

浅谈微结构物理

阙伟明

(北京大学物理系)

本文简要介绍八十年代新兴的人工微结构领域。从最基本的几种微结构的构成与制作谈起,展望了微结构在电子工业方面的应用前景,并论及微结构在物理学基础研究方面的深远意义。

你能否想象,有这么一个“盒子”,用它来装入电子,电子会感到天地狭小。这不是神话,而是现实:用现代科学技术,人们已经能够制造这种微小的“盒子”。这种“盒子”叫量子点,是人工微结构的一种。微结构物理是八十年代形成的一门崭新领域。八十年代中,国际上诞生了一本新杂志,叫“*Superlattices and Microstructures*”。它的诞生,可以说是微结构物理逐渐形成物理学一个小分支的标志。

一、微结构

根据量子力学原理,电子不是一个点粒子,而具有波的性质。不过,这种波的性质,只有当物理系统(或所考虑对象)的尺度与电子的德布罗意波长相当时,才能显示出来。如果物理系统的尺度远大于电子波长,电子便可以被认为是个经典的点粒子。我们谈的微结构,指的是这样一些系统:它们的三维空间尺度中,至少有一维尺度与电子波长是相当的。因此,在微结构中,人们必须用量子力学来描述电子态。电子运动受到空间尺度的约束,电子态便呈量子化。

微结构可以粗分为三类。

第一类是三维空间尺度中有一维尺度使电子运动受约束的系统,例如制作技术已较为成熟的异质结。最常见的异质结,是用分子束外延的技术先长一层砷化镓,然后再长一层铝砷化镓制成的。由于这两种半导体材料的能隙不

同,在两种材料的交界面,库仑力使得它们的能带发生弯曲。图1显示了界面附近电子受到的位势。由于在砷化镓中靠近界面的一薄层中位势最低,电子愿意留在这一薄层中。这一层的厚度,通常在5到15nm之间。在这样短的尺寸限制下,电子在 z 方向的能态是分裂的。电子在与 z 轴垂直的平面中运动仍是自由的。所以, z 方向每一条分裂能级,对应于系统的一条亚能带。如果电子密度与温度都很低,那就只有能量最低的亚能带拥有电子。这样我们便得到了一个(准)二维电子气系统。近年来,异质结对二维电子气的研究作出了重大贡献,量子霍尔效应便是用高质量的异质结观察到的。人们还可以在单个异质结的基础上作多次重复,来制作半导体超晶格。

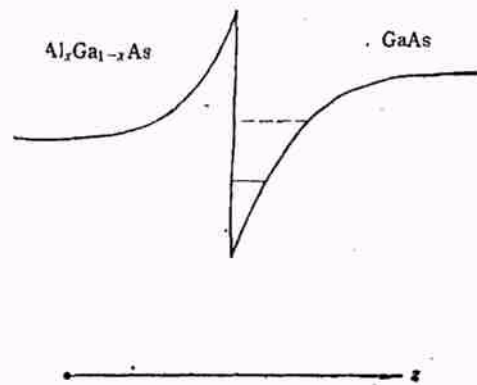


图 1

第二类是量子导线,在二维尺度上电子运动受约束。量子导线可以在异质结的基础上,用分裂门的技术来制作。如图2上半部分所

示,在一个异质结上,镀一层金属做门电极。这个门电极上开了一条细缝,用电子束刻出。细缝宽度在 10^2nm 数量级。门电极因有缝而被称作分裂门。门电极加负电压后,异质结中二维电子气层被金属覆盖部分的电子受到排斥而跑走了,只有那条一维的缝隙底下仍有电子。图 2 下半部分显示缝下电子受到的位势。在与缝垂直的方向电子能级是分裂的。最近,在量子导线中发现了一个重要的新奇物理现象,将在第三节中谈到。人们还可以用激光干涉条纹光刻技术,制作与分裂门原理相似,但拥有上万条量子导线的周期性结构:多线超晶格。

