



中华人民共和国国家标准

GB/T 4326—200×
代替 GB/T 4326 - 1984

非本征半导体单晶霍尔迁移率和 霍尔系数测量方法

Extrinsic semiconductor single crystals measurement of
Hall mobility and Hall coefficient

(讨论稿)

200×-××-××发布

200×-××-××发布

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会

发布

发布

前 言

本标准是对 GB/T 4326-2006 《非本征半导体单晶霍尔迁移率和霍尔系数测量方法》的修订。

本标准与原标准相比主要变动如下：

—— 在测量范围条款列举的材料中增加了磷化铟、铋化镓、铋化铟、硫化镉、氧化镓材料，扩大了本标准的适用范围；

—— 增加了磷化铟、铋化镓、铋化铟、硫化镉、氧化镓样品的制备方法；

—— 增加了规定磷化铟、铋化镓、铋化铟、硫化镉、氧化镓样品腐蚀方法的条款；

—— 增加了规定磷化铟、铋化镓、铋化铟、硫化镉、氧化镓样品电极制备方法的条款；

—— 本标准同样适用于高纯锗单晶材料，增加了高纯锗单晶材料试样的腐蚀方法及电极制备方法；

—— 增加了高纯锗单晶净杂质浓度 (N_A-N_D) 的计算方法。

本标准自实施之日起代替 GB/T 4326 - 2006 。

本标准由中国有色金属工业协会提出。

本标准由全国有色金属标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：有研国晶辉新材料有限公司、云南临沧鑫圆锗业股份有限公司、中国电子科技集团公司第十三研究所、中国科学院半导体研究所、中国电子科技集团公司第四十六研究所、广东先导微电子科技有限公司、大庆溢泰半导体材料有限公司。

本标准主要起草人：XX。

本标准由全国有色金属标准化技术委员会负责解释。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

—— GB/T 4326-1984 GB/T 4326-2006。

非本征半导体单晶霍尔迁移率和 霍尔系数测量方法

1 范围

本标准规定的测量方法适用于测量非本征半导体单晶材料的霍尔系数、载流子霍尔迁移率、电阻率和载流子浓度。

本标准规定的测量方法仅在有限的范围内对锗、硅、砷化镓、磷化镓、磷化铟、铋化镓、铋化铟、硫化镉、氧化镓、高纯锗单晶材料进行了实验室测量，其中高纯锗和铋化铟单晶材料需在 77K 温度下测量，其他材料在 300K 温度下进行测量。但该方法也可适用于其他半导体单晶材料，一般情况下，适用于室温电阻率高达 $10^8 \Omega \text{ cm}$ 半导体单晶材料的测试。

2 术语和定义

以下术语和定义适用于本标准。

2.1

电阻率 resistivity

电阻率是材料中平行于电流的电位梯度与电流密度之比。电阻率应在零磁通下测量。电阻率是材料参数中可直接测量的量。在具有单一类型载流子的非本征半导体材料中，电阻率与材料基本参数的关系如下：

$$\rho = (ne\mu)^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- ρ —— 电阻率， $\Omega \cdot \text{cm}$
- n —— 载流子浓度， cm^{-3} ；
- e —— 电子电荷值，C（库仑）；
- μ —— 载流子迁移率， $\text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 。

必须指出，对于本征半导体和某些 p 型半导体如 p-Ge（存在两种空穴），式（1）显然不适用，而必须采用如下关系式：

$$\rho = \sum_i (n_i e \mu_i)^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- n_i 、 μ_i —— 表示第 i 种载流子相关的量。

2.2

霍尔系数 hall coefficient

在半导体单晶材料试样上同时加上互相垂直的电场和磁场，则试样中的载流子将在第三个互相垂直的方向上偏转，在试样两侧建立横向电场，称之为霍尔电场，见图 1。霍尔系数是霍尔电场对电流密度和磁通密度之积的比。

$$R_H = \frac{E_y}{J_x \times B_z} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- R_H —— 霍尔系数， cm^3/C ；
- E_y —— 横向电场， V/cm ；
- J_x —— 电流密度， $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ；
- B_z —— 磁通密度，Gs。

对于主要是电子传导的 n 型非本征半导体，霍尔系数是负的；而对于主要是空穴传导的 p 型非本征半导体，霍尔系数是正的。

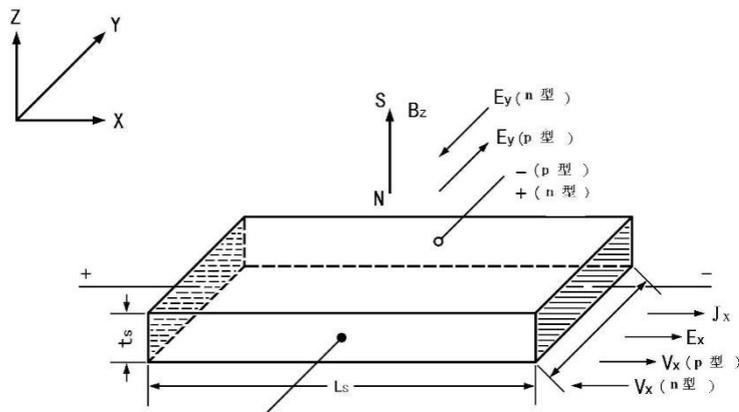


图 1 霍尔效应符号规定

2.3

霍尔迁移率 hall mobility

霍尔迁移率是霍尔系数的绝对值与电阻率之比。

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- μ_H —— 霍尔迁移率， $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ；
- R_H —— 霍尔系数， cm^3/C ；
- ρ —— 电阻率， $\Omega \cdot \text{cm}$ 。

3 方法原理

3.1 在具有单一型号载流子的非本征半导体中，霍尔系数与材料基本参数的关系如下：

$$R_H = \frac{r}{n \times q} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

R_H —— 霍尔系数， cm^3/C ；

r —— 霍尔因子；

n —— 载流子浓度， cm^{-3} ；

q —— 载流子电量， C 。

霍尔因子 r 是依赖于能带结构，散射机构，试样温度，磁通密度和试样晶向的比例因子，它的值通常接近于 1。在特定的情况下，为了精确地由所测量之霍尔系数确定载流子浓度，要求详细的 r 值的资料，但在许多情况下，这些资料是不知道的，只能估计 r 值。在进行比较测量时，测量者应取一致的 r 值。在缺乏其他资料时， r 通常可以取 1。

