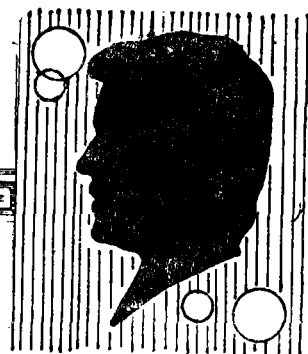


量子霍尔效应发现十周年



谷 清

霍尔效应是 1879 年美国物理学家霍尔研究载流导体在磁场中导电的性质时发现的一种电磁效应。他在长方形导体薄片上通以电流，沿电流的垂直方向加磁场(如图 1)，发现在与电流和磁场两者垂直的两侧面产生了电位差。后来这个效应广泛应用于半导体研究。一百年过去了。1980 年一种新的霍尔效应又被发现。这就是德国物理学家冯·克利青从金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET) 发现的量子霍尔效应。他在硅 MOSFET 管上加两个霍尔电极(如图

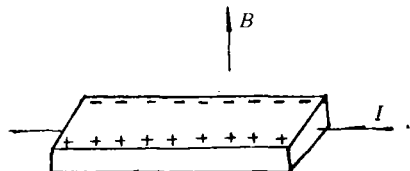


图 1 霍尔效应

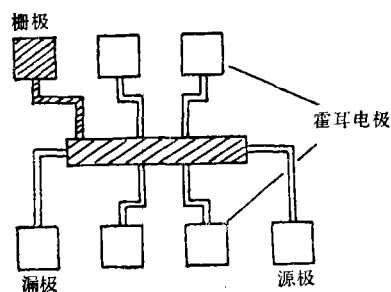


图 2 在硅 MOSFET 管上加两个霍尔电极

2)，把 MOSFET 管放到强磁场和深低温下，证明霍尔电阻随栅压变化的曲线上出现一系列平台(如图 3)，

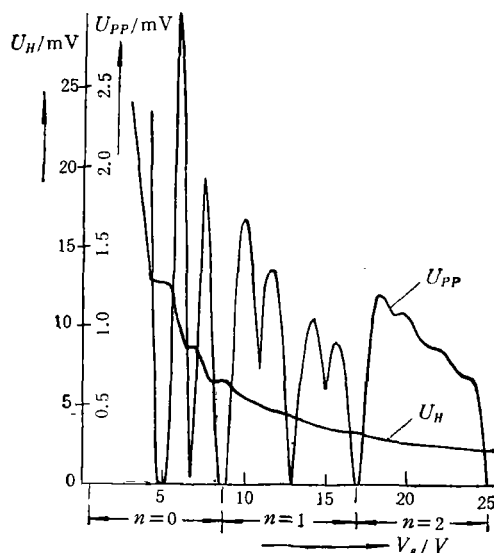


图 3 霍尔电阻随栅压变化的曲线与平台相应的霍尔电阻等于

$$R_H = h/i \cdot e^2,$$

其中 i 是正整数 1, 2, 3, ……。这一发现是二十世纪以来凝聚态物理学、各门新技术(包括低温、超导、真空、半导体工艺、强磁场等)综合发展以及冯·克利青创造性的研究工作所取得的一项重大成果。为此，冯·克

甲：看来，小行星是一个很有意义的研究领域。

乙：可不是！在相当一段时期内，小行星研究没有得到足够的重视，这些年来，情况有了较大的改变。我们的太阳系是从原始太阳星云演化而来的，而小行星们基本上都保存着原始太阳星云的原始物质，对它们的研究，以及对其轨道变化规律的探索，无疑对太阳系的动力结构和演变，以及对整个太阳系的起源和演化，都有着很重要的科学意义。

甲：有什么进一步的研究计划吗？

乙：到目前为止，除冥王星外，其余大行星都由行星探测器作了程度不等的现场考察，而小行星探测还是个空白。1989 年发射的“伽利略号”探测器以探测木星为主，在它于 1995 年到达木星区域之前，预计于 1991 年 10 月和 1993 年 8 月，分别在不到 1000 公里的地方先后飞越第 951 号小行星“加斯普拉”和第 243 号小行星“艾达”。90 年代预计发射的土星探测器和慧星探测器等，都有可能顺路对小行星进行拜访，而专门的小行星探测器计划也在酝酿之中。