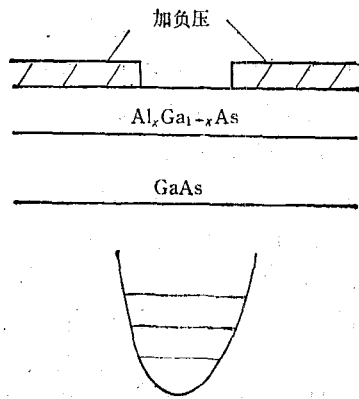


图 2

第三类是被称为零维结构的量子点,它在空间三维尺度上都使电子运动受限制。也有人把它称为量子盒。制作方法是:先用分子束外延法制成如图 3 所示的多层结构,表面加一层 PMMA 材料。用电子束在 PMMA 层上打圆孔,并在圆孔中存入金属,以作电极。然后去掉 PMMA 层,并用 BCl_3 气体作切割,沿金属圆点切出一个柱状物。这个圆柱的直径在 10^2nm 数量级。砷化镓层厚为 5nm 左右。图 3 右方面画出了电子的位势,显示砷化镓层位势低,被夹在两层位势高的铝砷化镓层中间,电子因此被束缚在砷化镓层里。由于圆柱直径很小,电子在与柱轴垂直方向的平面中运动也受限制。所以在这个结构中,电子在三维方向全受限制,能级完全分裂。国际上研究量子点只是

四年前才开始的,量子点中的分裂能级首次从实验上直接观察到是 1988 年由美国德克萨斯仪器公司的实验室实现的^[1]。量子点的原理简单,应用上很有前途,但在实验制备上需要精细的工艺。

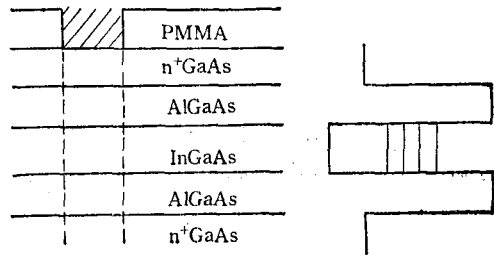


图 3

二、令人振奋的应用前景

1988 年 3 月美国的“Scientific American”杂志上发表了 Bate 的一篇文章^[2],指出下一代的电子器件,可能会被利用量子力学原理制成的微结构器件替代。今天的电子器件大都是根据经典电磁学原理来制作和工作的,要提高它们的性能是有极限的。而用量子力学原理制成的器件,由于从基本工作原理上不同,它们将在性能上毫不费力地成百倍超过现代的“经典”电子器件。如果在微结构器件的制作技术上有所突破,那么现在的电子器件就会大批被淘汰,从而可能带来一场电子工业的革命。

我们不妨举例说明。现代集成电路中,大部分的功能是由晶体管来担当的。现代的场效应晶体管,有三个电极:源极、漏极和栅极。漏极相对于源极加正电压,于是电子从源极漂向漏极,形成电流。源漏两极间有个栅极,栅极加上正压,可以阻碍电子漂向漏极,甚至切断电流。如果我们把电流通时作为“开”态,电流断时作为“关”态,场效应晶体管就可以作为一个“开关”来作计算机的基本构件,因为计算机是两进位的。要提高计算机的速度,缩小源漏两极的距离是有利的,因为距离短了,电子从一端跑到另一端所需时间就短了,这就使计算机的速度提高了。另外,两极距离短了,集成电路单

位面积容量就大了。然而，现代场效应晶体管极间距离的缩小是有极限的，因为源漏两极间距离太小，就会产生漏电，使本来明显的“开”和“关”两个状态变得模糊了。漏电还会损耗能量。现代场效应晶体管中电极的距离比电子平均自由程长得多，因此电子从一端跑到另一端要多次受杂质与缺陷的散射，而这些过程会影响器件的性能。要想改进器件性能，研制更高速的计算机，依靠改进现代场效应晶体管只能作有限的量的提高；而依靠微结构量子器件，则会带来质的飞跃。设想我们用一个量子点，做一个二极管。由于量子点的能级是完全分裂的，它的输运过程很不寻常。如图4所示，如果左端电极的费米能正好与量子点中的某个能级吻合，那么从量子力学原理，电子就可较易地穿透势垒，从一端跑到另一端。这是所谓共振穿透。如果左端电极的费米能正好处于量子点中两条能级中间，那么电子就较难穿透，可以通过的电流就小了。量子点的电流——电压曲线如图4下方所示。图中电流峰值对应于共振穿透，峰谷对应于左端电极费米能处于量子点两条能级中间。从峰到谷这一段，电流随电压增加是减少而不是增加。这种反常现象是量子力学的特征。量子点做得越小，能级分裂越大，电流峰值与峰谷值相差就越悬殊。我们可以选一

