

# 强磁场中低温测量的仪器和方法

H. H. Sample and L. G. Rubin

近年来,在强磁场中进行低温实验的工作日趋增多。其中不少强磁场实验中需要测量温度与磁场函数的物理参量之间的关系。根据实验的性质,测量的方法可以是磁场恒定时观察温度的变化,或温度恒定时研究磁场的影响。但两种方法都存在强磁场中准确测温的问题。蒸汽压温度计,除顺磁性液氧外,虽然基本上可以作到无误差、不受磁场影响的测温,但在不存在可作为蒸汽压温度计的低温液体的那些温度区间,问题则甚为严重。气体温度计提供了一种解决问题的途径,但要把它作为温度的绝对标准,一般认为对多数实验都甚为不便。因此,大多数研究人员都愿从几种可供使用的固体低温感温元

件中选用一种,经分度当成二级温度计使用。然而,这些温度计的物理性能都与磁场有关。本文目的在于叙述各种低温温度计的磁场性能,以帮助评选在特定实验环境中最适用的低温温度计。文中所用的资料是作者从已发表的文献中自由选取的,所以除少数例外,都不是新东西。本文第一节介绍了对此论题有关的早期文献的一些异议与新见解<sup>[1,2]</sup>。

## 温 度 计

表1列出大量低温温度计的磁致温度误差(与磁场强度 $B$ 和温度 $T$ 有函数关系)。磁场强度可划分为三个范围:相当接近有铁芯的电磁铁的磁场范围;中等磁场的超导磁

4. 出国参观考察报告——美国固体物理研究工作情况,科学技术文献出版社(1976)。
5. R. W. Bower, D. Sigurd and R. E. Scott, *Solid State Electron.*, 16(1973) 1461.
6. A. Hiraki, E. Lugujjo and J. W. Mayer, *J. Appl. Phys.*, 43(1972)3643.
7. J. O. McCaldin and H. Sankur, *Appl. Phys. Lett.*, 19(1971)524.
8. J. M. Caywood, *Metall. Trans.*, 4(1973)735.
9. H. Sankur, J. O. McCaldin and J. Devaney, *Appl. Phys. Lett.*, 22(1973) 64.
10. F. A. Shunk, *Constitution of Binary Alloys*, McGraw-Hill, New York, 1969, Suppl. 2.
11. S. Head, P. Chaudhari and M. H. Brodsky, *J. Non-Cryst. Solids*, 7(1972)309.
12. G. Ottaviani, D. Sigurd, V. Marrello, J. W. Mayer and J. O. McCaldin, *J. Appl. Phys.*, 45(1974) 1730.
13. W. Kern and D. A. Puotinen, *RCA Rew*, 31(1970) 187.
14. W. K. Chu, J. W. Mayer, M.-A. Nicolet, J. M. Buck, G. Amsel and F. Eisen, *Thin Solid Films*, 17(1973) 1.
15. Z. L. Liu, S. S. Lau, M.-A. Nicolet and J. W. Mayer, *Thin Solid Films*, 46(1977)93.
16. Z. L. Liu, S. S. Lau, M.-A. Nicolet and J. W. Mayer, *Thin Solid Films*, 44(1977)149.
17. W. F. Tseng, Z. L. Liao, S. S. Lan, M.-A. Nicolet and J. W. Mayer, *Thin Solid Films*, 46(1977)99.

体(例如Nb-Ti型)和水冷毕特螺线管或强磁场超导磁体(例如Nb<sub>3</sub>Sn、V<sub>3</sub>Ga)。虽然毕特螺线管可以获得高达23T(T表示特斯拉,下同)的静磁场、由某些超导磁体可

获得17T,但工艺上最感兴趣和最重要的仍在14T以下的区间,即本表的磁场强度上限。

下文将主要讨论表1所列各种温度计的实验结果。它不包括所有温度计的全部实验

表1 低温温度计的磁致温度误差

感温元件类型	温度K	相对温度误差值在B小于 下值时的 $ \Delta T /T(\%)$			备 注
		2.5 泰 斯拉	8 泰斯拉	14 泰斯拉	
Allen-Bradley 碳电阻 (2.7, 3.9, 5.6和10 $\Omega$ )	0.5	2-4	5-13	7-20	$\Delta R/R_0$ 均呈单一变化并为正值。名义阻值越大的元件的 $ \Delta T $ 值越小,类似产品的性能极相近,见参考文献3和4。
	1.0	2-4	6-15	9-25	
	2.5	1-5	6-18	10-30	
	4.2	1-5	5-20	10-35	
Allen-Bradley 碳电阻 (47, 100和220 $\Omega$ )	4.2	<1	5	10	与上述相同,见参考文献5和7。
	10	<1	3	5	
	20	<1	1	2	
Speer 1002 级 碳 电 阻 (100, 220 和 470 $\Omega$ )	0.5	0-2	0-1	0-6	$\Delta R/R_0$ 有正有负, B 和 T 关系复杂。类似产品之间的性能有变化。见参考文献3和8
	1.0	1-2	2-4	3-9	
	2.5	3-5	1-4	7-14	
	4.2	4-9	2-5	4-13	
松下碳电阻(68, 200 和 510 $\Omega$ )	1.5	1-2	10-15	—	$\Delta R/R_0$ 几乎与名义阻值无关,阻值越大的元件的 $ \Delta T $ 值越小,见参考文献9。
	2.1	1	10-15	—	
	4.2	2-3	4-8	—	
玻璃-碳电阻	2.1	0.5	1.5	4	性能与 Allen-Bradley 电阻相近, ~60K 以上时 $\Delta R/R_0$ 为负值,有效测温范围到 300K,复现性极好,见参考文献10。
	4.2	0.5	3	6	
	15	<0.1	0.5	1.5	
	35	<0.1	0.5	1	
	77	<0.1	0.5	1.5	
热敏电阻	4.2	<0.05	1	3	复现性良好,在某一狭窄温区内灵敏度很高,见参考文献12。
	10	<0.05	0.3	1	
	20	<0.05	0.1	0.5	
	40	<0.05	0.1	0.5	
	60	<0.05	0.1	0.5	
锗电阻	2.0	8	60	—	除非在极低磁场中使用,一般不推荐,因为 $ \Delta T $ 值大而且有极强的取向性,见参考文献7和15。
	4.2	5-20	30-55	60-70	
	10	4-15	25-60	60-75	
	20	3-20	15-35	50-80	
	70	3-10	15-30	25-50	
GaAs 二极管	4.2	2-3	30-50	100-250	与取向有关,当二极管的结与磁场平行时出现较小的 $ \Delta T $ 值。单一元件的有效使用范围为4.2-300K,见参考文献17和18。
	10	1.5-2	25-40	75-200	
	20	0.5-1	20-30	60-150	
	40	0.2-0.3	4-6	15-30	
	80	0.1-0.2	0.5-1	2-5	

