

同步辐射的科学应用与第三代 SR 光源¹⁾

唐 鄂 生

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 同步辐射 (SR) 具有其他常规光源所不能比拟的优异特性。本文在简要叙述 SR 光源特性的基础上, 概要介绍了在北京同步辐射装置上进行过的同步辐射应用研究, 探讨了第三代同步辐射可能的工业应用。还介绍了第三代同步辐射光源及光束线的主要特点。

关键词 同步辐射, 科学应用, 第三代

Abstract Synchrotron radiation is an excellent light source which have not been met before from other sources in the scientific research. On the brief description of the SR characteristics some scientific research which have been done in the Beijing Synchrotron Radiation Facility are illustrated. Potential industrial application of SR are presented. The main performances of the storage ring as a light source and characteristics of the beam lines for the third generation SR source are described.

Key words synchrotron radiation, scientific application, third generation

1 引言

高能带电粒子在加速器中以接近光速的速度作圆周运动时, 沿切线方向发出的电磁辐射称为同步辐射 (synchrotron radiation, 简称 SR), 具有光能极为优异的特性:

(1) 有很强的辐射功率。例如, 电子能量为 2.0GeV, 磁场强度 $B = 1.0\text{T}$ 的中等储存环, 同步辐射的能谱亮度(单色光的光子数)为 $1 \times 10^{12}\text{photon/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\text{BW}\%$, 比通常使用的 60kW 转靶 X 光机高 1000—10000 倍。因此, 可极大的改善信噪比, 数据采集时间大为缩短, 因而使快速动态微区或小试样的实验观测成为可能。

(2) SR 沿着电子运动的切线方向具有很强的准直性。对于 2.0GeV 的电子储存环, 其发散角约为 0.2mrad。由于发射角小, 就可能获得很好的空间分辨率, 并且在微区内获得很高的光子通量。

(3) 有极宽的连续能谱分布, 从红外、可见光、紫外软 X 到硬 X 射线, 横跨 4—5 个数量级, 其峰值亮度大约分布在特征能量附近。对于 2.0GeV 的光源, 可利用的能区上限为 20—40 keV, 如果采用特殊的超导磁铁技术, 可以延伸到 60keV 以上, 利用特定的单色器可以任意选择所需波段进行实验分析。

(4) 有偏振特性。电子轨道平面可以获得至少具有 75% 的线偏振度, 对分析具有磁性结构不对称性的样品极为有利。

(5) 有优异的脉冲时间结构。脉冲宽度可为 300ps 或更短。脉冲周期约几百 ns 或更长些, 可以用作时间分辨光谱的测量。

(6) SR 的超高真空环境使光源极为洁净, 可以减少各种环境因素对复杂测量过程的干扰, 从而保证实验数据的可靠性。

由于 SR 的优异特性使许多过去不能实现的“梦想”成为现实, 有人称 SR 为“神光”。

1) 1994 年 10 月 10 日收到。

世界上第一台用作 SR 光源的是 1968 年美国 Wisconsin 大学的 Tantalus, 电子能量 240MeV, 现已退役。世界上第一台专用的 SR 光源是日本东京大学固体物理研究所研制的 SOR-ring, 1970 年设计, 1974 年建成, 目前仍在继续运行。它一方面作物理实验, 同时作为 1.3GeV 新 SR 光源的注入器。短短的 20 年里已有 15 个国家 39 个实验室拥有或正在建造或计划建造的 SR 光源, 电子储存环总数已达 54 座。光源性能不断提高, 已从第一代光源发展到第三代光源。第四代光源的概念正在逐步形成。

2 我国 SR 的发展概况及应用举例

我国现有三座同步辐射装置, 分别座落在北京、合肥和台湾新竹。按其性能来说北京同步辐射装置 (BSRF) 是与高能粒子物理兼用的同步辐射光源, 属第一代, 能量为 1.6—2.8 GeV, 合肥国家同步辐射实验室 (NSRL) 为专用的 SR 光源, 属第二代, 能量为 0.8GeV, 台湾新竹的同步辐射研究中心 (SRRC) 为专用的 SR 光源, 属第三代, 能量为 1.3GeV。这三座装置已分别于 1989、1992 及 1994 年起投入使用。以下以 BSRF 为例说明 SR 的科学应用。