利青荣获 1985 年诺贝尔物理学奖。

(一) 二维电子系统的研究

从五十年代起,由于晶体管工业的兴盛,半导体表面研究成了热门课题,半导体物理学中兴起了一个崭新领域——二维电子系统。1957 年,施里弗提出反型层理论,认为如果与半导体表面垂直的电场足够强,就可以在表面附近出现与体内导电类型相反的反型层。由于反型层中的电子被限制在很窄的势阱里,与表面垂直的电子运动状态应是量子化的,形成一系列分立能级,而与表面平行的电子运动不受拘束。这就是所谓的二维电子系统。当处于低温状态时,垂直方向的能态取最低值——基态。

由于半导体工艺的发展,六十年代初出现了平面型硅器件,用 SiO_2 覆盖硅表面制成了硅 MOSFET 管,为研究反型层的性能提供了理想器件。改变 MOSFET 的栅极电压可以控制反型层中的电子浓度。

1966 年,美国 IBM 公司的福勒,方复,霍德华与斯泰尔斯用实验证实了施里弗的理论预见。他们把 p 型硅作为衬底的 MOSFET 放在强磁场中,在深低温下测源极与漏极之间的电导。改变栅压 V_G ,测出的电导呈周期性变化,有力地证实了二维电子系统的存在。

这个实验激起了物理学家的浓厚兴趣,使二维电子系统成了国际上普遍重视的研究对象。七十年代中期,日本东京大学年轻的物理学家安藤恒也和他的老师植村泰忠从理论上系统地研究了二维电子系统在强磁场中的输运现象,对二维电子系统的霍耳效应作了理论分析。与此同时,世界上有好几个机构在进行有关二维电子系统的实验工作,其中尤以冯·克利青所在的维尔茨堡大学最为积极。

(二) 冯·克利青和量子霍耳效应的发现

冯·克利青是德国人,1934 年出生于现属波兰的波兹南,1962 年进入布朗许瓦格技术大学攻读物理。他利用假期到联邦技术物理研究所(PTB)的半导体实验室做学生工,在那里他认识了著名的物理学家兰德威尔教授。冯·克利青在工作中丰富了实践经验,对精密测量的重要性有了很透彻的认识。

在研究二维电子系统的过程中,冯·克利青和他的合作者恩格勒特,以及研究生爱伯特都曾在霍耳电阻随栅极电压变化的曲线上观察到平台。日本人川路绅治也报道过类似的现象。在 1978 年中已有多起文献记载了这一特性,当时并没有引起人们的重视,只有冯·克利青敏锐到注意到并作了坚持不懈的研究。

他发现 MOSFET 的霍耳电阻按 h/e^2 的分数量子化是在 1980 年 2 月 5 日凌晨。那时他正在法国格勒诺勃的强磁场实验室里测量各种样品的霍耳电阻。这个实验室是马克斯·普朗克固体研究所与法国国家研究中心(CNRS)联合建设的,1978 年由兰德威尔教授担任实验室主任。恩格勒特也随他一起来到格勒

诺勃,从事二维电子系统的研究。1979 年秋,冯·克利青也来参加。他们拥有一台高达 25 T (特斯拉)的磁场设备,比别的地方强得多,得到的霍耳平台也显著得多,他们测量的所有样品都显示有同样的特征, $i = 4$ 的平台霍耳电阻都等于 6450Ω ,正好是 $h/4e^2$ 。这个值与材料的具体性质无关,只决定于基本物理常数 h 与 e 。

当有人问冯·克利青,量子霍耳效应是不是一个偶然的发现?他解释说量子霍耳效应作为一个普遍规律而存在的重大想法是在 1980 年 2 月 5 日凌晨突然闪现出来的,但它是基于长期研究工作之后的一个飞跃。“通过测量大量的不同样品,才第一次可能认识这样一种特殊的规律,而这种平凡重复的测量简直弄得我们感到乏味,我们反复变化样品,变化载流子浓度,将磁场从零扫描到最大……终于我们发现了这样的特殊规律,所以这一结果的取得是长时间努力工作的结果,这些测量的曲线无时不在我的脑子里盘旋着,反复思考着。”