感温元件类型	温度 K	相对温度误差值在 B 小于 下值时的 $ \Delta T /T(\%)$			备 注
		2.5 泰 拉 斯	8 泰斯拉	14 泰斯拉	
Si 二极管	4.2	75	—	—	比 GaAs 灵敏, 特别在 $<30\text{K}$ 时。取向性强。表列数据是在结平行于磁场时给出的。见参考文献 17, 19 和 20。
	10	20	30	50	
	20	4	7	10	
	30	3	4	5	
	77	0.2	0.5	0.5	
铂电阻	20	20	100	250	略有取向性。仅在 $T \geq 30\text{K}$ 时的各个磁场下有效。见参考文献 15 和 21。
	40	$<1$	5	10	
	80	$<0.5$	1	2	
Au+0.07 原子% 铁/镍铬 D 热电偶	5	2	10	15	表到数据是冷端在 4.2K 而且热电偶全部在磁场中的热端温度误差。经操作可能导致不重现性出现。见参考文献 3, 23 和 24。
	10	3	20	30	
	20	2	15	20	
	45	1	5	7	
	100	0.1	0.8	—	
镍铬 P/康铜 (E 型) 热电偶	10	1	3	7	表列数据的条件同上。这种热电偶仅在 $T \geq 10\text{K}$ 时才有效, 其测温灵敏度 $\geq 5 \mu\text{vK}^{-1}$ 。见参考文献 3 和 23。
	20	$<1$	2	4	
	45	$<1$	$<1$	2	
Sr TiO <sub>2</sub> 电容温度计	1.5	$<0.05$	$<0.05$	$\leq 0.05$	若按下述程序制备 (见正文) 磁场影响可能为“零”。在强磁场下可以有效的作为“传递标准”。见参考文献 25—29。
	4.2	$<0.05$	$<0.05$	$\leq 0.05$	
	20	$<0.05$	$<0.05$	$\leq 0.05$	
	50	$<0.05$	$<0.05$	$\leq 0.05$	

结果, 而只是在强磁场中最有效的几种温度计及其在各种使用条件下的典型数据。显然, 表 1 的结论限于  $0.5\text{K} \leq T \leq 100\text{K}$  的温度范围。

### 碳 电 阻

碳电阻的成本低、低温下计温性能优良, 磁感电阻变化较小, 且可复现, 所以广泛用作强磁场温度计。此外, 还没有报导过任何一种碳电阻的磁致电阻有“取向性”, 也是其优点之一。以  $1/2\text{W}$ ,  $220\Omega$  Spear 电阻<sup>[3]</sup>和  $1/4\text{W}$ ,  $47\Omega$  Allen-Bradley 电阻<sup>[1]</sup>的实验结果为例 (见图 1 和图 2), 在不同定点温度下的电阻变化是磁场强度 B 的函数。

$$\Delta R/R_0 = [R(B, T)$$

$$- R(O, T)]/R(O, T)$$

图示曲线可以引证  $R(O, T)/T$  分度曲线<sup>[5]</sup>或近似地被零磁场相对灵敏度相除  $(d \ln R/d \ln T)$ <sup>[3]</sup> 而换算成表 1 中的等效温度误差:

$$\Delta T/T = (\text{显示温度}$$

$$- \text{真实温度})/(\text{真实温度})$$

当然, 对温度计量来说, 磁感温度误差  $\Delta T/T$  的大小比起磁阻  $\Delta R/R_0$  的大小更为重要。  $\Delta R/R_0$  可以很大, 若相对灵敏度也大的话则仍归只能产生小温度误差。图 1 和图 2 表明在同样的温度和最强磁场下,  $47\Omega$  Allen-Bradley 电阻的磁阻大小比  $200\Omega$  Spear 电阻的磁阻大一个数量级或更多。在