中国科学院高能物理研究所在北京正负电子对撞机 (BEPC) 的建设过程中, 本着“一机两用”的方针, 建成了同步辐射装置, 于 1989 年底起投入试运行和运行, 至今已接待用户近 100 户, 取得了许多在常规光源上不可能完成的科学实验和科学应用, 充分体现了 SR 的优越性及其科学价值。

目前 BSRF 共有 11 个实验站, 其中 7 个实验站工作在硬 X 波段 (3.5—23keV) 另外 4 个站工作在软 X/VUV 波段 (4—1500 Å)。BSRF 自 1989 年投入运行以来在材料科学、凝聚态物理学、生物医学、地矿能源、软 X 光刻等许多领域作出了重要结果。

在材料科学与凝聚态物理学方面, 应用 X 射线形貌学研究了晶体材料及器件表面和内部

微观结构的缺陷。例如对 $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+d}$ 等高温超导体发现了新的相变点; 用晶体衍射的方法研究了人工多层膜及超晶格的结构, 为开发出新的光学、光电子器件做出了贡献。应用 EXAFS 方法研究了非晶材料中相关元素的近邻结构, 促进了催化剂的结构和功能研究。用光电子谱仪研究了纳米材料, C_{60} 等材料的电子态结构。在生物医学研究方面, 用微束荧光分析了人体细胞内微量元素的成分, 癌变过程中微量元素的浓度分布。在技术科学方面进行了深亚微米软 X 射线光刻的工艺研究, 目前已能达到 0.2—0.1 μm 的细线条, 为超大规模集成电路的开发打下了基础。以上列举的仅是在 SR 光源上开展工作的极小部分。这些结果用常规光源是不可能取得的。BSRF 的成功运行, 走出了 SR 应用的第一步, 显示了 SR 的巨大优越性^[1]。

3 第三代同步辐射光源的科学技术应用^[2]

第三代 SR 光源比以往的同步辐射光源具有更高的亮度, 这意味着可以提供更高的空间分辨、能量分辨和时间分辨能力, 因而有更多的科学机遇。

3.1 生命科学

生命科学是研究各种生命现象及其本质的科学, 但直到现在人们对此仍然知之不多。了解生命现象的规律及其本质, 就可能找到有效的方法, 从根本上对农业、医学等学科予以变革, 从而改变人类的生存环境。本世纪 50 年代, 由于 DNA 双螺旋结构的发现, 开创了生物学从宏观转入微观的角度来研究生命现象, 进入了分子生物学的时代。SR X-光衍射技术是用以研究蛋白、核酸、神经等结构与功能的最有力的手段。由于生物晶体的微小尺寸 (μm 甚至更小) 及生物试样制备的困难, 高亮度的 SR 光使这种研究能在短时间内, 收集到足够的数, 并可观测其动态过程。例如白光劳厄法, 使多波长反射术等方法的应用有了可能。在分子和

细胞生物学方面,应用 SR 微探针荧光分析可以分析单细胞中微量元素(如 Al, Zn, Fe 等)的含量和位置。这些元素在细胞的破损以及某些疾病中起着重要作用。SR 软 X 光“水窗口”的全息显微术可以对活的生物细胞的三维结构进行直接观察,这是其它光源所不能比拟的特点。