3.2 仅在一种载流子的情况下，霍尔迁移率才具有实际的物理意义。在这样的系统中，霍尔迁移率 μ_H 与电导迁移率之间存在如下的关系：

$$\mu_H = r \mu \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

μ —— 电导迁移率， $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

电阻率和霍尔系数是材料中可直接测量的量。只有当已知 r 值的情况下，根据霍尔系数和电阻率的测量值能够得到载流子迁移率的精确值。

为了将习惯上使用的不同单位制的量协调一致，必须以 $\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 表示磁通密度，即：

$$1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2} = 10^8 \text{ Gs}$$

4 样品

4.1 取样和研磨

试样自单晶锭切下，应注意试样必须是完全的单晶。切好的试样，必须用氧化铝或碳化硅沙料水浆研磨，消除机械损伤，并使试样具有均匀、平整光洁的表面，然后用清水冲洗干净。

4.1.1 磷化铟样品的制备

从磷化铟单晶切割厚度不超过 1.0mm 的晶片，晶片应用氧化铝进行研磨，获得均匀、平整的表面，然后用清水冲洗干净。在晶片中心部位取边长不超过 10mm 且不小于 5mm 的矩形样片，样片厚度均匀、表面无孔洞。

4.1.2 锑化铟样品的制备

从锑化铟单晶切割厚度不超过 1.0mm 的晶片，晶片应用氧化铝进行研磨，获得均匀、平整的表面，然后用清水冲洗干净。在晶片中心部位取边长不超过 10mm 且不小于 5mm 的矩形样片，样片厚度均匀、表面无孔洞。

4.1.3 碲化铟样品的制备

从碲化铟单晶切割厚度不超过 1.0mm 的晶片，晶片应用氧化铝进行研磨，获得均匀、平整的表面，然后用清水冲洗干净。在晶片中心部位取边长不超过 10mm 且不小于 5mm 的矩形样片，样片厚度均匀、表面无孔洞。

4.1.4 硫化铟样品的制备

从硫化铟单晶切割厚度不超过 1.0mm 的晶片，晶片应用氧化铝进行研磨，获得均匀、平整光洁的表面，然后用清水冲洗干净。推荐在晶片中心部位取边长不超过 20mm 且不小于 5mm 的矩形样片，样片表面平整、厚度均匀、表面无孔洞。

4.1.5 氧化铟样品的制备

从氧化铟单晶切割厚度不超过 1.0mm 的晶片，晶片应用金刚石进行研磨，获得均匀、平整光洁的

表面，然后用清水冲洗干净。推荐在晶片中心部位取边长不超过 20mm 且不小于 5mm 的矩形样片，样片表面平整、厚度均匀、表面无孔洞。

4.1.6 高纯锗单晶样品的制备

采用线切割机或者内圆（外圆）切片机等切割成型，用于测量净杂质浓度（ N_A-N_D ）的样品的最小横向长度应大于样品厚度的三倍，边长以 10mm 最佳。对于小样品，最佳形状为正方形或者长方形。样片表面平整、厚度均匀、表面无孔洞。切好的样品，所有 6 个面分别用从粗到细的金刚砂加适量去离子水后在光学平整的玻璃板上仔细研磨，直至样品表面的切割损伤完成消失，表面平整，使用去离子水冲洗干净。

4.2 试样的形状

4.2.1 试样可用机械加工方法加工成所需的形状，如平行六面体、桥形或薄片等。

4.2.2 平行六面体试样的图形示于图 2。试样的总长一般在 1.0 cm ~ 1.5 cm 之间，长宽比应大于 5，至少不要小于 4。

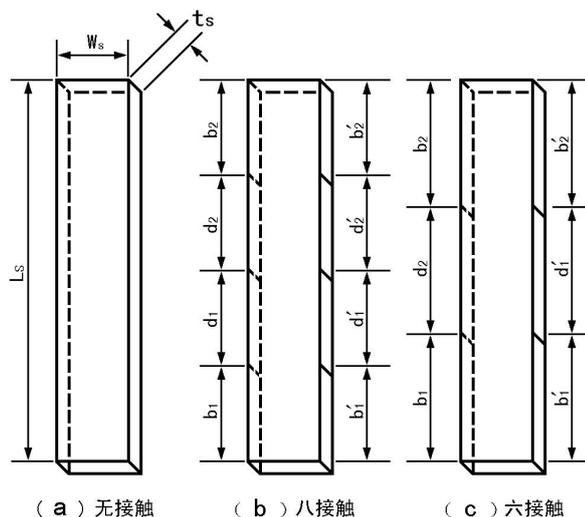


图 2 典型的平行六面体试样

4.2.3 桥形试样的图形示于图 3。

4.2.4 八接触试样对几何尺寸作如下要求，见图 3 中 (a) 和 (c)：

$$\begin{aligned}
 &L_s \geq 4W_s ; \quad W_s \geq 3a ; \quad b_1、b_2 \geq W_s ; \\
 &t_s \leq 0.1 \text{ cm} ; \quad C \geq 0.1 \text{ cm} ; \quad 1.0 \text{ cm} \leq L_s \leq 1.5 \text{ cm} ; \\
 &b_1 = b_1' \pm 0.005 \text{ cm} ; \quad b_2 = b_2' \pm 0.005 \text{ cm} ; \\
 &d_1 = d_1' \pm 0.005 \text{ cm} ; \quad d_2 = d_2' \pm 0.005 \text{ cm} ; \\
 &b_1 + d_1 = L_s/2 \pm 0.005 \text{ cm} ; \\
 &b_1' + d_1' = L_s/2 \pm 0.005 \text{ cm} ; \\
 &b_1 \approx b_2 ; \quad d_1 \approx d_2 。
 \end{aligned}$$

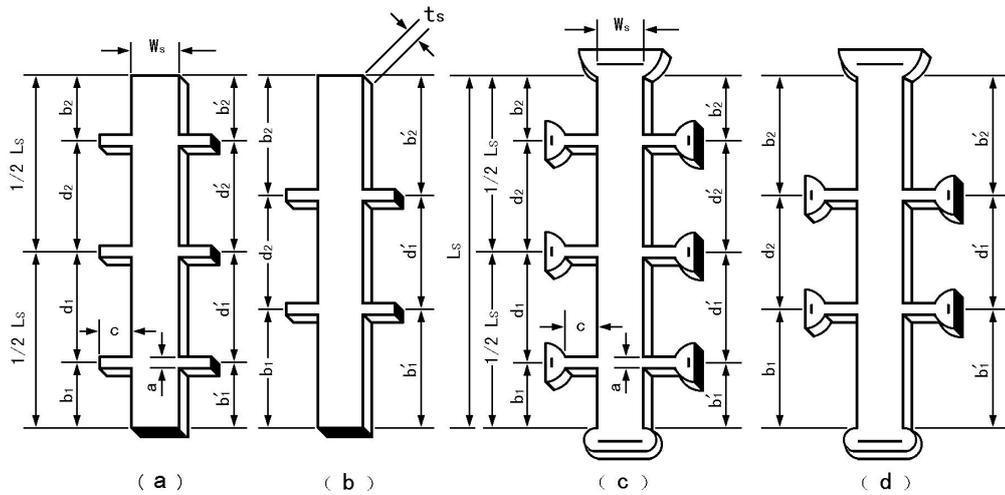


图 3 典型的桥形试样

4.2.5 六接触试样对几何尺寸作如下要求，见图 3 中 (b) 和 (d)