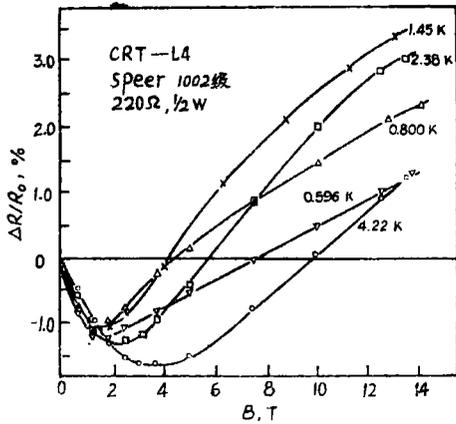


图1 220Ω, 1/2W, 1002级Speer碳电阻的  $\Delta R/R_0$ 与磁场强度的关系。

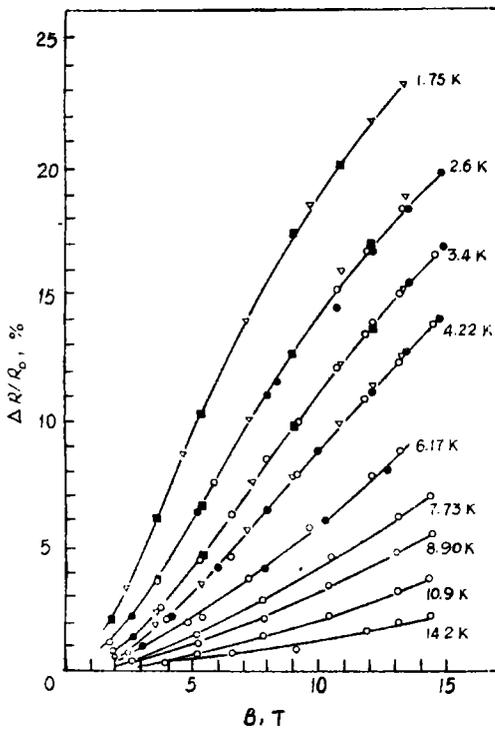


图2 47Ω, 1/4W Allen-Bradley碳电阻的  $\Delta R/R_0$ 与磁场强度的关系。

表1可见两者的温度误差不相上下。

各类碳电阻的磁阻已有大量数据。在表1汇集了零磁场性能和温度误差相近的碳电阻实验结果。表中的数据范围是从不同碳电阻所汇集的主要数据。诚然，名义上都是相同的碳电阻也可能有很大差别，对Speer电阻尤为如此。Speer电阻在低温 ( $\leq 4$  K)

时是极其有效的，相对灵敏度最高，磁感温度误差较小。但应注意它的磁阻随温度和磁场的变化较复杂，这点不象其它的碳电阻。如图1所示，在一定温度下，随磁场逐渐增强，得到的磁阻值有正有负。此外，在给定磁场下，温度低到4.2K以下时，磁阻首先增大，然后下降。

相反，Allen-Bradley碳电阻的磁阻性能却比较好，与B和T呈单值变化，始终是正值<sup>[3-7]</sup>。名义电阻值低的碳电阻<sup>[4]</sup>其温度误差小，以致在表列的各场强和温度范围内都能够很方便的进行修正。名义电阻值高的Allen-Bradley碳电阻<sup>[5]</sup>在约4K以上温度极其有用，因为灵敏度很高使得在低温形成极大阻抗，正是此高灵敏度使其温度误差成为极小（见表1）。松下碳电阻的数据有限，有文章<sup>[9]</sup>称  $\Delta R/R_0$ 与名义电阻值完全无关，由于各个元件的灵敏度不同，因而表1列出的温度误差仅是初步的。

### 玻璃—碳电阻

这种温度计是一种商品化的玻璃渗碳结构的无应力密封元件<sup>[10]</sup>。除了灵敏度较高（使其可用于较高温度）和磁感温度误差较小以外，它的  $R_0/T$ ,  $\Delta R/R_0$ 对T和对B特性均类似Allen-Bradley碳电阻。无应力密封结构使元件的零磁场  $R_0/T$  特性的热循环复现性极好，这是超过普通碳电阻的一个重要优点。当然，它的售价比起来要贵得多。在温度约60K以上，磁阻呈负值，类似Speer碳电阻在温度很低时的性能。正如普通碳电阻的情况一样，磁阻没有取向性。玻璃—碳电阻温度计的另一重要特性是同一批材料制造的温度计的温度误差几乎与产品元件的  $R_0$ 无关。

### 热敏电阻

如表1所示，低温热敏电阻在4.2K以上的所有磁场的磁感温度误差都很小<sup>[11-13]</sup>。然而，热敏电阻还远没有达到其它电阻温度

计那样为人们所接受的程度。原因主要是灵敏度极高使得给定元件的整个有效测温范围限制得相当狭(诚然如此高的灵敏度担负极小的 $\Delta T/T$ 值,见表1)。有效测温范围可以采取分流的方法稍加延长<sup>[14]</sup>,或者同时使用几个测温范围相互迭加的元件。

除了磁场灵敏度小以外,热敏电阻还有热循环复现性好的优点。但是从作者的实验结果提出了一些附带条件。例如,各类热敏电阻(包括正或负的磁阻)之间其磁场特性有量和质的差异,而且其中几种已观察到异常效应。同时,磁场强度在8T以上,绝对磁阻变化会相当高( $10^5 \leq R \leq 10^6 \Omega$ )以致可能出现下述问题:

1. 当偏离恒定电流时,感温元件损耗较大。
2. 由于对电源电阻的量值敏感,电压表零点调节器以及零值指示器漂移。
3. 设计 $<10^5 \Omega$ 电阻温度计的测温系统中具有的负载效应误差。

基于上述理由,热敏电阻应限于用在4.2K以上温度范围。

## 锗电阻

锗电阻是40K以下最常用的高准确度感温元件。多数锗低温电阻都是用掺了不太浓的施主杂质或受主杂质的单晶材料制成。在零磁场下,两种形式都获得优良的复现性和高灵敏度。然而此二特性引起的效应使目前制造的锗电阻感温元件不适用于约2.5T以上的磁场(见表1)。特别是锗电阻系单晶制成,所以磁阻表现出极强的取向性,亦即磁阻取决于温度计与外加磁场的相对方向。锗电阻温度计在低温时磁阻较大,事实上磁阻很大,以至用 $R(B, T)/R(O, T)-B$ 曲线来代替通常情况下碳电阻的 $\Delta R/R_0$ 变化曲线。这两方面的缺陷见于图3所示的Honeywell锗温度计在7.2K时的实验结果<sup>[15]</sup>。这些缺陷有可能选用载流子迁移率较小的半导体以及象制造碳电阻一样,合成多晶体来