在临床应用方面,SR 微束 CT(计算机断层扫描术)和心血管造影术将对许多疾病的诊断和医疗起重要作用。

一个重要的例子是“攻克癌症”。癌症的实质是什么?怎样才能攻克癌症,这是当前各国生物医学家努力研究的重点。细胞是构成生物结构和功能的基本单元,细胞核又是细胞的司令部,它含有的染色体是由 DNA(脱氧核糖核酸)与蛋白质构成的。生物的遗传信息储存在 DNA 生物大分子中, DNA 分子的双螺旋结构,保证了它的自我复制的机制。当前癌症的研究重点主要集中在决定人类细胞正常生长的基因上,其中之一叫 ras gene。正常的 ras gene 控制着细胞的生长和分裂。当基因密码受到变异, (mutation) 变为 ras 肿瘤基因 (oncogene) 时,由它产生的 onco 蛋白,不再能产生关闭细胞分裂的信号,从而使癌细胞无限止的生长分裂,这就引起肿瘤。SR X-ray 晶体学是目前研究人体复杂分子最有效的方法,科学家用 X-晶体衍射方法来比较正常的和变异的 ras 蛋白的形式,分析数据给出高精度的原子位置的信息。目前已经找到了细胞分裂中“开”和“关”的工作过程,因而也就不难找到修复的办法。例如,可以通过基因工程,对 DNA 进行重新组合后,移入生命体,使它复制成正常细胞。由于 DNA 大分子的尺度很小,例如,其双螺旋结构中碱基平面的间隔仅 3.4 \AA ,螺旋直径为 20 \AA ,螺距为 34 \AA ,再加上扭曲、折叠 8000—10000 倍,因而基因是一个极其微小和复杂的三维空间结构。同时,要从细胞中提取 DNA,是很困难的,不仅量少而且衍射信号弱,因此,必须要用高亮度的第三代 SR 光源和微束技术才能精确观测其结构。为了观测活体,

还必须快速,否则生物很快死去^[2]。

3.2 材料科学

新的高亮度同步光源可以为材料科学研究提供更有力的研究手段。例如,显微术和谱学显微术是表面和内部微观尺度化学分析的极好工具,它在微电子学、高温超导体及二维系统能带结构以及铁磁材料的畴结构等研究方面起着重要作用。团簇不仅是物质从原子到固体间的过渡,而且其本身还有十分独特的结构及物理化学性质。在凝聚态物理基础研究、工业应用研究和环境科学研究中,团簇性质的研究有重要意义。与时间分辨谱仪相联系的团簇谱学将极大地推动这方面的研究工作。作为工业应用的例子,介绍 SR 高分子聚合物的研究工作。

金属、陶瓷、高分子是工程材料的三大支柱。高分子聚合物包括塑料、橡胶、薄膜、纤维、胶粘剂和涂料等。从市场上看年产值超过 5000 亿美元。它有着极为广泛的应用,从食品包装、运动器械、汽车到航空等无处不用。

高分子化合物一般具有长链结构,每个分子好象一条长长的线。许多分子(分子量在几百到几百万之间)纠集在一起,构成一团扯不开的线团。这就是高分子化合物具有高强度可作为结构材料使用的根本原因。材料的性质与材料的结构密切相关。高亮度 SR 光源提供了研究材料结构的好机会。例如新发展的近边吸收结构显微术(XANES),可用以研究高分子聚合物中元素的化学价态以及聚合物成分的取向,例如甚至可以区分 C—C, C=C, C≡C 之间的不同。由于第三代光源的高亮度,这就有可能把 X 光斑聚得很小,能量分辨提得很高,带宽取得很窄,而同时在样品上仍能获得足够的光强和合理的曝光时间。该技术还可以应用 SR 的线偏振性质,从而确定聚合物链的取向。这对寻找优异性能的高分子聚合物是极端重要的。将空间分辨、能量分辨、偏振性能集于一体,充分发挥 SR 综合优势,是第三代 SR 光源应用研究中的重要方向^[2]。

3.3 信息科学^[2]

信息技术是 21 世纪重点研究开发的新技

术,也是高技术的前导。信息社会以计算机技术为支柱,以微电子技术为核心。为了建造速度更快,性能更强的计算机,有两个发展方向:

3.3.1 增加磁盘信息量

研制新型磁性材料是增强信息容量的根本举措。目前盘存储密度的水平为 $23\text{MB}/\text{cm}^2$ 工业界指出:今后 10 年,存储密度将增加到 $1.5\text{GB}/\text{cm}^2$ 。其中最关键的问题是,发展新型的磁性材料使数据位排列的更紧凑。同时最为重要的是读出磁头要有足够灵敏度,才能读出压缩了的数位。因此,磁性料的选取就是一项重要的任务。SR 可提供左旋和右旋的圆偏振光,它特别适合于研究磁性材料,并使磁盘上的数据产生图象。

3.3.2 集成度的增加

在小面积上集成更多的线路是计算机生产厂商相互竞争的主要目标。国际市场上的盈利可达 800 亿美元/年。目前制备芯片的工艺是采用紫外光光刻。为了使芯片做的更密,线条就得更细,间隔也要更小,就得用波长更短的深紫外光(EUV)或软 X 光。但 EUV 光刻系统对用传统光学系统不能发现的缺陷疵点非常敏感,因此 EUV 光刻的成功与否,在很大程度上决定于发展一种用实际波长来检测的光学系统。包括测试反射率、光学效率、衍射指数,反射光学表面的曲率及光滑度等。该系统只可能在高亮度同步辐射装置上才能实现。

3.4 工业生产微机械

尺寸大小为微米量级的微机械装置,集光、机、电于一身,是具有巨大应用前景的新型工业。可以穿过针眼的电动机,可以夹起单个细胞的微型夹具,不再是神话而已成为现实。如今微机械及其部件的市场估计为 5 亿美元/年,到 2000 年,潜在市场可达 100 亿美元。

目前已投入使用的微机械主要有探测压力、加速度、蒸汽、温度及声音的点状探测器,用于医学界的有测定心脏瓣膜的压差或血液流速的探测器,汽车上使用的有用以触发空气包或调整发动机性能的加速度计,特别有前景的微机械是“硅片化学厂”,这是一种很薄的只有砂

子那么大的装在硅片上的反应室,它已经成功地演示了 DNA 的复制,显示了快的反应速率和低的功耗。令人惊奇的是微机械不仅体积小,而且制造的成本也低,因为在一块硅片上一次就可生产上千个微机械部件。

目前已经制成的部件,大都是用表面微机械工艺制造的——即常规的光刻工艺加上薄膜沉积,或刻蚀。但这种制备工艺,产品比较脆弱,厚度只能几个 μm ,不太实用。只有采用深度光刻,才能获得例如厚度达 $1000\mu\text{m}$ 的产品,才能坚固耐用,具有实用价值。由于 SR 光源具有高度的准直性(平行性),高的辐射通量和合适的波长($2-4\text{\AA}$),从而可以获得深层的穿透深度。而且只有用 SR 刻蚀,才能构成工业性的生产规模^[2]。

建造第三代 SR 光源不仅有深远的科学意义,而且有广阔的社会效益和应用前景。

4 第三代 SR 光源的特点^[3]

第三代光源较第二代专用 SR 光源具有更为优异的光学特性和更强的能谱亮度。

4.1 从储存环的电子能量来说第三代 SR 光源可以分为两类

一是中低能 SR 光源,电子能量为 $1.5-2.0\text{GeV}$ 。以美国的 ALS (1.5GeV);台湾的 SRRC (1.3GeV)及南韩的 PLS (2.0GeV)为代表。前两座已分别于 1993 年和 1994 年投入运行,后者将于 1995 年投入运行。主要工作在 VUV/SX 方面。其国际投资规模约 1—2 亿美元。

二是高能 SR 光源,电子能量为 $6-8\text{GeV}$ 。以法国(欧共体联合研制)的 ESRF (6GeV),美国的 APS (7GeV)以及日本的 Spring-8 (8GeV)为代表。除 ESRF 已投入运行外,后两座装置预计在 1996 年或 1997 年即可建成,部分投入运行。主要开展硬 X 及软 X 波段的应用研究。投资强度约 5—10 亿美元。

