

真空技术与现代物理学的发展

郭奕玲 沈慧君

真空是指没有空气或只有极少空气的空间。真空状态的获得和低气压的测量构成了一门特殊的技术叫真空技术。这门技术对现代社会的生产和生活有着重要作用。众所周知,电灯泡在生产过程中必需抽成真空,如果漏气,灯丝就会烧毁;保温瓶的夹层必需抽空,否则就会失去保温性能;原子物理和分子物理实验装置更离不开真空设备,如果不抽真空,就无法探索微观世界的奥秘。可以说,现代物理学离不开真空技术。为了说明真空技术与物理学发展的关系,让我们先来重温三百年来真空领域的探索历程。

真空技术的早期发展

1643 年左右,伽利略的学生维维安尼在托里拆利的指导下,用水银柱作实验,发现了托里拆利真空。盖里克对真空作过详细研究,1663 年写成一部《论真空》的手稿,记述了他研究真空的许多实验。脍炙人口的马德堡半球实验就是他给皇家表演的真空实验,十六匹马拉不开抽空了的两个直径为 25 厘米的半球。1659 年玻意耳通过真空实验,建立了著名的玻意耳定律。

十九世纪中叶,由于电学的发展,人们开始研究气体放电。法拉第 1838 年在观察低压气体放电现象时,发现了法拉第暗区。

1855 年,德国玻璃技师盖斯勒用玻璃管道制成密封比较完善的水银泵,如图 1。当水银容器 B 向上提升时,水银迫使 A 中空气经三通阀泄走;然后放下水银容器,同时将三通阀转 90 度,于是空气被吸向原来为水银所占的空间 A,当水银柱达到最低点时,再将三通阀转向原位,切断 A 与被抽容器间的通道。这样周而复始,就可以不断抽气。由于水银和玻璃的严密接触,这种真空泵比皮革活塞做成的抽气唧筒优越,可以达到更低的压强。

运用盖斯勒泵和盖斯勒制造的放电管德国人普吕克尔在 1858 年发现了阴极射线。正是由于人们长期对阴极射线的研究,导致了在十九世纪末 X 射线、放射性和电子的发现。

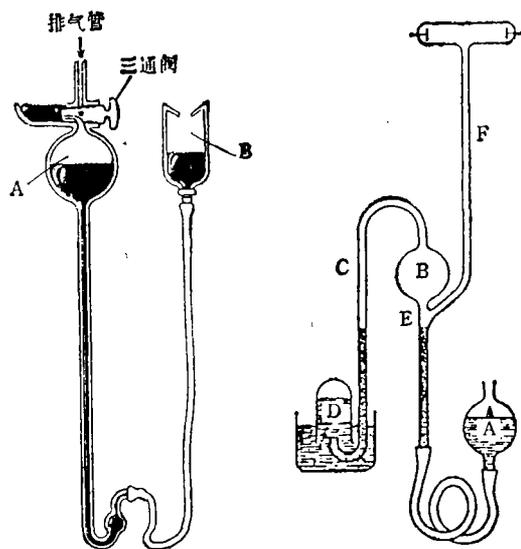


图 1 盖斯勒泵

图 2 托普勒泵

电气照明的需要进一步刺激了真空技术的发展。1878 年斯旺发明白炽碳丝电灯(见封三图 1),不久开始成批生产灯泡。当年生产灯泡所用的托普勒真空泵如图 2。总高约 7—8 英尺,也要靠水银槽 A 的往复升降,把容器 B 中的空气排出,再抽取待抽玻璃管 F 中的空气。与此同时,另外一种水银泵也广为应用,是斯普伦格在 1865 年发明的。它的原理是基于水银从高处 A 经管口 E 落下时形成液滴,夹带空气下落,使得抽容器的气压降低,这种泵的优点是免除了费劲的反复升降容器的操作,不过效率非常之低。

这两种泵都要用到有毒的水银,对实验者的健康是很不利的。尽管如此,水银真空泵在十九世纪末年还是发挥了很大的作用,并得到不断改进。杜瓦则根据真空绝热的特性发明了杜瓦瓶(1893 年)。

真空技术的早期发展,为物理学通向微观领域开辟了道路。因为只有在气体充分稀释的条件下,人们才有可能观察到气体原子的行为,研究其特殊的规律

性。反过来,由于科学技术和生产领域的迫切需要,又刺激了真空技术的发展。特别是二级真空管(1904年)和三级真空管(1906年)的发明,显示了真空技术不适应各方面的要求,促使更多物理学家和工程技术专家从事真空方面的研究。