加以限制。

表1列出几种不同类型锗电阻的综合实验结果,所有测量电流均垂直于磁场。但应注意,对某一给定元件得出的有取向性的 $R(B, T)/R(O, T)$ 数据范围,可能相当或大于表中取向相同的各个元件的数值。此外,表中的相对温度误差大小并不象大多数其它感温元件那样,随温度上升而减小。由于存在这些不希望有的特性,致使在磁场强度为2.5T以上时的任何温度均不推荐使用锗温度计。

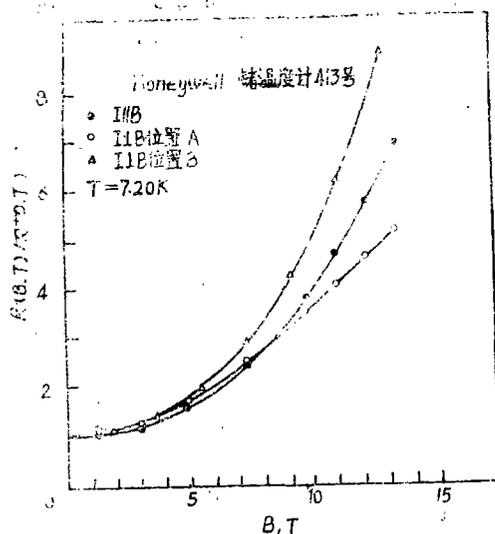


图3 Honeywell 锗温度计的磁阻与取向的关系

## 砷化镓和硅二极管

零磁场中使用的GaAs和P-N结Si二极管低温温度计已经商品化<sup>[16]</sup>。目前重视二极管温度计主要是由于在整个宽的测温范围(1—300K)内灵敏度均有效。这种温度计使用比较简单,只需在恒定正向电流时测量跨接结的正向电压降就可以了。温度约低于30K时,Si二极管比GaAs二极管的感温灵敏度大得多<sup>[17]</sup>。这些二极管在磁场中的性能当换算成表1的等效温度误差时,可以看到在 $T < 40K$ 时,GaAs二极管可用在约5T以下的磁场中,以及 $T > 40K$ 时的所有磁场<sup>[17-20]</sup>。Si二极管的情况与之相反,甚至

中等磁场强度，温度在约20K以下也不予推荐，但是在这温度以上即使磁场极强也能够有效使用。

表列 GaAs 二极管的数据发散的原因是：各个元件的特性不同、有取向性（结与磁场方向有关）以及偏压电流与 $\Delta T/T$ 有关。假如偏压电流的最佳条件（10 $\mu$ A）和二极取向（结平行于B）一经选定，则 $\Delta T/T$ 的误差发散度将较小。对Si二极管来说，只给出结平行于B的数据，因为其它取向的温度误差比这些数据要大得多。

### 铂电阻

铂电阻温度计在液氮温度的磁阻比锗电阻要大得多。和锗电阻不同，铂电阻是用极纯的材料制成，因而它的电阻仅由电子—声子（晶格振动）的散射所决定。在低温下散射显著减弱，造成大的磁阻。然而，磁阻和温度很有关系<sup>[15,21]</sup>，在温度30K以上，甚至最强磁场下磁阻也会下降100%，因而在此场合实际上仍需对磁阻引起的测量误差进行修正。铂电阻有取向性<sup>[15]</sup>，甚至在最高温度下也表现出来。表1所示为铂电阻处在极劣的“平行”布置（电阻的外壳平行于磁场）情况下的数据。

### 热电偶

热电偶广泛用作低温温度计，尤其是在4.2K以上，要求直接测定温差的应用场合<sup>[22]</sup>。一系列试验（磁场高达14T<sup>[3,23,24]</sup>，温度高达100K）测定了磁场对各种热电偶热电势的影响。可以看到，镍铬P/康铜热电偶，冷端4.2K，整个地放置在磁场B中的试验结果（见图4）。这种热电偶的等效温度误差列于表1，系参照其零磁场电势—温度的关系计算出来的。

要对热电偶的磁感温度误差加以详述比其它低温元件来说更为困难。因为两根热电偶丝所有部位的温度和磁场分布都与热电

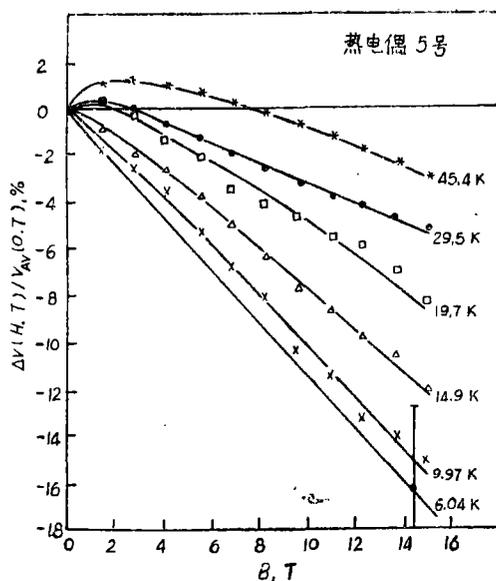


图4 镍铬P/康铜热电偶的热电势变化百分率与磁场的关系。

势有复杂的关系。因此，即使同种热电偶在各参考温度下其表列数据也将相差很大。应注意，表列数据是热接点的绝对温度的误差而不是热接点和4.2K间的温度差的误差。

镍铬P/金+0.07%(原子)铁和镍铬P/康铜热电偶在最宽的温度范围和磁场强度中的温度误差列于表1。镍铬P/金+0.07%(原子)铁具有的高灵敏度，使其甚至可在4.2K以下使用，不同批的金铁偶丝可能有差异，以及经过操作也可能改变磁感温度误差。镍铬P/康铜热电偶可用在约10K以上温度范围，其灵敏度约大于5 $\mu$ VK<sup>-1</sup>，磁感温度误差较小。Chiang<sup>[24]</sup>曾研究标准银/金铁热电偶，然而其温度误差大于镍铬P/金铁。