除了通用的大型 SR 光源外,还有许多专用的小型环。例如专门用于软 X 光刻工业应用

的 SR 专用环在日本已投入运行的就有 6 座, 能量分布在 0.4—1GeV。

4.2 多种插入装置 (ID) 的引入

从 SR 科学实验及应用来看, 对第三代光源的技术要求主要追求的目标是高亮度。插入装置的引入可以更好的满足这一要求。插入装置 (ID) 就是在电子储存环的直线节上插入一些专门设计的周期磁场结构, 使电子在通过 ID 时发生周期扭摆运动从而发出亮度更高的同步辐射。

通常 ID 分两类: 增频器 (wiggler) 和聚频器 (undulator), 前者的偏转系数 $K \geq 10$, 发射连续谱, 宽张角, 光子能量 E_x 较高, 后者 $K \leq 1$, 发射相干光, 准单色, 光子能量 E_x 较低。偏转系数 $K = 0.934 \lambda_0 [\text{cm}] B_0 [\text{T}]$, 式中 λ_0 和 B_0 分别表示 ID 交变磁场的周期长度和峰值强度。由此看出, wiggler 具有较长的周期长度和高的磁场强度, 而 undulator 则相反。此外, wiggler 的亮度正比于磁铁的周期数 N , undulator 的亮度则与 N^2 成正比。由此看出直线节越长, N 就越大, 亮度也就越高。通常储存环上的直线节大致分布在 5—7m。也有长达 30m 的。当然直线节太长, 对周期磁场均匀性的要求也越高。否则由于周期磁场的偏差, 亮度会急剧下降, 尤其是对高次谐波。

4.3 发射度效应

电子束的发射度 (emittance) 的大小也是第三代光源区别于老 SR 的重要指标。减小发射度可以极大的提高亮度。

储存环中的电子在相空间(位置×角度)内运动, 并不是一个质点而是一个束团, 它具有一定的空间和动量分布。通常电子束团的大小用 σ_x 及 σ_y 来表示, 水平方向与垂直方向的电子束的发散度用 σ_x' 及 σ_y' 来表示, 而 $\epsilon_x = \sigma_x \sigma_x'$ 及 $\epsilon_y = \sigma_y \sigma_y'$ 则分别表示水平及垂直方向的发射度。由于发射度的引入, 使实际的电子通量要比在理想的状况下减少一个因子。该因子与发射度成反变关系。因此, 减小发射度可有效的增加同步光的能谱亮度。作为目前第二代 SR 光源的典型代表之一的光子工厂 (PF, 日

本高能所), 其第二期改造工程的主要目标是将目前的水平发射度 40—150nmrad 压缩到 20 nmrad, 以接近第三代光源的水平。

4.4 电子及光子的束流稳定性

由于光源空间分布及发散度的减小, 电子束团及光子束斑的稳定性在第三代光源上具有更为突出的重要性。以 ALS 为例, 对电子束团的稳定性, 要求控制在 0.1σ 以内。即, 如果 $\sigma_x (\mu\text{m}) / \sigma_x' = 330/30$, 则稳定性要求控制在 33/3 以内。又如 ESRF 的闭轨畸变 $\leq 0.1\text{mm rms}$ 。

控制束斑的稳定性, 通常有以下几种方法:

(1) 利用环内束流位置监测器及装在光束前端区和束线上的光子位置监测器测出光束的位置及出射角度, 并反馈到储存环, 对电子闭轨进行修正, 以确保束线光学及实验站光斑的稳定性。

(2) 控制装置的温度, 包括环内的空气及冷却水的温度。ESRF 的实验表明, 机器及实验设备对温度的变化极为灵敏。例如: 温度变化 1°C , 1m 长的钢将膨胀 $10\mu\text{m}$ 。因此要求实验厅的环境温度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$, 储存环内 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。此外, 机器必须避免振动。