冯·克利青发现量子霍耳效应的确不是偶然的。除了他执着的追求、顽强的探索精神之外,还要归功于他所处的环境。他所在的维尔茨堡大学有着非常好的学术气氛,对他的研究大力支持,正如他自己所说,“这里既没有研究经费方面的困难,也没有来自行政的干扰,因此我们总是把眼光盯在最高目标上。”与工业界的合作也是他成功的一项重要因素。

(三) 量子霍耳效应的发现引起基本物理计量的巨大变化

量子霍耳效应是继 1962 年发现的约瑟夫森效应之后又一个对基本物理常数有重大意义的固体量子效应。冯·克利青从一开始就意识到这一点。当他确定霍耳平台的阻值是 h/e^2 的分值时,就主动询问联邦技术物理研究所的电气基准部对 h/e^2 的精确测定有没有兴趣。答复是如果能达到高于 10^{-6} 的精度就很感兴趣。可是在格勒诺勃精确度仅为 1%。于是冯·克利青马上返回维尔茨堡,用那里的超导线圈继续试验,不久就达到了 5×10^{-6} ,证明霍耳电阻确实是 h/e^2 的分值。于是他写了一篇通讯给《物理评论快报》,题为《基于基本常数实现电阻基准》。但因该刊编辑认为精确度不够而将文章退回。于是,克利青转向精细结构常数,将论文改写为《基于量子霍耳电阻高精度测定精细结构常数的新方法》,此文发表后得到了强烈反响。

1981 年,在第二届精密测量与基本常数国际会议上,冯·克利青进一步从理论上论证量子霍耳效应的普遍性,还总结了各种不同类型的硅 MOSFET 管在强磁场和深低温下测到的霍耳电阻数据,得:

$$h/e^2 = 25812.79 \pm 0.04 \Omega (1.5 \text{ ppm}),$$

并且预言,如果再增大磁场和降低温度,不确定度可小

(下转第 23 页)

图 6 是此时的相图。\$S_1\$、\$S_2\$ 是一级相变叶，\$L_1\$、\$L_2\$ 是二级相变线。沿 \$P_1\$ 演化时，在墙和 \$A^+\$ 体界面上要出现 \$B^+\$ 相薄膜，经过 \$S_1\$ 时，如果膜的厚度变到某宏观值，就叫作 \$B^+\$ 相完全浸润墙；如沿 \$P_2\$ 演化系统时，膜厚仍是微观值，则叫做部分浸润。因此 \$S_1\$ 上就应存在完全浸润和部分浸润的分界线 \$L_w\$。如沿 \$S_2\$ 上的 \$P_3\$ 路线演化系统时，膜就会从微观厚度变到宏观厚度。此过程中膜的厚度连续变化的，叫二级浸润相变；反之，如果膜厚是跳跃式的，叫一级浸润相变。

浸润相变的研究，无论在理论上还是在实际应用上，都有重大意义。首先，在理论上，我们知道，一般连续相变的临界指数都有普适性。但研究发现浸润相变的临界指数不具普适性，其数值可以随墙作用势的不同而变化。另外，浸润相变的级别，敏感地依赖于分子间相互作用的细节。因此，我们先在理论上假定分子间不同作用势，并讨论其相变情况，在弄清二者联系之后，就可以由实验中发现的浸润相变状况，反过去探讨分子相互作用的一些信息。