盖德的贡献

二十世纪初真空技术有了很大发展,1905年,德国物理学家盖德(见封三图3)设计了转动式水银真空泵,这种真空泵无需活栓和阀门,可以把10—20毫米汞柱的真空状态在很短时间内抽至高真空状态。



图3 盖德的回转油泵

不过,真正得到广泛运用的是两年后盖德设计的另一种机械真空泵,叫回转油泵,如图3。它用油代替水银,转子上附有刮片。这种泵直至今天还广泛使用。

盖德在研究气体抽运的过程中,细致摸索了内摩擦对抽气速率的影响和其中的规律。他做了一系列实验,测量了大量数据,并利用气体内摩擦达到抽气的目的,从而发明一种崭新的真空泵,叫分子泵。



图4 盖德的分子泵

盖德分子泵的最初设计如图4,特点是在定子与转子之间有一段很窄的空隙,空隙间距远小于分子自由程。在空隙中,气体分子之间相互碰撞的机会比气体分子碰到转子的机会要少得多,于是入口处有大量分子被转子表面拖曳而带到出口处,形成压差。这种分子泵虽然还不适于实际应用,

但却为后来的发展奠定了基础。

现代的几种真空泵

现代用得最广泛的真空泵——扩散泵也是盖德发明的。1915年他发表论文,阐述了自己的设想和设计。他让汞蒸汽经过喷口形成低气压,气体由分压强度高处向分压强度低处扩散,从而达到抽气的目的。汞蒸汽再经分馏装置不断脱气,形成自动循环。

1916年美国的朗缪尔(见封三图4)在盖德的基础上发展了冷凝系统,使扩散和分馏的效果更佳。由于盖德认为不需要冷凝,两家展开了竞争,促使扩散泵的

理论和设计急速发展,以后二十年间,大量文献涌现,设计不断翻新。

1921年沃尔末发明多级串联扩散泵,使抽速大大提高。

1928年,英国的伯希发现,在石油分馏产品中有一些高沸点的成分可以代替水银充当扩散泵的工作物质,这样就减低了液空或液氮冷阱,使扩散泵的设计简化,同时也可避免汞的毒性有害人的健康。

扩散泵设计的理论依据一直不很完善。中国的何增禄1932年建议用喷嘴的气流速度和根据分子运动论计算的理论速度之比,作为衡量扩散泵效率的参数,这个参数就叫“何氏系数”,它一直是真空技术中的重要概念。同年的另一篇文献中,何增禄公布了他设计

表1 何增禄的扩散泵指标

	单嘴(小)	单嘴(大)	四嘴	七嘴
抽速(升/秒)	4	14.5	33	55
输入功率(瓦)	60	140	140	200

的一种高效率扩散泵,共有七个喷嘴,人称“何氏泵”。从表1所列几种扩散泵的抽速和输入功率,可以看出何氏泵具有很大的优越性。

到三十年代后期,扩散泵几经改革,抽气速率达200升/秒,极限真空达 10^{-7} 托,基本上满足了飞速发展的电子管工业的需要。

三十年代以后,真空泵的类型不断扩展。1953年,美国威斯康星大学的赫伯在研制静电加速器的过程中发明了吸气离子泵,这种泵后来可以产生低于 10^{-10} 托的真空,广泛用于加速器系统中。

1958年,普法弗尔真空公司的贝克尔在早年盖德分子泵的基础上,发明了类似涡轮压缩机的涡轮分子泵,它的功率极大,抽速超过100升/秒,甚至可达 10^4 升/秒,极限真空度可达 10^{-9} — 10^{-7} 托,甚至可达 10^{-11} 托。这样的真空泵非常适合加速器、质谱仪、表面谱仪和电子显微镜等大型设备的需要,因此发展很快,成了现代实验室中常备的真空机组。

六十年代兴起了低温泵,它的快速抽气性能和清洁无油,特别适用于大型空间模拟装置。这种泵可以达到 10^{-12} — 10^{-13} 托,实际上和宇宙空间的真空度不相上下。

真空量测技术的发展

真空技术的发展不能光看真空泵的变革,因为如果没有适当的测量手段,也就无法利用真空。早期用U形水银管测压强只能测到1/10托。直到1874年,英国的麦克劳发明了压缩式真空规(如图5),才第一次可靠地测出真空的绝对压强值,它的测量范围是 1 — 10^{-6} 托。1906年皮拉尼根据气体的热传导随压强变化的特性设计了热丝真空规,这种真空规以及后来进一步改进的热偶真空规用起来都很方便,只是要校