应强调表1数据不能轻易地延伸到下列情况，即热电偶的测量端贴附在强磁场中的低温样品上而参考端却保持在零磁场的冰点中（在低温恒温器外面）。这种情况下，在各磁场中的热电势变化将与二根热电偶丝通过磁场的部位的温度极有关系。此温度必然与专用低温恒温器有关，甚至会随着操作过程中低温液体液位的改变而变化。

## 电容温度计

论及  $\text{SiTiO}_3$  玻璃陶瓷电容温度计的用途, 曾出现某些混乱和疑问。正如原先想象, 它最大的潜力应是作为一种参比或零值指示温度计<sup>[25, 26]</sup>。这种使用形式是将电容温度计与已分度的温度计等温的捆扎在一起, 在零磁场中进行准确的测温。当磁场强度不断增加到原有的温度计的分度失效的某一数值, 只要满足电容温度计的某些条件(将加以简述), 它就会接着对任何的温度偏差进行高精度指示。这种由于磁场变化引起涡流热所导致的温度变化有可能用人工调节或使用电容温度计作为温度零值指示的自动温度控制器把温度调整到原先的大小<sup>[27]</sup>。这类闭环控制系统完全能够保证  $T_{(B=0)} = T_{(B \gg 0)}$ , 其温度误差在 0.05% 以内。

正如 Lawless 所述<sup>[28]</sup>, 电容温度计呈现出时间老化效应(即漂移)“当玻璃基体由于热膨胀(77K 以上时)、电致伸缩耦合于微晶体上(伴随着出现电压脉冲)、还是通过 65K 转变温度的加温或冷却过程都将造成其空间上的扰乱。”因此, 当温度计作为一种温度零值指示器使用时, 使用者应避免产生任何上述扰乱。重要的是在最初冷却到 65K 以下时要稳定一小时并避免把大电压增量(数量级的)施加到温度计上。由于电容电桥(如通用无线电型号 1615-A 型)最常用来检测电容变化, 这种小心操作得以避免电桥发生(甚至瞬时的)严重不平衡现象<sup>[29]</sup>。

## 其它温度计

有几篇文章介绍了其它几种磁场用温度计。一种 Ni-Cr 薄膜温度计可用于 4 K 以下, 误差小于  $\pm 0.001\text{K}/2.5\text{T}$ <sup>[30]</sup>。因为这种感温元件的可能使用者必须自己去制作它, 尚且它使用的温域也可应用蒸汽压温度计, 所以我们怀疑这种温度计在强磁场中会得到推广。一种低温线性感温元件<sup>[31]</sup>(普通的栅箔探测器)已在高达 6 T 的磁场

中进行了试验<sup>[32]</sup>。在低温时的误差甚大(在 5.3K 时为 -17 K), 但作者指出它很少发现任何磁滞效应, 有可能进行磁场强度——温度的分度。鉴于文章的数据, 我们不推荐此种温度计用于 77K 以下, 5 T 以上的使用场合。

一种 KELTIP 温度计<sup>[33]</sup>(Au-Mn 合金电阻)有可能用在 1~373K 温域。然而这种感温元件在 4.2K, 磁场强度高达 3.5T 时作磁阻测量并不十分令人鼓舞<sup>[34]</sup>。在 10T 时, 发现阻值下降约 50%, 换算成温度误差相当大, 实际上  $dR/RdT$  约为 1%/K。

## 结 论

要确切地选择某种用于磁场中“最佳”的低温敏感元件是不可能的, 因为这和特定的实验条件很有关系, 例如温度与磁场强度范围、测温形式、安装位置的限制以及可使用的测量仪器等等。但是从表 1 的数据中仍然可以大致的得出以下几点结论:

1. 温度约低于 20K 时, 在表列磁场强度范围内, 各种类型的碳电阻均为优良的选用对象。
2. 在同样条件下, 玻璃-碳电阻温度计也极适用, 虽然价格比较贵, 但测温精度却比普通碳电阻要高得多。
3. 锗电阻温度计决不是磁场中使用的好品种, 约在 2.5T 以上的磁场都不适用。
4. 铂电阻和 GaAs 二极管一样, 可以用在 30K 到室温的所有磁场下。
5. 如果在 4.2—300K 温度范围内只准用单支感温元件, 那么选用玻璃-碳电阻或 Ga-As 二极管是最佳的折衷方案(除非温度再低时, 磁场约大于 8 T, 则不能用 GaAs 二极管)。
6. 如果实验要求测温范围很窄或实际上允许使用若干支测温范围交连的感温元件, 那么在各种磁场强度下热敏电阻都是极好的选择。
7. 无论是用哪种电阻温度计, 总要选

用最高可能的元件电阻与使用的仪器相匹配,这是通常熟知的一种使温度计灵敏度最佳化技术,然而,却可能不知道采用这种技术,非金属电阻温度计磁致电阻引起的测温百分误差常会被降低。

8. 在温度 10K 以上,镍铬/康铜热电偶是有效的。由于金+0.07% (原子)铁热偶丝的磁性能的变化使得它只能用于  $\leq 6$  T 的磁场中。

9. 我们觉得,若使用得当, SrTiO<sub>3</sub> 电容温度计已是一种早已期望的与磁场无关的感温元件。然而,将其作为一种长期保持原始分度的温度计尚有疑问。不少使用者发现买到合格的已分度的测温元件,但不久仅能作近似的使用,例如宁可作为控制器的点调节也不愿作为温度的绝对指示。虽然有些使用者愿意依靠有相反斜率和双值的 C-T 特性,但我们仍不推荐在 60K 以上温域采用电容温度计。