在工农业生产和日常生活中，浸润相变也有广泛

的应用。工业上的浮选矿石就是应用浸润相变的一个例子。选择某种液体，它可以浸润杂质及无用矿石，但不能浸润有用矿石。将这种液体与天然矿石碎粉混成浆状，再通入空气（或加入某种酸反应生成气泡）。由于矿石完全不被浸润，故矿石周围包围着一层气泡，被气泡带到液面上成为精矿，这就达到了选矿的目的。在直接由液态金属制取金属板或各种金属管过程中，要将能被液态金属浸润的硬质薄片浸入熔融的金属中，再将其轻轻提离液面。随着提起而不断冷却，就可得到所要求的材料。在石油开采上，因为石油、地下水和天然气共同储存在地层的多孔砂岩中，这些多孔砂岩的孔道都可看成极细小的毛细管。石油和水在与天然气接触面处形成弯曲液面，所产生的附加压强阻碍石油在其中流动。如果加入某种活性物质，使之浸润石油和岩石之间的界面，就可消除弯曲液面的附加压强，使石油顺利地开采出来。

总之，浸润相变是一个新的研究领域，有着广阔的应用前景。现在研究正方兴未艾，相信在不久的将来，人们必将揭示出它的更深层秘密。

（上接第 20 页）

于 0.1 ppm。

在 1986 年的平差中，霍耳电阻 \$R_H\$ 取六个最新测量结果的平均值，得

$$R_H = 25812.8464(16) \Omega_{BIPM}(0.062 \text{ ppm}),$$

其中 \$\Omega_{BIPM}\$ 表示国际计量局 (BIPM) 1985 年 1 月 1 日标定的欧姆基准值，\$1 \Omega_{BIPM} = 0.999998437(50) \Omega\$。

由此可得精细结构常数 \$\alpha\$ 的倒数为

$$\alpha^{-1}(\Omega/\Omega_{BIPM}) = 137.0362044(85)$$

或 $\alpha^{-1} = 137.0359902(85)$ ，

不确定度为 0.062 ppm。这样推算出来的 \$\alpha^{-1}\$ 值与 1986 年平差结果

$$\alpha^{-1} = 137.0359895(61)(0.045 \text{ ppm})$$

精确吻合。

量子霍耳效应具有如此之高的精确性和复现性，对于计量工作者确实是一件了不起的喜事。因为根据量子霍耳效应定义欧姆，正好和根据约瑟夫森效应定义的伏特，组成一对以基本物理常数为基础的电气基准，使电气单位从实物基准向自然基准过渡。

为此，国际计量委员会下属的电气咨询委员会 (CCE) 在 1986 年的第十七届会议上决定：从 1990 年 1 月 1 日起以量子霍耳效应所得的 \$h/e^2\$ 值来定义欧姆，以约瑟夫森效应所得的 \$2e/h\$ 值来定义伏特。

1988 年 CCE 第 18 届会议正式建议将第一阶 (\$i = 1\$) 霍耳平台相应的电阻值定义为冯·克利青常数，以 \$R_K\$ 表示，并通过了如下决议：

“国际计量委员会……

考虑到

——大多数现有的实验室所拥有的电阻参考标准随着时间有显著变化，

——基于量子霍耳效应的实验室电阻参考标准是稳定的和可复现的，

——对大多数新近的测量结果作的详尽研究得到的冯·克利青常数 \$R_K\$，也就是说，量子霍耳效应中的霍耳电位差除以相当于平台 \$i = 1\$ 的电流所得的值为 25812.807 \$\Omega\$，

——量子霍耳效应以及上述 \$R_K\$ 值，可以用来建立电阻的参考标准，相对于欧姆，它以一个标准偏差表示的不确定度估计为 \$2 \times 10^{-7}\$，而其复现性要好得多，因此建议

——精确地取 25812.807 \$\Omega\$ 作为冯·克利青常数的通用值，以 \$R_{K-90}\$ 表示，

——此值从 1990 年 1 月 1 日，而不是在这以前，由所有以量子霍耳效应为电阻测量标准的实验室使用，

——从同一日期开始，所有其它实验室都将自己的实验室参考标准调整为与 \$R_{K-90}\$ 一致。

——……

并主张

——在可以预见的将来无需改变冯·克利青常数的这个推荐值。”

这项决议已得到国际计量委员会同意并予以公布执行。于是，从 1990 年 1 月 1 日起，新的电阻基准和新的电压基准一道，把电气单位转移到了新的基础之上。这件事在基本物理计量史上是继秒和米的新定义之后，又一有重大历史意义的事件。值此量子霍耳效应发现十周年之际，特作此文，以资纪念。