准后才能使用,可测量 10^{-10} 托的低真空。



图5 麦克劳真空规

二十世纪以来,由于真空技术的广泛应用,各种类型的测量仪器(真空规)相继问世。其中有:1910年克努曾的辐射计,1913年朗缪尔的振荡石英计,1916年布克莱(Buckley)的热阴极电离规和1937年的冷阴极电离规。电离规根据电子三极管的原理制成,可以用于测量 10^{-3} — 10^{-7} 托的真空度,基本上满足了三十年代电子工业的需要。然而,再前进一步却遇到了难以逾越的困难。三十年代已经有人发现,电离规的测量值有一极限。从表面吸收实验得到足够的证据,证明真空系统的真空度可能已达到 10^{-10} 托(10^{-10} 托以下的压强称超高真空),电离规的指示却仍然停留在 10^{-8} 托的量级。显然,电离规有一本底电流。于是许多人开始致力于改进电离规的设计。

贝阿德(Bayard)和阿尔帕特(Alpert)在1950年作出了突破,提出一种别出心裁的设计。可将测量范围延伸到 10^{-11} 托。一下子就使真空量测进入了超高真空的领域。人们把经过这样改进的电离管称为

B-A 规,以表彰贝阿德和阿尔帕特的功绩。现在这种电离管已经成了超高真空段中应用最广泛的一种量规。

真空技术的这段历史可以给我们哪些启示呢?也许读者首先得到的印象是:物理学和技术是紧密相关的。物理学发展的不同阶段是与技术水平互相适应的。物理学越是向深度和广度扩展,对技术的要求也就越高。它促使人们研究和改进技术、开发新技术,这些人中间就有许多物理学家。他们工作在技术领域,研究技术中的物理问题,对技术的发展作出了贡献,从而推动整个科学技术向前迈进。这样的例子是很多的,真空是一例;加速器也是一例;激光更是对现代社会有巨大影响的又一例……人们正在拭目以待低温超导工程,这个领域也必将对整个科学技术以致于人类社会产生巨大的反馈。

同时,技术的发展也要受到自然科学,特别是物理学发展水平的制约。技术必须有理论的指导,必须有实验研究作为其中间环节,两者的相互制约决定了物理学家、特别是实验物理学家和工程师与技师之间的协作和配合的必要性。有许多科学先辈本人往往就一身而二任。不少有远见的工程技术人员很重视理论和实验研究。只有这样,才有助于新技术的开发和完善,而实验作为贯穿基础研究、应用研究、开发研究和生产四者之间的一根红线,更有其不可抹煞的作用。

(上接第18页)

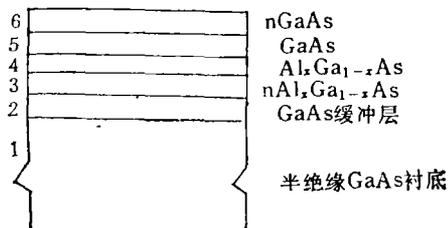


图7 HEMT 材料示意图

同样有人用改变超晶格的参数可以改变禁带宽度的原理用 GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ 量子阱(阱宽 13 \AA — 55 \AA)材料做成了频率在 707 nm — 837 nm 范围的激光器。

非线性光学器件 我们知道在电子学中有电非门和双稳态电路等非线性器件(单元)。同样在光学中也有类似的器件。在这些器件中都利用了超晶格材料具有明显、尖锐的激子吸收峰这一特性。有关它们的详细介绍已超出本文的范围。

高电子迁移率晶体管。 近些年来人们已经用所谓二维电子气材料做成了 HEMT,为简明起见将用于做 HEMT 的材料结构用图7加以说明。生长 GaAs

缓冲层是为了使以后生长的晶体质量更好。 n 型 $Al_xGa_{1-x}As$ 中的电子由于第五层 GaAs 的带宽比 $Al_xGa_{1-x}As$ 的低而呆在 GaAs 中。生长不掺杂的第四层 $Al_xGa_{1-x}As$ 是为了减小第三层中电离的离子对第五层中的电子散射从而提高第五层中电子的迁移率。第六层,即最上一层,是为了做源、栅和漏电极的。第五层是有源层。用栅极电压控制有源层的有效沟道的宽度,从而控制由源到漏的电流。有源层电子迁移率越高,高电子迁移率晶体管工作速度就越快。而有源层中电子迁移率取决于 GaAs 的晶体质量,厚度,第4层不掺杂 $Al_xGa_{1-x}As$ 层的厚度以及第三层 n 型掺杂 $Al_xGa_{1-x}As$ 的掺杂浓度和厚度等参数。这种高电子迁移率晶体管的工作速度和跨导都不错。但在低漏电流下的增益容易退化。夹断特性也不太好。有人做了改进,其中一个单量子阱起了很大作用。