10. 当安装空间、资金或测量仪器都没有问题的情况下,我们介绍一个在强磁场中, 1.5~300K 温度范围内进行测温或控温的特殊系统的实例。它包括 SrTiO<sub>3</sub> 电容温度计与 Si 二极管或玻璃-碳电阻的“热联结”型式。后者的选择与测温精度要求有关。当温度约达 60K 时,测温系统应像电容温度计一节中所讨论的那样改变使用方法。在所有高温应用场合,测温和控温都可以用原来的温度计承担,其  $\Delta T/T$  误差  $\leq 1\%$ 。

## 磁力测定

本节限于讨论计量学领域中磁力测定系统的单纯型式:商用霍尔(Hall)探头及其附属磁体<sup>[35,36]</sup>。

众所周知,旋转线圈和核磁共振(NMR)磁强计都能够进行高准确测量,事实上后者具备基准级的性能。两种磁强计不论是在低温或低温强磁场( $>10$ T)<sup>[37]</sup>中进行测试性能都优异<sup>[38-41]</sup>。然而,NMR法被限于用在体均匀性和短时稳定性都相当好的磁体。另

外,在磁体的工作空间常不允许固定安装数目过多的 NMR 探头和旋转线圈轴体。所以我们只推荐它们作为对霍尔探头定期校验的分度标准器。本节的目之一介绍磁力测定过程的必要知识。

将霍尔探头和其它形式的测磁元件(例如磁阻计)进行比较试验的结果,导致我们推荐霍尔探头用在绝大多数强磁场,低温下的磁力测定场合。而且使用者可以从不同生产厂家提供的 InAs、InSb 和 GaAs 中选用<sup>[42]</sup>。这几种探头是横向型式、尺寸紧凑,厚度为 1—1.4mm,长度或直径  $<16$ mm(可另参阅产品说明书和仪器使用方法)<sup>[35,36]</sup>。

正如下文将讨论的,所有探头显示出磁场线性度良好,经过适当分度可以用在低温测量。例如,图 5 示明一支 ETU InSn 探头在 4.2K 时输出电压——磁场(B)的关系。在此图中表明除在振动(量子振荡)甚为显著的极高磁场以外,V与B的线性极好。

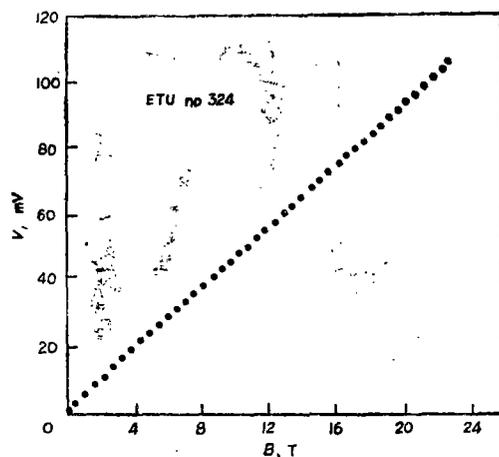


图5 324号ETU探头在温度为4.2K,测量电流为20mA时的霍尔电压与磁场强度的关系。

把图中数据拟合公式(1)时,霍尔电压偏离线性关系就很明显。

$$V_{\text{计算}} = A \times B + C \quad (1)$$

式中斜率A和截距C为常数。可以算得偏差电压  $\Delta V = V - V_{\text{计算}}$ ,并绘出对B的曲线图,如图6所示是在4.2K时的几种测磁探头的曲线。