5 第三代光源对束线技术的要求及特点

按照通常的概念, 光束线包括两大部分: 即前端区和光束线。

5.1 束线前端区

束线前端区指的是储存环发光点引出口到水泥屏蔽墙隧道内的那部分束线, 其主要作用为: (1) 提供人身辐射安全的工作环境, 防止辐照事故; (2) 提供储存环及光束线的真空保护; (3) 初步限束和控制光束, 使之不能打到未经保护、未经冷却的真空管壁上, 以致造成事故; (4) 提供安全联锁, 使在电子束流注入或真空破坏时, 吸收同步辐射的全部热功率及高能韧致辐射。

前端区各挡光部件面临着高亮度同步辐射对应的高功率及高功率密度的挑战。以 ESRF

为例,对一个最强的 undulator 光源来说,在离光源点 10m 处,其功率密度达 $1.5\text{kW}/\text{mm}^2$,它已超过了通常焊机的功率密度,如果束流一旦失控打到管壁上,足以使真空管壁在 20ms 内烧成空洞。这种恶性事故是绝对不能允许的。前端区的光子挡光器要能完全承受同步辐射的全部辐射功率(例如 10kW)以及极高的功率密度($1.5\text{kW}/\text{mm}^2$)。一种可能的设计是使挡光面避免直射而与光束成倾角,例如 10° 或者更小,以扩大热辐射承受面积,减小功率密度。挡光块材料的选用既要耐温又要导热好。关闭动作要快(例如 100ms 或者更短),但又不能有大的振动。既要求灵活操作,又要绝对可靠。具有此类技术要求的部件在前端区还有光子位置监测器、固定光阑、狭缝等。

5.2 高度稳定的束线光学

由于电子束斑在相空间中高度的收缩,因而对束线光学提出了更高的要求。

(1) 高功率热负载是光学系统设计的重要出发点,应予以特别注意。高功率的辐照会严重影响光学部件的形变,从而影响图像的质量。因而光学部件制冷方法的研究,在今后一段时间内将是一个极为重要的研究课题(例如水冷、液态金属冷却以及低温制冷等)。光学部件的材料也在认真探索。例如日本常选用 SiC 作基底因为它高硬度,不变形,耐高温。美国则常选用 GLID(一种掺杂的铜),因为它有好的导热性。此外,常用 C 膜过滤器吸收软波长的功率,以减少后级光学元件的热负载。也有用多层膜系作初级单色,并可抑制高次谐波。

(2) 自适应光学。这是一种近二三年来正在迅速崛起的光学系统。一个理想的光学系统应该有能力根据观测对象的变化,例如光强或观测点的距离变化等能自动调节其准直或聚焦的性能,以获取最佳的图像。

自适应光学系统包括高精度的光学表面,优异性能的光学材料或复合材料(包括粘接工艺);镜子表面的在线监测及控制;计算机数据处理及控制等内容。ESRF 目前正在发展 Si/PZT/Si 紧凑型双层结构的反射镜,由于它的

对称结构,因而,对温度变化不灵敏,并能保持恒定的厚度。作为例子,这种双层结构反射镜的尺度为 $(150 \times 40 \times 18\text{mm}^3)$,它用 2 层 PZT(每层厚度 8mm)及 2 层 Si 片(每层厚 1mm)组成。表层的 Si 片抛光到 3\AA rms ,两层之间有 Au 层作导电膜。它可将白光束聚焦成 34μ FWHM,其对应的缩小系数 $1/34$,镜面的曲率半径 295m。它还可以用于多层膜及 Sagittal 聚焦晶体。

5.3 束线仪器特点

5.3.1 高能量分辨的能谱仪或单色器

单色器是束线光学中最常见的基本仪器。其主要指标是能量分辨率。目前常用的单色器的分辨率一般为 10^{-4} 。在第三代光源上可以作到 10^{-9} — 10^{-13} (核单色器),从而可以发展超精细结构 γ 光学的研究,这是一片尚未开辟的新的科学领域。单色器设计中同时还要考虑到高次谐波(undulator)或高次衍射级次的抑制。