超晶格对基础研究和应用都很重要,所以世界上不少有名望的固体物理学家正从事这方面的研究工作。美国的贝尔实验室和 IBM 实验室都在积极地在在这方面进行材料、器件和应用基础的研究。现在创办了专门的国际性期刊“超晶体和微结构”。我国也为超晶格的研究设立了专门科研基金和年会。在材料制备器件制备和基础研究方面取得了不少成绩。

真空技术与 现代物理学的发展

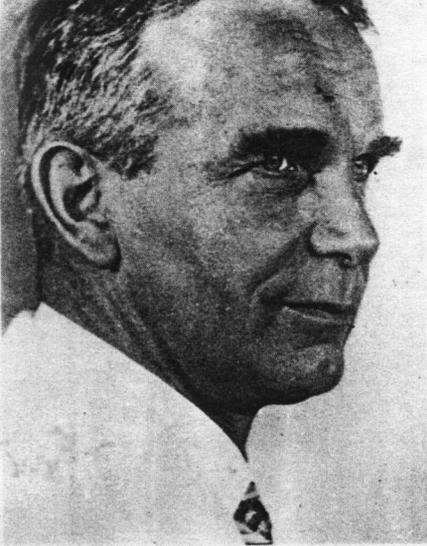


图3 德国物理学家
盖德 (W.Gaede)

(详见本期文章, 照片由郭奕玲提供)

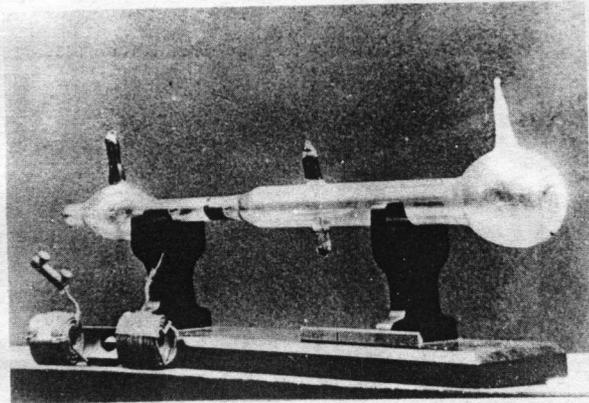


图5 J.J.汤姆生用这支阴极
射线管测荷质比, 从而
发现了电子

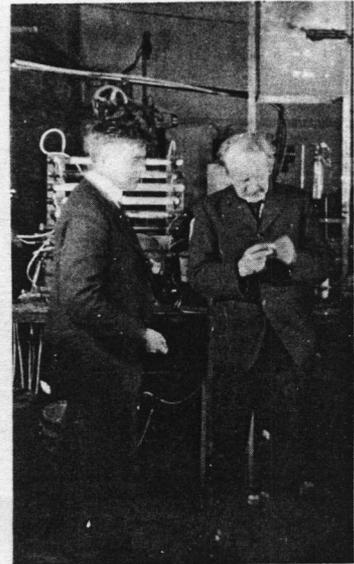


图4
J.J.汤姆生和朗缪尔
一九二二年在通用电
气公司实验室里

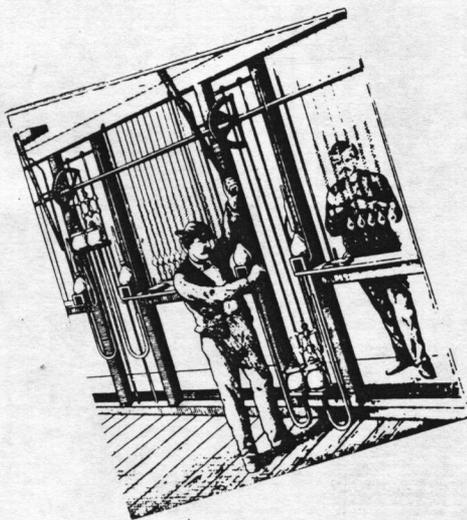


图2 一八八三年生产电灯泡
所用水银真空泵

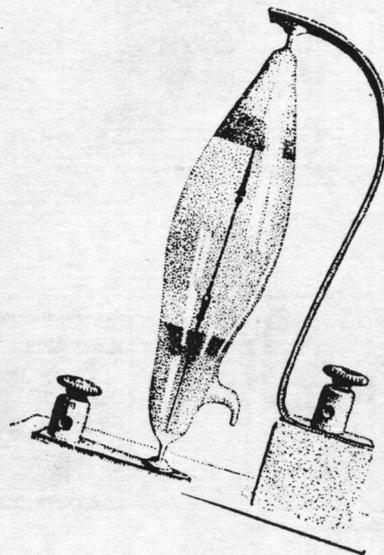


图1 一八七八年斯旺发
明白炽碳丝电灯