$$L_s \geq 5W_s ; \quad W_s \geq 3a ; \quad b_1、b_2 \geq 2W_s ;$$

$$t_s \leq 0.1 \text{ cm} ; \quad 1.0 \text{ cm} \leq L_s \leq 1.5 \text{ cm} ;$$

$$b_1 = b_1' \pm 0.005 \text{ cm} ;$$

$$b_2 = b_2' \pm 0.005 \text{ cm} ;$$

$$d_2 = d_1' \pm 0.005 \text{ cm} ;$$

$$b_1 \approx b_2 \text{ 。}$$

4.2.6 薄片试样可以是任意形状的，但推荐图 4 所示的对称图形的形状。如果把电极制备在同一面内，必须使用图 4 中 (b) 所示的图形。试样必须完全无孔洞。尺寸范围是：

$$L_p \geq 1.5 \text{ cm} ; \quad t_s \leq 0.1 \text{ cm} \text{ 。}$$

其中 L_p 是试样的周长。在测量各向异性材料时一般不使用这种形状的试样。

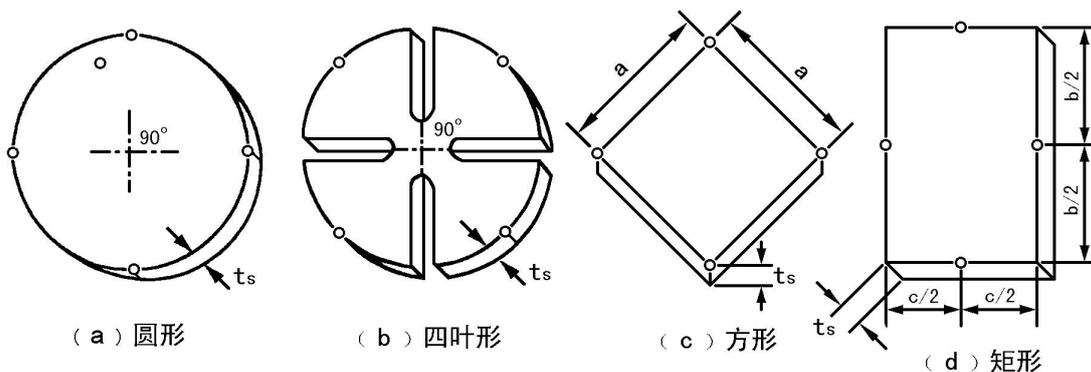


图 4 典型的对称薄片试样

4.3 腐蚀

成形的试样洗净后需经过腐蚀。

4.3.1 对硅单晶试样，推荐使用的腐蚀液是氢氧化钾溶液，在 90℃ 下腐蚀 3 min ~ 5 min。

4.3.2 对砷化镓单晶试样，推荐使用将硫酸、过氧化氢和纯水按体积比 3:1:1 混合而成的腐蚀液，在室温下腐蚀约 30 s ~ 50 s。

4.3.3 对磷化镓单晶试样，推荐使用将铁氰化钾溶液、氢溴酸和冰醋酸按体积比 1:1:1 混合成的腐蚀溶液，在 40 °C ~ 60 °C 度水浴中腐蚀 9 min ~ 11 min。

4.3.4 对磷化铟单晶试样，使用质量分数为 37% 的盐酸腐蚀 3min-5min，也可以用化学机械抛光代替腐蚀，得到光滑样品表面。腐蚀或抛光后的样品厚度应在 0.3mm-1.0mm 范围内。

4.3.5 对铋化镓样品：

对铋化镓单晶试样，使用质量分数为 37% 的盐酸和 70% 的硝酸按体积比 3:1 混合成的溶液腐蚀 30 s-60 s，也可以用化学机械抛光代替腐蚀，得到光滑样品表面。腐蚀或抛光后的样品厚度应在 0.3mm-1.0mm 范围内。

4.3.6 对铋化铟样品：

对铋化铟单晶试样，使用质量分数为 37% 的盐酸和 70% 的硝酸按体积比 3:1 混合成的溶液腐蚀 30 s-60 s，也可以用化学机械抛光代替腐蚀，得到光滑样品表面。腐蚀或抛光后的样品厚度应在 0.3mm-1.0mm 范围内。

4.3.7 对硫化镉样品：

试样洗净后需经过腐蚀，也可以用化学机械抛光代替腐蚀，得到光滑样品表面。

4.3.8 对氧化镓样品：

试样洗净后需经过腐蚀，也可以用化学机械抛光代替腐蚀，得到光滑样品表面。

4.3.9 对低纯度 ($\leq 10N$) 锗单晶试样，推荐使用将过氧化氢、氢氟酸和纯水按体积比 1:1:4 混合成的腐蚀液，在 25℃ ± 5℃ 下腐蚀 3 min ~ 5 min。

对于高纯锗 ($> 10N$) 材料，下面给出 3 中化学腐蚀试样的方法。(新增)

方法一：

- a) 使用甲醇或者去离子水清洗样品，以去除残留的表面接触的的金属或者其他杂质，干燥样品。
- b) 化学抛光腐蚀准备：配置酸腐蚀液，比例 HNO_3 (70% wt%) : HF (40% wt%) = 3:1。
- c) 如果试样表面已经抛光，腐蚀 45s，同时轻轻搅拌。腐蚀液的颜色应该由透明变为浅绿色，可以观察到浅色气泡产生。如果试样表面被锯切或者研磨，腐蚀 3 分钟，轻轻搅拌或者直到剧烈的类似沸腾的反应开始。
- d) 用半导体级甲醇快速淬灭。在甲醇中迅速彻底地冲洗，不要使样品暴露在空气中足够长的时间使其干燥。在最后一次冲洗前，应从烧杯中彻底倒出残余甲醇。
- e) 只能用干净的镊子处理，用干净的干燥氮气流干燥样品。

样品处理完成，准备制备电极。

方法二：

- a) 如有必要，用甲醇或去离子水清洗样品以去除残留的接触金属或其他杂质。让其干燥。
- b) 化学抛光腐蚀准备：配置酸腐蚀液，比例 HNO_3 (70% wt%) : HF (40% wt%) = 3:1。
- c) 在混合物开始剧烈反应后蚀刻约 30 秒 (强烈的棕色、大气泡和棕色一氧化氮烟雾)。在反应过程中应搅拌样品以确保均匀蚀刻。
- d) 用去离子水 (1 至 2.5 L/min) 缓慢淬火反应 15 至 30 秒。样品不得暴露在空气中。
- e) 用去离子水冲洗约 1 分钟，彻底清洁样品。
- f) 用镊子取出样品，在甲醇中浸泡约 1 分钟。
- g) 只能用干净的镊子处理，用滤纸或干净的干燥氮气流干燥样品。