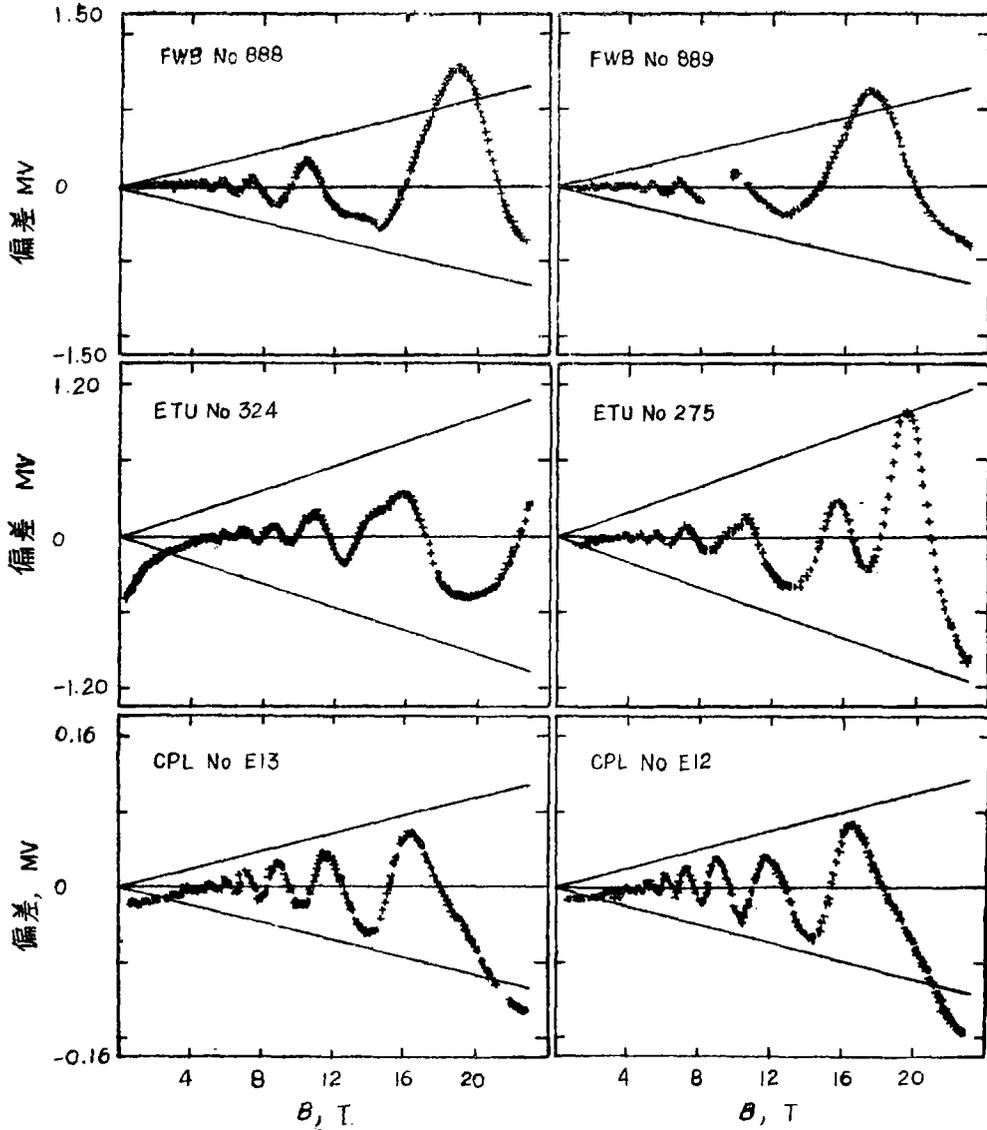


图6 在4.2K时, FWB、ETU和CPL探头的霍尔电压与线性关系式(1)的偏差 $\Delta V$ 。

实线表示总霍尔电压的 $\pm 1\%$ 。采用的测量电流  
 FWB (888号、889号) 为60和50mA;  
 ETU (324号、275号) 为20和18mA;  
 CPL (E13号、E12号) 为20mA。

适当选取(1)式中的斜率A和截距C, 以便强使在较强磁场时偏差在图的零线上下振荡。这种方法便于研究斜率(探头灵敏度)随探头热循环(300—4.2K)次数而变化的情况。同时也能够很方便监视可能出现的两种类型的非线性度: 量子振荡和(或者)在磁场为3—4T时的斜率变化。例如在图6中

的ETU(324号)探头把两种偏差型式都表现得十分明显。但应注意到, 在图5中用同一探头的“原始”数据所绘制的曲线图, 其弱磁场的斜率变化却察觉不到。对于此类探头来说, 斜率变化约2.5%则在约4T磁场时其斜率变化集中在零线附近。将弱磁场和强磁场的偏差电压与图6所示的对角实线(表

表 2 在 4.2K 时, 霍尔探头的量子振荡

探头类型	在下列磁场强度以内, 量子振荡修正到直线的最大值 (以15T霍尔电压为一百的百分率)			
		8T	15T	23T
FWB (InAs)	最佳	0.1	0.5	0.5
	最差	0.2	0.8	1.9
	平均	0.17*	0.6*	1.7 <sup>+</sup>
ETU (InSb)	最佳	0.1	0.2	0.6
	最差	0.3	0.7	2.6
	平均	0.12*	0.4*	1.6 <sup>+</sup>
CPL (GaAs)	最佳	0.1	0.7	1.8
	最差	0.4	0.9	2.1
	平均	0.24*	0.8*	2.0 <sup>+</sup>

\* 以 6 支探头的实验结果为依据。  
 † 以 2 支探头的实验结果为依据。

示总霍尔电压的±1%)对照之后可以看出这点。磁场约大于 5 T 时, 这类探头的量子振荡约小于霍尔电压的 0.5% (即以后的斜

表 4 CPL、FWB 和 ETU 霍尔探头随温度不同斜率变化的百分率

探头类型	从 4.2K 开始, 斜率变化量 (%)			
	温度=1.5K	温度=4.2K	温度=77K	温度=300K
FWB	0	0	+0.4	-0.2
ETU	0	0	+0.5	+0.2
CPL	-0.5	0	-0.3	+0.4

内的第二类非线性度。两种非线性度虽在 4.2—300K 范围内会有变化, 但在 1.5—4.2K 范围内却与温度没有关系。图 7 所示为 FWB 探头在温度从 300K 降到 77K 再降到 4.2K 时的量子振荡扩展情况。

温度对 FWB、ETU 和 CPL 探头灵敏度 (即公式 (1) 中的斜率 A) 的影响示于表 4。显然, CPL 探头比之 FWB 和 ETU 探头来说, 其斜率对温度更为敏感一点, 尤其是在 1.5—4.2K 范围内。尚且, 斜率变化全部小于 1%, 因此三种类型探头一经室温分度就可以完全断定在 4.2K 时的斜率变化约为 1%。

已经确定了三种类型探头的热循环 (从室温到 4.2K) 对探头灵敏度的影响。在这

表 3 在 4.2K 时, 霍尔探头的斜率变化非线性度

探头类型	斜率变化量, %	中心磁场, (T)
FWB (InAs)	<0.2	—
ETU (InSb)	1—3	~3
CPL (GaAs)	0.2—1	~4

率变化完全呈非线性)。

测量了三种类型 (FWB InAs、ETU InSb 和 CPL GaAs) 若干支探头的非线性度<sup>[35,36]</sup>, 其结果汇总于表 2、表 3。

表 2 说明 4.2K 时量子振荡型探头的非线性度特征并把各个探头的量子振荡峰值高度与相同探头在 15T 时的霍尔电压作了比较。从实用角度考虑, 把 15T 输出选为“基准”数, 世界上仅有少数实验室用上这样的强磁场。表 3 列出在 4.2K 时, 斜率变化型探头的非线性度的大致分析结果。应该注意, FWB InAs 探头没有表现出在测量精度以