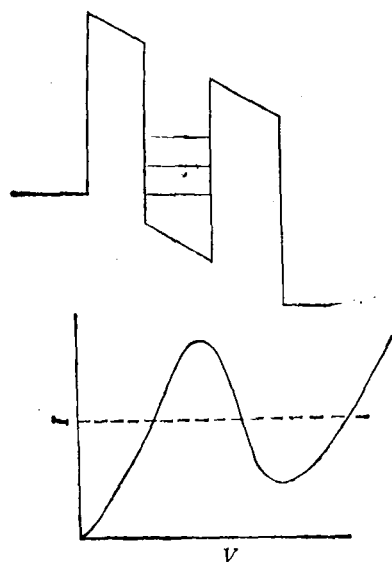


图 4

中间值作为参考值，电流比该值大就认为量子点处于“开”的状态，反之就处于“关”的状态。这样一个量子点也就可作为一个“开关”使用了。量子点的厚度，可比现代场效应晶体管源漏极距离小成百倍，这样这个“开关”的速度便以百倍的数量级提高了。另外，由于量子点的厚度可以做得比电子自由程更小，电子从一端跑到另一端可完全不受杂质与缺陷影响。无疑，微结构量子器件是研制下一代超级计算机的最佳候选者。

这个例子很好地说明了微结构的应用前景。微结构还有许多其他应用，就不便一一例举了。

三、深远的物理意义

从物理学基础研究的角度看，微结构同样是非常重要的，它为我们提供了研究低维系统和量子效应的可能性。微结构研究在国际上尚属起步阶段，许多新的物理现象正在被揭示。例如，1988年英国^[3]和荷兰^[4]的两个实验小组，分别发现了同一个独特的物理现象：一维量子导线电导的量子化。英国小组用分裂门的技术，在一个二维电子气上制作了一条量子导线，这条导线长为 $0.5\mu\text{m}$ ，宽为 $0.7\mu\text{m}$ 。由于该系统电子的平均自由程为 $2\mu\text{m}$ ，电子从导线一端到另一端可不受任何散射。他们测量了这条导线的电导，发现电导呈量子化。图5显示了电导随门电压的关系。电导量子化的基本量子是 $2e^2/h$ 。这个量子与整数量子霍尔效应的基本量子是相同的。与二维电子气中量子霍尔效应的区别在于，一维量子导线的电导在有无磁场的情况下，都是量子化的。这个实验新发现，具有深刻的物理意义，不见得会亚于量子霍尔效应。1988年11月美国的“*Physics Today*”在“探索与发现”一栏中对此已作了报道。我们知道，量子霍尔效应的发现曾有力地推动了物理学的发展。如今，量子导线电导量子化的发现又为物理学提出了新课题。微结构物理研究在国际上开展时间并不长，却已有不少重大发现，

揭示了这个领域的远大前景。随着研究的深入,一定会有更多有意义的新发现诞生。不夸张地说,微结构将是凝聚态物理的前沿领域之一。

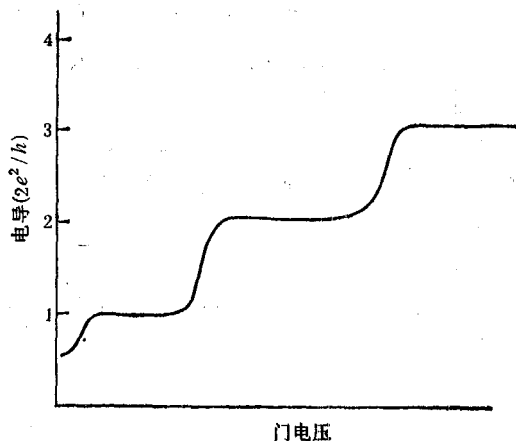


图 5

微结构,不管是从应用的角度,还是从物理

学基础研究的角度,它的前景是不可低估的。这一年轻的领域,在今后的岁月中,无疑将会硕果累累。它或许会带来电子工业的新纪元,或许会产生下一个诺贝尔奖金得奖者。这是一个激动人心的领域。