样品处理完成，准备制备电极。

方法三

- a) 如有必要，用甲醇或去离子水清洗样品以去除残留的接触金属或其他杂质。让其干燥。
- b) 化学抛光腐蚀准备：配置酸腐蚀液，比例 HNO_3 (70% wt%) : HNO_3 (红色发烟) : HF (40% wt%) = 7:1:2。
- c) 对于先前蚀刻的样品，来回缓慢倾斜约 1 分钟。对于研磨样品，来回缓慢倾斜约 2 分钟。
- d) 用大量新的半导体级甲醇淬灭抛光溶液。
- e) 用喷雾瓶中的甲醇冲洗。
- f) 只能用干净的镊子处理，用干净的干燥氮气流干燥样品。

样品处理完成，准备制备电极。

4.3.10 推荐的过氧化氢浓度为 30%，氢氧化钾的浓度为 82%，硝酸的浓度为 70%，氢氟酸的浓度为 40%，纯度等级为分析纯。对于高纯锗单晶，试剂纯度为 MOS 级。经腐蚀后的试样必须用纯水冲洗干净。

4.4 电极的制备

用下述方法制备电极。

4.4.1 对锗材料试样，用氯化锌焊剂敷锡一钢或钢焊料。

对于高纯锗试样，用电烙铁涂 Ga-In 或 Hg-In 的共晶混合物，电烙铁温度控制在 350~400℃，需形成良好的欧姆接触。

4.4.2 对硅材料试样，仅在接触的区域用 HNO_3 和 HF 按体积比 10 : 1 混和成的腐蚀液，腐蚀不超过 1 分钟，再用去离子水清洗。用镀、溅射或蒸发技术涂敷金属接触。对 p 型硅用金或铝，对 n 型硅用镍等。必要时可用低功率特斯拉线圈通过接触放电以制备更好的欧姆接触。

4.4.3 对砷化镓材料试样，用电烙铁涂钢，在氮或氢气气氛中及 350℃ ~ 500℃ 下烧结 5 min ~ 10 min。或用电镀、溅射或蒸发技术涂敷金属如金和铯，然后涂钢。

4.4.4 对磷化镓材料试样，用电烙铁涂锡，在氮或氢气气氛中及 450℃ ~ 550℃ 下烧结 5 s ~ 10 s。

4.4.5 对磷化铟单晶试样，用电烙铁涂钢，在真空或氮气气氛中及 350℃ ~ 450℃ 下烧结 5 min ~ 10 min，或用电镀、溅射或蒸发技术涂敷金属接触。

4.4.6 对锑化铟单晶试样，用电烙铁涂钢，在氮或氢气气氛中及 350℃ ~ 500℃ 下烧结 5 min ~ 10 min。或用电镀、溅射或蒸发技术涂敷金属如金和铯，然后涂钢。

4.4.7 对碲化铟单晶试样，用电烙铁涂钢，在氮或氢气气氛中及 350℃ ~ 500℃ 下烧结 5 min ~ 10 min。或用电镀、溅射或蒸发技术涂敷金属如金和铯，然后涂钢。

4.4.8 对硫化镉试样：推荐使用钢电极，或采用电镀、溅射或蒸发等技术涂敷金属如金、铯等，形成良好欧姆接触，然后涂钢。

4.4.9 对氧化镓试样：推荐使用钢电极，或采用电镀、溅射或蒸发等技术涂敷金属如铝、钛/金等，形成良好欧姆接触，然后涂钢。

4.4.10 对平行六面体试样，电流接触电极应完全覆盖试样两端。其他电位电极的宽度应小于 0.2 mm。不论是何形状，电极位置应尽可能精确。

4.4.11 对薄片试样，接触尺寸要尽可能的小。通常电极应置于试样边缘，其线度不要大于 $0.02L_p$ 。如果电极必须放在同一个平面上，应尽量靠近边缘位置。对有限尺寸的修正因子，采用范德堡方法 (Van der Pauw) 得出。

5 设备

5.1 使试样成形的设备

推荐使用内圆切片机或高精度的外圆切片机和超声加工机床等切割设备。使用的冲模应保持试样尺

寸偏差在 $\pm 1\%$ 的范围内。研磨设备适用于制备平整的金相试样。

5.2 几何尺寸测量设备

推荐使用千分尺、外径千分尺、千分表或带有读数刻度的显微镜测量样品的厚度、宽度和长度。要求试样尺寸的测量误差小于 $\pm 1\%$ 。

5.3 电极制备设备

普通电烙铁或超声烙铁；适用于金、铝、镍等的电镀、溅射或蒸发设备；低功率特斯拉线圈等。可充氮或氢保护气体、达到所需温度（见 4.43 和 4.44）的烧结炉。

5.4 磁体

磁体可以是电磁体、永久磁体。磁通密度的精确度要求达到 $\pm 1\%$ 。要求磁体能对放置其中的试样提供 $\pm 1\%$ 均匀度的磁场。在使用电磁体时，应保证在测量时其磁通稳定度达到 $\pm 1\%$ 。

5.5 电子设备

5.5.1 可调电流源。电流稳定性不低于 $\pm 0.5\%$ 。测量时要求电流在试样上建立的电场小于 1 V/cm 。

5.5.2 标准电阻器。如使用标准电阻测量电流，标准电阻的误差小于 $\pm 0.1\%$ 。

5.5.3 电流表。如使用电流表测量通过样品的电流，电流表的误差小于 $\pm 0.5\%$ 。

5.5.4 电压表。电压测量推荐使用数字电压表。电压测量误差小于 $\pm 1\%$ 。电压表的输入阻抗应是被测试样总阻的 1000 倍以上。也可以使用符合这种要求的电位差计、伏特计和静电计。

5.6 试样架：

试样架应置于磁场的中心，使试样平面与磁通方向垂直。试样架必须由非磁性材料构成，不会对磁场造成影响，在试样位置上磁通密度值的变化应不大于 $\pm 1\%$ 。

需要在低温下测量时，试样架可置于杜瓦瓶之中，或将试样直接安装在低温制冷机冷头上。低温容器也必须由非磁性材料制成。

6 测量过程

6.1 电阻率测量

电阻率测量应在零磁场条件下测量。

6.1.1 平行六面体和桥形试样按图 5 连接试样。将接触选择开关先后置于 1、2 和 4 位置，测量电压 $V_1 (+I)$ 、 $V_2 (+I)$ 和 $V_4 (+I)$ 。改变电流方向，重复上述过程，测量电压 $V_1 (-I)$ 、 $V_2 (-I)$ 和 $V_4 (-I)$ 。

6.1.2 薄片试样按图 6 连接。首先测量标准电阻上的电压降 $V_s (+I)$ ，而后接触选择开关置于 1、2、3 和 4，测量电压 $V_1 (+I)$ 、 $V_2 (+I)$ 、 $V_3 (+I)$ 和 $V_4 (+I)$ 。电流换向，重复上述过程，测量电压 $V_1 (-I)$ 、 $V_2 (-I)$ 、 $V_3 (-I)$ 和 $V_4 (-I)$ 。