5.3.2 高空间分辨的微探针及聚焦光学

这是发展衍射及反射图象光学中的基本问题。目前在软 X 光学用波带片聚焦,分辨率能达到 300 — 100\AA 。而对硬 X 射线用多层膜技术,已能达到 $1\mu\text{m}$ 的空间分辨。下一步的发展目标是 $0.1\mu\text{m}$,从而具有进行微束 CT 的能力。

多层膜光学在今后一段时间内,将是一个新的重要的发展方向。这是一种“一维人工晶体”,它提供高反射率,采用正入射还可减少相差,具有高的波长选择性,和热的稳定性。作为光学元件的第一级,可保护后级精密光学元件,并可抑制高次谐波。还能进行偏振控制,具有很大的发展前景。

6 小结

同步辐射是继激光发现之后的又一具有革命意义的新型优异光源。北京同步辐射光源装置(BSRF)及国内其他同步辐射光源的实验成功,充分证明了这一点。亮度更高,光学性能更为优异的第三代同步辐射光源(BLS)如能

获准建成,必将在我国科学园地的建设中,开放出更为鲜艳夺目的花朵。

致谢 感谢吴自勤教授的鼓励和支持.梁岫茹、姜晓明对本文提出了中肯的意见,本人在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 第一次两岸同步辐射学术研讨会.论文集,北京,(1993).
- [2] A Brochure, The Advanced Light Source, 3 (1991); 3(1994).
- [3] David Attwood, Challenges for Utilization of The New Synchrotron Facilities Nucl Instr and Meth., A291 (1990).

单电子效应与单电子晶体管¹⁾

夏 建 白

(中国科学院半导体研究所,半导体超晶格国家重点实验室,北京 100083)

摘要 由于半导体超微细加工技术的发展,在半径为几百nm的量子点结构上观察到了由单个电子的阻塞和隧穿引起的电流振荡,分别称为库仑阻塞、单电子隧穿和库仑振荡.与此效应有关的现象还有库仑台阶、旋转门效应.旋转门器件可利用作为电流标准测量,单电子晶体管将是下世纪大容量存储器的最好选择.单电子效应的研究将开辟一门新的“人造原子物理学”。

关键词 库仑阻塞,单电荷隧穿,库仑振荡,库仑台阶,旋转门效应,单电子晶体管

Abstract Due to the development of the semiconductor ultra-micro fabrication technique it is possible to observe the current oscillation caused by the blockade and the tunneling of a single electron on the quantum dot structure with a radius of several hundred nanometers, which are called Coulomb oscillation, Coulomb blockade and single charge tunneling, respectively. The phenomena associated with these effects also consist of Coulomb staircase, turnstile effect, etc. The turnstile device can be used as a quantum standard for current. The single electron transistor will be the best choice for the memory of the ultra-large capacity for the next century. The research of the single electron effect will open a new field of “artificial atomic physics”.

Key words Coulomb blockade, single charge tunneling, Coulomb oscillation, Coulomb staircase, turnstile effect, single electron transistor

本世纪初(1909年),物理学家密立根(Robert Millikan)做了著名的油滴实验,发现被打碎的微小油滴上带的电量总是一个基本电量的整数倍,于是就推论出带基本电量的粒子就是电子: $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$.当时密立根曾经为不能控制油滴上所带的电子数而烦恼,但是今天微细加工技术的发展使得能够制造小尺寸(<100nm)的固体结构,在这种结构里通过改变电压的方法能操纵电子一个一个地运

动,这就是单电子效应.有关这方面的情况还可参阅本刊的文章^[1].

1989年,Scott-Thomas等人^[2]在Si反型层上用狭缝电极做了一个窄的电子通道,宽度约30nm,长度为1—10 μm .他们在0.4K温度下发现通道的电导随电极电压作周期性的振荡,并且在振荡周期与通道长度之间没有发现

1) 1994年8月17日收到初稿,1994年9月15日收到修改稿。