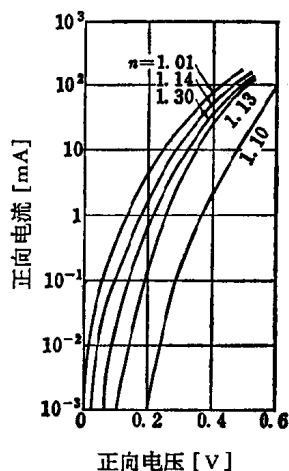


图 6.8

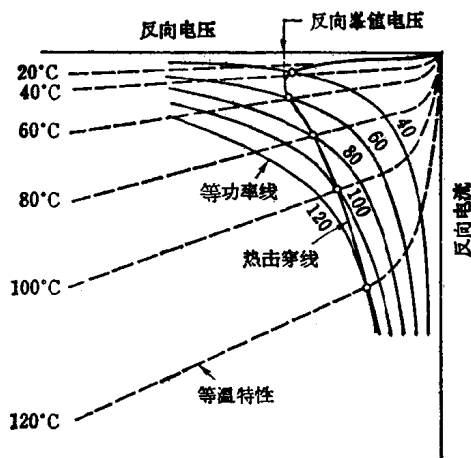


图 6.9 点接触型晶体二极管的热击穿特性

表 6-1 1W 型稳压二极管 1S 220-1S 261 额定值

| 型 号     | 控 制 电 压<br>$V_{z(1)}$ |              | 最大工作电阻<br>$1_{rd}$ |                            | 最大工作电阻<br>$2_{rd}$ |                            | ④<br>最大电流<br>[毫安] | 温 度 系 数<br>[毫伏/°C] |    |    | 最大正向<br>压降 $V_F$<br>$I_F=0.2A$<br>[伏] | 最大饱和<br>电 流 $I_b$<br>$V_b=1V$<br>[微安] |
|---------|-----------------------|--------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|----|----|---------------------------------------|---------------------------------------|
|         | 标准<br>[伏]             | 测量电流<br>[毫安] | 最大<br>[欧]          | 测量电流<br>$I_{z(1)}$<br>[毫安] | 最大<br>[欧]          | 测量电流<br>$I_{z(2)}$<br>[毫安] |                   | 最小                 | 标准 | 最大 |                                       |                                       |
|         |                       |              |                    |                            |                    |                            |                   |                    |    |    |                                       |                                       |
| 1 S 220 | 4.5                   | 30           | 3                  | 30                         | 400                | 1.0                        | 181               | -3                 | -1 | 1  | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 221 | 5.5                   | 30           | 3                  | 30                         | 400                | 1.0                        | 158               | -2                 | 0  | 2  | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 222 | 6.5                   | 30           | 3                  | 30                         | 400                | 1.0                        | 139               |                    | 2  | 4  | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 223 | 7.5                   | 30           | 3                  | 30                         | 400                | 1.0                        | 122               |                    | 3  | 5  | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 224 | 8.5                   | 30           | 4                  | 30                         | 400                | 1.0                        | 108               |                    | 4  | 7  | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 225 | 9.5                   | 30           | 4                  | 30                         | 400                | 1.0                        | 98                |                    | 5  | 9  | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 226 | 11                    | 30           | 5                  | 30                         | 400                | 1.0                        | 83                |                    | 7  | 11 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 227 | 12                    | 30           | 6                  | 30                         | 400                | 1.0                        | 74                |                    | 8  | 13 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 228 | 13                    | 30           | 7                  | 30                         | 400                | 1.0                        | 70                |                    | 9  | 14 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 229 | 14                    | 30           | 9                  | 30                         | 400                | 1.0                        | 65                |                    | 10 | 16 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 230 | 15                    | 30           | 10                 | 30                         | 400                | 1.0                        | 61                |                    | 11 | 17 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 231 | 16                    | 10           | 12                 | 10                         | 400                | 1.0                        | 57                |                    | 12 | 19 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 232 | 17                    | 10           | 13                 | 10                         | 400                | 1.0                        | 53                |                    | 13 | 21 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 233 | 18                    | 10           | 15                 | 10                         | 400                | 1.0                        | 50                |                    | 14 | 23 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 234 | 19                    | 10           | 17                 | 10                         | 400                | 1.0                        | 48                |                    | 15 | 24 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 235 | 20                    | 10           | 19                 | 10                         | 400                | 1.0                        | 45                |                    | 16 | 26 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 236 | 22                    | 10           | 22                 | 10                         | 400                | 1.0                        | 41                |                    | 18 | 28 | 1.0                                   | 1.0                                   |
| 1 S 237 | 24                    | 10           | 25                 | 10                         | 500                | 1.0                        | 38                |                    | 20 | 32 | 1.0                                   | 1.0                                   |