6.2 霍尔测量

6.2.1 平行六面体或桥形试样按图 5 连接。接通磁场并调节到所要求的正磁通密度值。在正向电流下，接触选择开关先后接通位置 1、3 和 5（对六接触试样），测量电压 $V_1 (+I, +B)$ 、 $V_3 (+I, +B)$ 和 $V_5 (+I, +B)$ （对六接触试样）。电流反向，测量电压 $V_1 (-I, +B)$ 、 $V_3 (-I, +B)$ 和 $V_5 (-I, +B)$ （对六接触试样）。磁通方向反向，并保持同一磁通密度（ $\pm 1\%$ ），测量电压 $V_1 (-I, -B)$ 、 $V_3 (-I, -B)$ 和 $V_5 (-I, -B)$ （对六接触试样）。电流再次反向，测量电压 $V_1 (+I, -B)$ 、 $V_3 (+I, -B)$ 和 $V_5 (+I, -B)$ （对六接触试样）。

6.2.2 薄片试样按图 6 连接。接通磁场并调节到要求的正磁通密度值。在正向电流下，首先测量电压 $V_s (+I, +B)$ ，然后接触选择开关先后接通位置 5 和 6，测量试样上的电压降 $V_5 (+I, +B)$ 和 $V_6 (+I, +B)$ 。电流反向，测量电压 $V_s (-I, +B)$ 、 $V_5 (-I, +B)$ 和 $V_6 (-I, +B)$ 。磁通方向反向，并保持同一磁通密度（ $\pm 1\%$ ），测量电压 $V_s (-I, -B)$ 、 $V_5 (-I, -B)$ 和 $V_6 (-I, -B)$ 。电流再次反向，测量电压 $V_s (+I, -B)$ 、 $V_5 (+I, -B)$ 和 $V_6 (+I, -B)$ 。

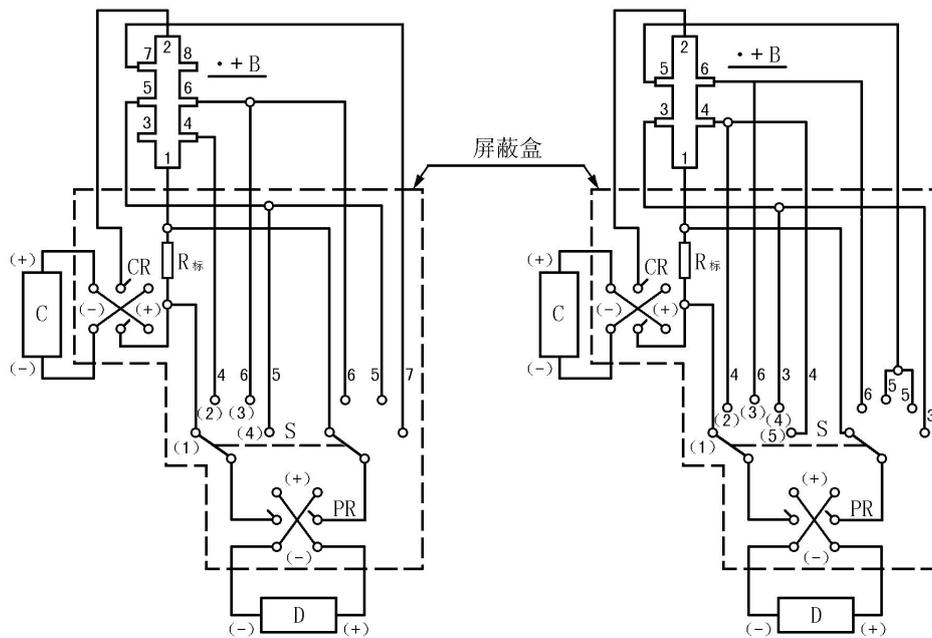
6.3 上述各个测量步骤中，在每次电流反向时应检验电流的稳定性，要求变化小于 $\pm 0.5\%$ 。在每次磁场反向时应检验磁通密度的稳定性，要求变化小于 $\pm 1\%$ 。

如果使用永久磁体，则不需要检验磁通密度的稳定性。如果使用无剩磁的电磁体时，可通过检验电磁铁电流的稳定性来确定磁通密度的稳定性。要求电磁铁电流的变化小于 $\pm 1\%$ 。

如在低温下测量，还应测量样品的温度和检验样品的温度稳定性。

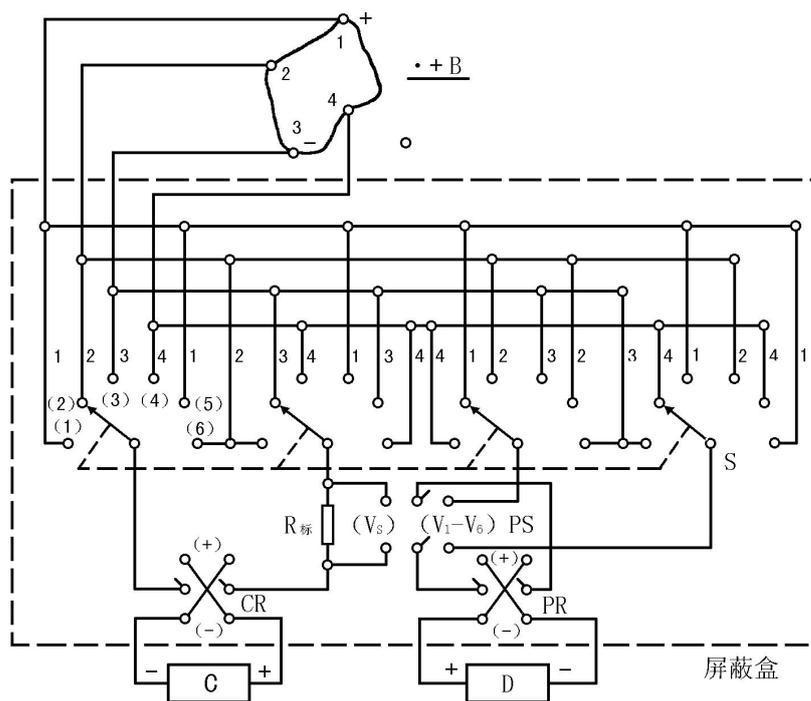
如果电流、磁通密度或温度的变化超出规定的范围，应在稳定后重新进行测量。

6.4 如使用电流表测量通过样品的电流，则将图 5 和图 6 中的标准电阻换为电流表。



- C —— 电流源；
- R 标 —— 标准电阻；
- D —— 电压表；
- CR —— 电流换向开关；
- PR —— 测量换向开关；
- S —— 电位选择开关。