些试验中对各种类型的六支探头分别作了灵敏度 (斜率 A) 变化的测试, 得知其变化为热循环次数的函数, 并算得每支探头的平均斜率变化。试验结果示于图 8。图中示明, 热循环次数较少时, CPL 探头的斜率稳定性和 ETU 探头的类似。若继续循环, 其稳定性比 ETU 探头好而比 FWB 探头的差。六支 FWB 探头样品中没有一支在 60 次热循环后的灵敏度变化大于 1%, 而三支 ETU 探头和一支 CPL 探头仅 25 次热循环后就变化 2% 或更多一点。显然, FWB 探头在热循环情况下最为稳定。

将探头样品的灵敏度 (在公式 (1) 中以常数 “A” 定义) 进行比较是有意义的。在 60ma 标准电流下, 数据为: FWB=4.2

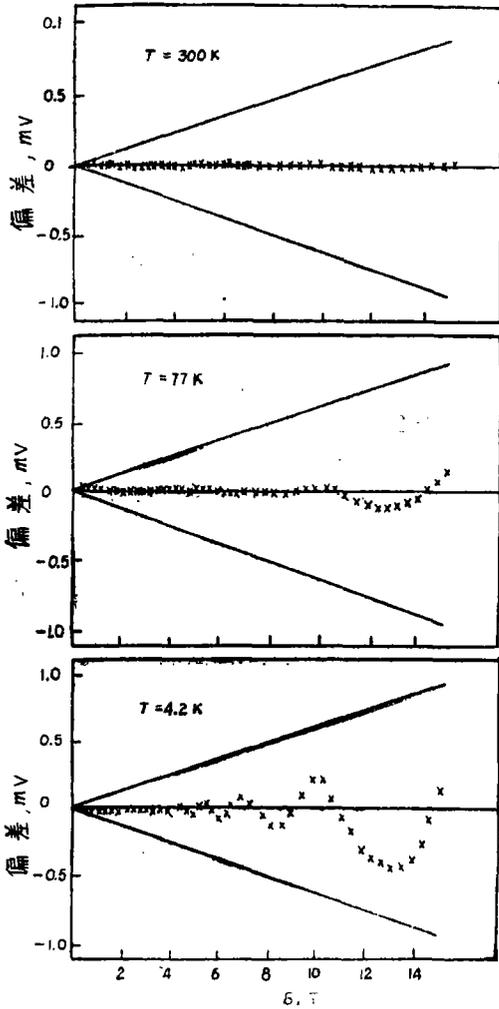


图7 三种温度下, FWB探头的霍尔电压对线性关系式(1)的偏差。

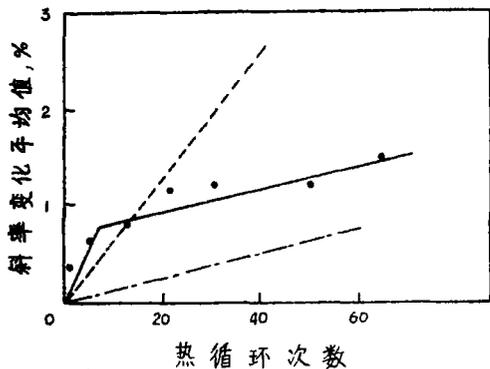


图8 CPI探头(·, —)、FWB探头(—)和ETU探头(---)的热循环与斜率变化平均值关系。参考文献35详述了以平均斜率变化的计算方法得出FWB和ETU探头的试验结果。

$-5.2\text{mV}\text{T}^{-1}$ ;  $\text{ETU} = 7 - 17\text{mV}\text{T}^{-1}$ ;  $\text{CPL} = 1.3 - 1.5\text{mV}\text{T}^{-1}$ 。尽管在选用探头时考虑的许多参数中灵敏度并非最重要的,但假如灵敏度数值过低,就可能成为关键。在使用意义来说,“过低”可定义为当低于某灵敏度值,在测量回路中的热电势就变成重要因素。我们建议,以约 $10\text{mV}$ 的满刻度输出即为此下限,这在探头功率消耗等级不大于几十毫瓦时将能达到。

目的为了总结霍尔探头的实验结果,我们开始就假定,使用者已将探头在原位用磁力测定标准器进行过校验并按准确度要求测得偏差曲线图。那么在以后测量时,预期误差是多少和怎样加以防止呢?

1. 探头或探头支撑杆的机械位移或重新调整无疑将导致探头取向(与磁场有关)的变化,这样会产生很大的测试误差。

2. 斜率变化的大小必然与热循环、探头的类型有关。这种误差的范围可以从百分之几十到几百。参考文献1; 2都推荐的修正工作是在两个或多个磁场测试点上定期进行原位再分度。

3. 如果要求直接读出的磁强计,例如配有探头的DVM,将它的灵敏度调节到 $1.000$ 或 $10.00\text{mV}\text{T}^{-1}$ ,则再分度后的误差仅与约 $6\text{T}$ 以上的量子振荡效应和(或)约 $4\text{T}$ 以下的斜率变化的非线性度有很大关系(对某几种探头类型来说)。由于这两种非线性度重现在 $\pm 0.1\%$ FS以内,可以用偏差曲线图对这种误差进行简单的修正。以量子振荡为题来说,值得注意它对各种类型探头样品的线性度影响都相同。

若一支磁强计处于“理想”工作条件,即安装在磁体某一固定点上并长期保持恒温,那么有充分理由认为可以获得磁力测定的准确度小于 $0.2\%$ 。

参考文献42篇(略)。

黄丁源、黄泽铨译自“CryogenicS”  
1977.Vo1, 17, No11, 思聪校