国际上在微结构研究上起步尚不久,如今越来越多的科学家正关注和进入这领域。在这种情况下,我国的科学家该怎么办?是看着国外已经启动的脚步,越离越远,还是乘该领域发展尚处早期,尽快占一席之地,跟上前进的步伐?很明显,中国在微结构研究上如果袖手旁观,一定要吃大亏的。跟上该领域前进的步伐是摆在我国科学家面前的一项艰巨任务。

- [1] M. A. Reed et al., *Phys. Rev. Lett.*, 60(1988), 535.
- [2] R. T. Bate, *Scientific American*, No. 3 (1988), 96.
- [3] D. A. Wharam et al., *J. Phys. C*, 21(1988), 1,209.
- [4] B. J. van Wees et al., *Phys. Rev. Lett.*, 60(1988), 848.

(上接第 457 页)

向长波方向变化,但是达到胆甾相后,随温度升高,反射波长却从长波向短波方向变化。整个相变区(从 S_c^* 相到胆甾相到各向同性相)彩色随温度变化,逐渐艳丽,色变温度区间很宽。

3. S_c^* 相液晶热色效应的应用

(1) 温度指示器及热警报指示器

液晶变色温度区在 $0-20^\circ\text{C}$ 时,可用于商标标签、广告彩色显示。在 $20-30^\circ\text{C}$ 时,可用于温度计量、墙壁装饰。在 $25-45^\circ\text{C}$ 时,用于珠宝、手镯工艺品、癌症检测,变色布匹及无线电指示器,非破坏性检测以及红外检测。在 $50-80^\circ\text{C}$ 时,热警报器用于火车、飞机马达以及暖气片温度指示,家用炊具指示。在 $90-100^\circ\text{C}$ 时,用于蒸气的沸点指示,导管温度指示。在 $-30-10^\circ\text{C}$ 时,用于冷藏库温度指示。在 $0-10^\circ\text{C}$ 时,用于冰箱、血库温度指示。

(2) 医学上应用

用 S_c^* 相液晶进行乳房癌、皮肤癌、血管病诊断、药理试验,对皮肤缝接区、胎盘区、静脉区的检测有简便、快速、无痛苦之优点,它是一种

有效的医用工具。

(3) 非破坏性检测

用于表面和次表面裂缝、焊接处、粘结处的缺陷检测,电子元件、电子电路失效的检测以及涡流、风洞检测,极为有效。

此外,在红外、微波、超声、热谱检测方面已经得到了有效的应用。

- [1] G. W. Gway., *Smectic Liquid Crystal Textures and Structures*, Leonard Hill, Glasgow, (1984).
- [2] 林磊, *物理*, 11(1982), 171.
- [3] T. S. Patel and T. W. Goodby, *Opt. Engin.* 26(1987), 373.
- [4] R. S. Cahn, *Angew Chemie (Int. Edis.)*, 5(1966), 385.
- [5] Ph. Martinot-Lagarde, et al., *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 75 (1981), 249.
- [6] G. W. Gray, *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Lett.*, 34 (1977), 211.
- [7] J. Cognard, *Mol. Cryst. Liq. Cryst., Suppl.* 1(1982), 1.
- [8] K. Yoshino, *Jap. J. Appl. Phys.*, 17(1987), 597.
- [9] J. L. Janning, *Appl. Phys. Lett.*, 21(1972), 8.
- [10] J. S. Patel, *J. Appl. Phys.*, 59(1986), 2355.
- [11] 岩佐浩二, *电子材料*, No. 2(1987), 76.
- [12] G. W. Gray et al., *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 37(1979), 189.