图 5 测量桥型和平行六面体试样的电路



- C —— 电流源;
- R 标 —— 标准电阻;
- D —— 电压表;
- CR —— 电流换向开关;
- PR —— 测量换向开关;
- PS —— 测量选择开关;
- S —— 电位选择开关。

图 6 测量薄片试样的电路

7 计算

7.1 平行六面体或桥形试样电阻率计算

某一对电极间的电阻率 ρ_A ($\Omega \cdot \text{cm}$) 由式 (7) 给出:

$$\rho_A = \frac{R_s \times W_s \times t_s \times \left(\frac{V_2(+I)}{V_1(+I)} + \frac{V_2(-I)}{V_1(-I)} \right)}{2d_1} \dots\dots\dots (7)$$

以上式中, 长度单位是厘米 (cm), 电阻单位是欧姆 (Ω), 电压单位为伏特 (V)。

另一对电极之间电阻率 ρ_B ($\Omega \cdot \text{cm}$) 由式 (8) 给出:

$$\rho_B = \frac{R_s \times W_s \times t_s \times \left(\frac{V_4(+I)}{V_1(+I)} + \frac{V_4(-I)}{V_1(-I)} \right)}{2d_2} \dots\dots\dots (8)$$

以上式中, 长度单位是厘米 (cm), 电阻单位是欧姆 (Ω), 电压单位为伏特 (V)。

平均电阻率由式 (9) 给出:

$$\rho = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \dots\dots\dots (9)$$

以上式中, 长度单位是厘米 (cm), 电阻单位是欧姆 (Ω), 电压单位为伏特 (V)。

如果 ρ_A 和 ρ_B 相差大于 $\pm 10\%$, 说明试样存在着不符合需要的不均匀性, 这样的试样原则上应该舍弃。

7.2 平行六面体或桥形试样霍尔系数计算

7.2.1 霍尔系数 (R_H) (cm^3/C) 按式 (10) 计算:

$$R_H = \frac{2.5 \times 10^7 \times R_s \times t_s \times \left(\frac{V_3(+I, +B)}{V_1(+I, +B)} + \frac{V_3(-I, +B)}{V_1(-I, +B)} - \frac{V_3(-I, -B)}{V_1(-I, -B)} - \frac{V_3(+I, -B)}{V_1(+I, -B)} \right)}{B} \dots\dots\dots (10)$$

式中: 长度单位是厘米 (cm); 电阻单位是欧姆 (Ω); 电压单位为伏特 (V); B 的单位是特 (T)。对 n 型材料 R_H 是负的, 对 p 型材料 R_H 是正的。试样可测得两个霍尔系数值, 取其平均:

$$R_H = \frac{R_{H3} + R_{H5}}{2} \dots\dots\dots (11)$$

如果 R_{H3} 和 R_{H5} 相差大于 $\pm 10\%$, 说明试样存在着不符合需要的不均匀性, 这样的试样原则上应该舍弃。

7.2.2 霍尔迁移率用式 (4) 计算。载流子浓度用式 (5) 计算。

7.3 薄片试样电阻率计算

测量得到的数据可计算两个电阻率 ρ_A ($\Omega \cdot \text{cm}$) 和 ρ_B ($\Omega \cdot \text{cm}$) 值。

$$\rho_A = 1.133 \times f \times t_s \times R_s \left(\frac{V_1(+I) + V_2(+I)}{V_s(+I)} + \frac{V_1(-I) + V_2(-I)}{V_s(-I)} \right) \dots\dots\dots (12)$$

$$\rho_B = 1.133 \times f \times t_s \times R_s \left(\frac{V_3(+I) + V_4(+I)}{V_s(+I)} + \frac{V_3(-I) + V_4(-I)}{V_s(-I)} \right) \dots\dots\dots (13)$$

式中: 长度单位是厘米 (cm), 电阻单位是欧姆 (Ω), 电压单位为伏特 (V)。因子 f 是 Q_A 或 Q_B 的相关函数。

$$Q_A = \frac{\frac{V_1(+I)}{V_s(+I)} + \frac{V_1(-I)}{V_s(-I)}}{\frac{V_2(+I)}{V_s(+I)} + \frac{V_2(-I)}{V_s(-I)}} \dots\dots\dots (14)$$

$$Q_B = \frac{\frac{V_3(+I)}{V_s(+I)} + \frac{V_3(-I)}{V_s(-I)}}{\frac{V_4(+I)}{V_s(+I)} + \frac{V_4(-I)}{V_s(-I)}} \dots\dots\dots (15)$$

因子 f 在图 (7) 中表示为 Q 的函数，如果 Q 小于 1，则取它的倒数。f 的数值表见附录 A。

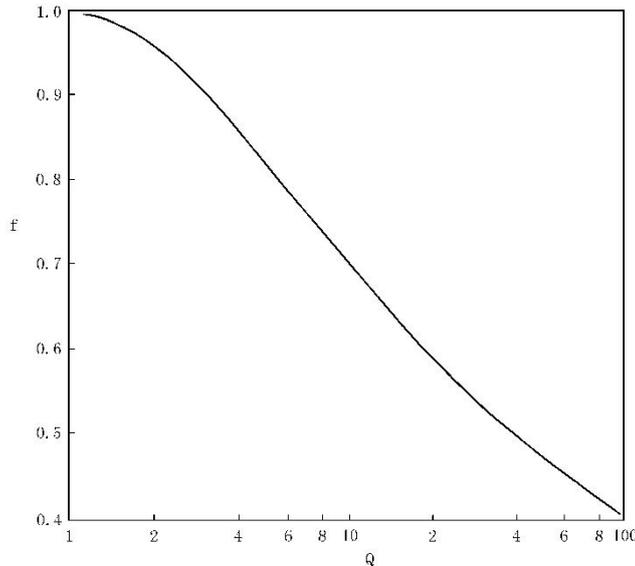


图 7 f 因子与 Q 的函数关系

如果 ρ_A 和 ρ_B 相差大于 $\pm 10\%$ ，说明试样存在着不符合需要的不均匀性，这样的试样原则上应该舍弃。

平均电阻率由下式给出：

$$\rho = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \dots\dots\dots (15)$$

7.4 薄片试样霍尔系数计算

7.4.1 霍尔系数 (R_{HC} , R_{HD}) (cm^3/C) 按式(16)、(17) 计算。

$$R_{HC} = \frac{2.5 \times 10^7 \times R_s \times t_s \times \left(\frac{V_5(+I,+B)}{V_s(+I,+B)} + \frac{V_5(-I,+B)}{V_s(-I,+B)} - \frac{V_5(-I,-B)}{V_s(-I,-B)} - \frac{V_5(+I,-B)}{V_s(+I,-B)} \right)}{B} \dots\dots\dots (16)$$

$$R_{HD} = \frac{2.5 \times 10^7 \times R_s \times t_s \times \left(\frac{V_6(+I,+B)}{V_s(+I,+B)} + \frac{V_6(-I,+B)}{V_s(-I,+B)} - \frac{V_6(-I,-B)}{V_s(-I,-B)} - \frac{V_6(+I,-B)}{V_s(+I,-B)} \right)}{B} \dots\dots\dots (17)$$

式中：长度单位是厘米；电阻单位是欧姆(Ω)；电压单位为伏特(V)；B 的单位是特(T)。如果 R_{HC} 和 R_{HD} 相差大于 $\pm 10\%$ ，说明试样存在着不符合要求的不均匀性，这样的试样原则上应该舍弃。

7.4.2 霍尔迁移率用式(4)计算。载流子浓度用式(5)计算。

7.5 如果使用电流表测量通过样品的电流，上述各计算式要做相应的改变。取消式中的 R_s ，并用电流值代换标准电阻上的电压值。电压单位用伏特，电流单位用安培。

7.6 高纯锗单晶净杂质浓度(N_A-N_D)的计算方法

高纯锗单晶净杂质浓度(N_A-N_D)的值由公式(17)得出：

$$(N_A - N_D) = \frac{1}{\rho e \mu} \quad (18)$$

其中： ρ 为电阻率； e 为电子电荷，大小为 1.60×10^{-19} C； μ 为漂移率，与载流子类型(N型或者P型)相关。

8 注意事项

8.1 高的接触电阻或有整流特性的电极接触可导致虚假的结果，因此样品电极的欧姆接触特性对测量是至关重要的。如果电流反向后，电流值有明显变化则可能需要重新制作样品电极。

8.2 光电导和光生伏特效应能影响电阻率，特别是对于接近本征的材料。所以被测试样应置于蔽光的样品架中。

8.3 在测量过程中要保证材料电阻率不随电场变化。通常选择小于 $1V/cm$ 的电场。由于试样中电场的作用，可出现少数载流子的注入，对于高寿命和高阻材料，这种注入导致在沿棒几厘米的距离内电阻率降低。在对试样加很低电压时，重复测量可知有无载流子注入的情况。在没有注入时，不会发现电阻率变化。因此，在测量时，尽可能选择小的样品电流。

8.4 在测量时，应使用较小的测量电流，以免试样发生电流加热。当电流加到试样后，可用电阻率读数随时间的变化来判定测量电流是否适当。

8.5 测量装置应置于良好的高频电磁屏蔽之中。

8.6 测量高阻试样时，应注意试样表面漏电的问题。

8.7 试样杂质浓度不均匀或磁通密度不均匀，将引起测量不准确，甚至可能造成很大的误差。

8.8 平行六面体和桥形试样霍尔电极必须远离电流接触端，以避免产生短路效应。

8.9 对于各向异性的材料，如 n 型硅和 n 型锗，霍尔测量受电流和磁场相对于晶轴方向的影响。

8.10 测量过程中，采用电流和磁场换向测量，可消除不包括爱廷豪森效应的其他效应的影响，但爱廷豪森效应引起的误差很小，特别当试样与它的周围有良好的热接触时，可忽略不计。

8.11 测量电路中可能产生假电动势，如热电势，特别是在低温测量时，应仔细检查并予以消除。

9 精密度

本测量方法可预期的精密度为 $\pm 7\%$ ，这个估计适用于电阻率在 $0.01-10 \Omega \cdot cm$ 的锗、硅、砷化镓和磷化镓等材料。

10 报告

测试报告一般包括下列内容：

- a) 样品的编号、形状和相应的尺寸；
- b) 磁通密度，测量电流，样品温度；
- c) 测量数据；
- d) 计算得到的电阻率和霍尔迁移率。

附 录 A
(资料性附录)
f 因子数值表

表 A.1 为 f 因子数值表, 以下 1、3、5、7、9 列为 Q 值, 2、4、6、8、10 列为对应的 f 值。

表 A.1

Q	f	Q	f	Q	f	Q	f	Q	f
1.02	1.000	1.04	1.000	1.06	1.000	1.08	1.000	1.10	1.000
1.12	1.000	1.14	1.000	1.16	0.998	1.18	0.998	1.20	0.997
1.22	0.997	1.24	0.996	1.26	0.995	1.28	0.995	1.30	0.994
1.32	0.993	1.34	0.993	1.36	0.992	1.38	0.991	1.40	0.990
1.42	0.989	1.44	0.989	1.46	0.988	1.48	0.987	1.50	0.986
1.52	0.985	1.54	0.984	1.56	0.983	1.58	0.982	1.60	0.981
1.62	0.980	1.64	0.979	1.66	0.978	1.68	0.977	1.70	0.976
1.72	0.975	1.74	0.974	1.76	0.973	1.78	0.972	1.80	0.971
1.82	0.970	1.84	0.969	1.86	0.968	1.88	0.967	1.90	0.966
1.92	0.965	1.94	0.964	1.96	0.962	1.98	0.961	2.00	0.960
2.02	0.959	2.04	0.958	2.06	0.957	2.08	0.956	2.10	0.955
2.12	0.954	2.14	0.953	2.16	0.951	2.18	0.950	2.20	0.949
2.22	0.948	2.24	0.947	2.26	0.946	2.28	0.945	2.30	0.944
2.32	0.943	2.34	0.942	2.36	0.940	2.38	0.939	2.40	0.938
2.42	0.937	2.44	0.936	2.46	0.935	2.48	0.934	2.50	0.933
2.52	0.932	2.54	0.931	2.56	0.930	2.58	0.929	2.60	0.928
2.62	0.926	2.64	0.925	2.66	0.924	2.68	0.923	2.70	0.922
2.72	0.921	2.74	0.920	2.76	0.919	2.78	0.918	2.80	0.917
2.82	0.916	2.84	0.915	2.86	0.914	2.88	0.913	2.90	0.912
2.92	0.911	2.94	0.910	2.96	0.909	2.98	0.908	3.00	0.907
3.02	0.906	3.04	0.905	3.06	0.904	3.08	0.903	3.10	0.902
3.12	0.901	3.14	0.900	3.16	0.899	3.18	0.898	3.20	0.897
3.22	0.896	3.24	0.895	3.26	0.894	3.28	0.893	3.30	0.892
3.32	0.891	3.34	0.890	3.36	0.889	3.38	0.888	3.40	0.887
3.42	0.886	3.44	0.885	3.46	0.884	3.48	0.883	3.50	0.882
3.52	0.882	3.54	0.881	3.56	0.880	3.58	0.879	3.60	0.878
3.62	0.877	3.64	0.876	3.66	0.875	3.68	0.874	3.70	0.873
3.72	0.872	3.74	0.872	3.76	0.871	3.78	0.870	3.80	0.869
3.82	0.868	3.84	0.867	3.86	0.866	3.88	0.865	3.90	0.865
3.92	0.864	3.94	0.863	3.96	0.862	3.98	0.861	4.00	0.860
4.02	0.859	4.04	0.859	4.06	0.858	4.08	0.857	4.10	0.856
4.12	0.855	4.14	0.854	4.16	0.854	4.18	0.853	4.20	0.852
4.22	0.851	4.24	0.850	4.26	0.850	4.28	0.849	4.30	0.848
4.32	0.847	4.34	0.846	4.36	0.846	4.38	0.845	4.40	0.844

表A.1 (续)

Q	f	Q	f	Q	f	Q	f	Q	f
4.42	0.843	4.44	0.842	4.46	0.842	4.48	0.841	4.50	0.840
4.52	0.839	4.54	0.839	4.56	0.838	4.58	0.837	4.60	0.836
4.62	0.836	4.64	0.835	4.66	0.834	4.68	0.833	4.70	0.833
4.72	0.832	4.74	0.831	4.76	0.830	4.78	0.830	4.80	0.829
4.82	0.828	4.84	0.827	4.86	0.827	4.88	0.826	4.90	0.825
4.92	0.824	4.94	0.824	4.96	0.823	4.98	0.822	5.00	0.822
5.02	0.821	5.04	0.820	5.06	0.820	5.08	0.819	5.10	0.818
5.12	0.817	5.14	0.817	5.16	0.816	5.18	0.815	5.20	0.815
5.22	0.814	5.24	0.813	5.26	0.813	5.28	0.812	5.30	0.811
5.32	0.811	5.34	0.810	5.36	0.809	5.38	0.809	5.40	0.808
5.42	0.807	5.44	0.807	5.46	0.806	5.48	0.805	5.50	0.805
5.52	0.804	5.54	0.803	5.56	0.803	5.58	0.802	5.60	0.802
5.62	0.801	5.64	0.800	5.66	0.800	5.68	0.799	5.70	0.798
5.72	0.798	5.74	0.797	5.76	0.797	5.78	0.796	5.80	0.795
5.82	0.795	5.84	0.794	5.86	0.793	5.88	0.793	5.90	0.792
5.92	0.792	5.94	0.791	5.96	0.790	5.98	0.790	6.00	0.789
6.02	0.789	6.04	0.788	6.06	0.788	6.08	0.787	6.10	0.786
6.12	0.786	6.14	0.785	6.16	0.785	6.18	0.784	6.20	0.783
6.22	0.783	6.24	0.782	6.26	0.782	6.28	0.781	6.30	0.781
6.32	0.780	6.34	0.779	6.36	0.779	6.38	0.778	6.40	0.778
6.42	0.777	6.44	0.777	6.46	0.776	6.48	0.776	6.50	0.775
6.52	0.774	6.54	0.774	6.56	0.773	6.58	0.773	6.60	0.772
6.62	0.772	6.64	0.771	6.66	0.771	6.68	0.770	6.70	0.770
6.72	0.769	6.74	0.769	6.76	0.768	6.78	0.767	6.80	0.767
6.82	0.766	6.84	0.766	6.86	0.765	6.88	0.765	6.90	0.764
6.92	0.764	6.94	0.763	6.96	0.763	6.98	0.762	7.00	0.762
7.02	0.761	7.04	0.761	7.06	0.760	7.08	0.760	7.10	0.759
7.12	0.759	7.14	0.758	7.16	0.758	7.18	0.757	7.20	0.757
7.22	0.756	7.24	0.756	7.26	0.755	7.28	0.755	7.30	0.754
7.32	0.754	7.34	0.753	7.36	0.753	7.38	0.752	7.40	0.752
7.42	0.751	7.44	0.751	7.46	0.750	7.48	0.750	7.50	0.750
7.52	0.749	7.54	0.749	7.56	0.748	7.58	0.748	7.60	0.747
7.62	0.747	7.64	0.746	7.66	0.746	7.68	0.745	7.70	0.745
7.72	0.744	7.74	0.744	7.76	0.743	7.78	0.743	7.80	0.743
7.82	0.742	7.84	0.742	7.86	0.741	7.88	0.741	7.90	0.740
7.92	0.740	7.94	0.739	7.96	0.739	7.98	0.839	8.00	0.738
8.02	0.738	8.04	0.737	8.06	0.737	8.08	0.736	8.10	0.736
8.12	0.735	8.14	0.735	8.16	0.735	8.18	0.734	8.20	0.734
8.22	0.733	8.24	0.733	8.26	0.732	8.28	0.732	8.30	0.732
8.32	0.731	8.34	0.731	8.36	0.730	8.38	0.730	8.40	0.730

表A.1 (续)

Q	f	Q	f	Q	f	Q	f	Q	f
8.42	0.729	8.44	0.729	8.46	0.728	8.48	0.728	8.50	0.727
8.52	0.727	8.54	0.727	8.56	0.726	8.58	0.726	8.60	0.725
8.62	0.725	8.64	0.725	8.66	0.724	8.68	0.724	8.70	0.723
8.72	0.723	8.74	0.723	8.76	0.722	8.78	0.722	8.80	0.721
8.82	0.721	8.84	0.721	8.86	0.720	8.88	0.720	8.90	0.719
8.92	0.719	8.94	0.719	8.96	0.718	8.98	0.718	9.00	0.717
9.02	0.717	9.04	0.717	9.06	0.716	9.08	0.716	9.10	0.716
9.12	0.715	9.14	0.715	9.16	0.714	9.18	0.714	9.20	0.714
9.22	0.713	9.24	0.713	9.26	0.713	9.28	0.712	9.30	0.712
9.32	0.711	9.34	0.711	9.36	0.711	9.38	0.710	9.40	0.710
9.42	0.710	9.44	0.709	9.46	0.709	9.48	0.708	9.50	0.708
9.52	0.708	9.54	0.707	9.56	0.707	9.58	0.707	9.60	0.706
9.62	0.706	9.64	0.706	9.66	0.705	9.68	0.705	9.70	0.704
9.72	0.704	9.74	0.704	9.76	0.703	9.78	0.703	9.80	0.703
9.82	0.702	9.84	0.702	9.86	0.702	9.88	0.701	9.90	0.701
9.92	0.701	9.94	0.700	9.96	0.700	9.98	0.700	10.0	0.699
12	0.668	14	0.643	16	0.622	18	0.604	20	0.589
22	0.575	24	0.563	26	0.552	28	0.542	30	0.533
32	0.524	34	0.517	36	0.510	38	0.503	40	0.497
42	0.491	44	0.486	46	0.481	48	0.476	50	0.472
52	0.467	54	0.463	56	0.459	58	0.456	60	0.452
62	0.449	64	0.446	66	0.443	68	0.440	70	0.437
72	0.434	74	0.431	76	0.429	78	0.426	80	0.424
82	0.422	84	0.419	86	0.417	88	0.415	90	0.413
92	0.411	94	0.409	96	0.407	98	0.406	100	0.404