

合肥国家同步辐射光源

何多慧

(中国科学技术大学,合肥 230029)

光,或者更普遍地说电磁辐射,是人类观察和研究自然界所不可缺少的工具。同步辐射这种具有许多优异特性的电磁辐射更不例外,虽然发现的时间不长,却已广泛应用于许多科学和技术领域,推动了科学技术的长足进步。我国于1978年开始筹建自己的同步辐射光源——合肥国家同步辐射光源。它由一台800MeV电子储存环和一台200MeV直线加速器注入器组成。它于1984年11月动工,1989年4月建成出光,1991年6月调试结果,其主要性能指标已达到国际先进水平。本文重点介绍合肥国家同步辐射光源,同时还阐述同步辐射和同步辐射光源的一些基本问题。

Abstract

The hefei national synchrotron radiation source is China's first dedicated synchrotron radiation source. It consists of an 800 MeV storage ring and a 200 MeV linac injector. Construction started in November, 1984 and was completed in April, 1989. The stored beam current reached 267 mA in June, 1991. The routine operation beam current is more than 200 mA. The storage ring can accommodate more than 50 beamlines, including branches. Up till now, five beamlines and five user's stations have been built. These stations will be used in research on photoelectron spectroscopy, time-resolved spectroscopy, photochemistry, soft X-ray microscopy and soft X-ray lithography.

一、同步辐射和同步辐射光源

如果你曾观察过晴朗夜空中的蟹状星云——中国人在公元1054年首先观察到的一颗超新星爆发的产物,你可知道它的光辉到底是什么?那就是同步辐射——相对论性电子在磁场中作曲线运动时沿轨道切线方向所发出的电磁辐射。自理论预言在环形电子加速器中会存在这种辐射之后,1947年在美国通用电气公司的70MeV电子同步加速器上首次用肉眼观察到了这种辐射,所以称为同步加速器辐射,简称同步辐射或同步光。

产生同步辐射的装置称为同步辐射光源。一个同步辐射光源必须具备两个基本功能:第一,把电子加速到足够高能量,使其速度接近光速;

第二,让这些速度接近光速的相对论性电子在磁场中回转。这第一个任务是由注入器来完成的。被作为注入器的一般是电子直线加速器、电子同步加速器或电子回旋加速器。这第二个功能一般是用电子同步加速器或电子储存环来实现的。然而由于储存环中储存的电子能量恒定,束流强度高,束流品质好,因而同步辐射性能更好。所以现代同步辐射光源都是储存环光源,而同步加速器仅被用作注入器。

电子因同步辐射而损失能量,是电子同步加速器提高能量的主要障碍,被视为高能物理的一害,但是同步辐射却具有许多优异特性,使它在其他许多科学技术领域得到广泛的应用。同步辐射的这些特性是:

第一,一个高能电子的同步辐射谱是连续谱,覆盖范围很宽。根据电子能量的不同其频谱范围可从红外直至真空紫外、软X射线、硬X

射线甚至 γ 射线,一般定义 $\lambda_0 = 4\pi R/3\gamma^3$ 为特征波长, R 为电子弯转半径,以米计, γ 为电子能量与其静止能量之比。电子能量越高,特征波长越短,从 $0.2\lambda_0$ 直到远红外区,谱的强度变化不大,实验者调节单色仪可以在所需波长范围内连续扫描。同步辐射谱还可以准确计算,它被用作辐射计量标准。

第二,同步辐射的强度很高,现代储存环光源的同步辐射功率从几千瓦到几百千瓦,例如其中所含X射线的功率可比常规X射线光源强几万倍到几十万倍。

第三,同步辐射功率集中在电子运动方向上极小的立体角内,立体角的大小约等于电子静止能量与总能量之比。例如能量为1GeV的电子所发出同步辐射集中在 0.5 mrad 立体角内。所以,同步辐射是天然准直的。

第四,同步辐射是偏振光,在电子轨道平面内是完全偏振的,在总辐射功率中,平面偏振成分达 $7/8$ 。

第五,在储存环中由于自动稳相的结果,回流的电子自动聚集在若干束团中,因此同步辐射具有脉冲时间结构,改变加速器参数可以改变脉冲长度和间隔时间。

第六,同步辐射的发光体是自由电子,发光与任何原子分子过程无关。储存电子又处于超高真空条件下,所以非常洁净,没有任何通常光源发光体对实验样品所带来的污染。

由于同步辐射的这些优异特性,它被广泛应用于诸如表面物理、固体物理、原子物理、分子物理、生命科学、材料科学、化学、医学、地矿学、辐射计量学、超微细加工等许多科学和技术领域,取得了许多重要的结果。世界各国建设同步辐射光源的热潮也越来越高,现在世界上已有五十余台同步辐射光源在运行、建造和计划之中。同步辐射光源耗资巨大,技术复杂,建造周期长。

同步辐射光源分为专用光源和兼用光源两类。为高能物理实验而设计和建造的正负电子对撞机,当电子和正电子在储存环中回旋时自然也要产生同步辐射,它被称为兼用光源,如

我国的北京正负电子对撞机。专门为产生同步辐射而设计和建造的电子储存环称为专用光源,如本文介绍的光源。专用光源的设计按同步辐射优化,其同步辐射性能远比兼用光源优越。专用光源绝大部分时间按照同步辐射实验要求的能量和模式运行,而兼用光源的绝大部分时间按照高能物理实验要求的能量和模式运行,难于满足同步辐射实验的需要。所以,世界各国都竞相建设专用同步辐射光源。

同步辐射光源按所用波段分为真空紫外光源和X射线光源两种。虽然一个高能的电子储存环产生的同步辐射可以同时包括X射线和真空紫外光,但利用它的真空紫外光做实验却有很多不利之处:第一,光学元件接受到的辐射功率绝大部分是X射线,不仅无用反而造成光学元件非常有害的热负载,带来困难的冷却问题;第二,光束线长且接收同样毫弧度的光时第一个光学元件尺寸大;第三,真空紫外光偏振度低。因此各国都在建造两种波段的光源:2GeV以上的高能电子储存环主要用作X射线光源,数百MeV至1.5GeV的低能电子储存环主要用作真空紫外光源。

二、合肥国家同步辐射光源

由中国科学技术大学负责建设的合肥国家同步辐射实验室的同步辐射光源是我国第一台专用真空紫外光和软X射线同步辐射光源,光源本体是一台800MeV电子储存环,以一台200MeV电子直线加速器作为注入器。图1是它的总平面图。从电子枪发出的电子经过35m长的直线加速器加速到200MeV,然后经长约35m的束流输运线传输至脉冲开关磁铁。开关磁铁的作用类似于铁路的道岔,根据它的极性的不同可以分别把电子向右经长55m的注入输运线送至周长为66m的储存环,或向左送入磁分析器以测量电子能谱。当磁场强度为零时,向前的束流或送入束流弃置箱,或者再经弯转磁铁偏转进入核物理实验大厅。

1. 注入器和输运线

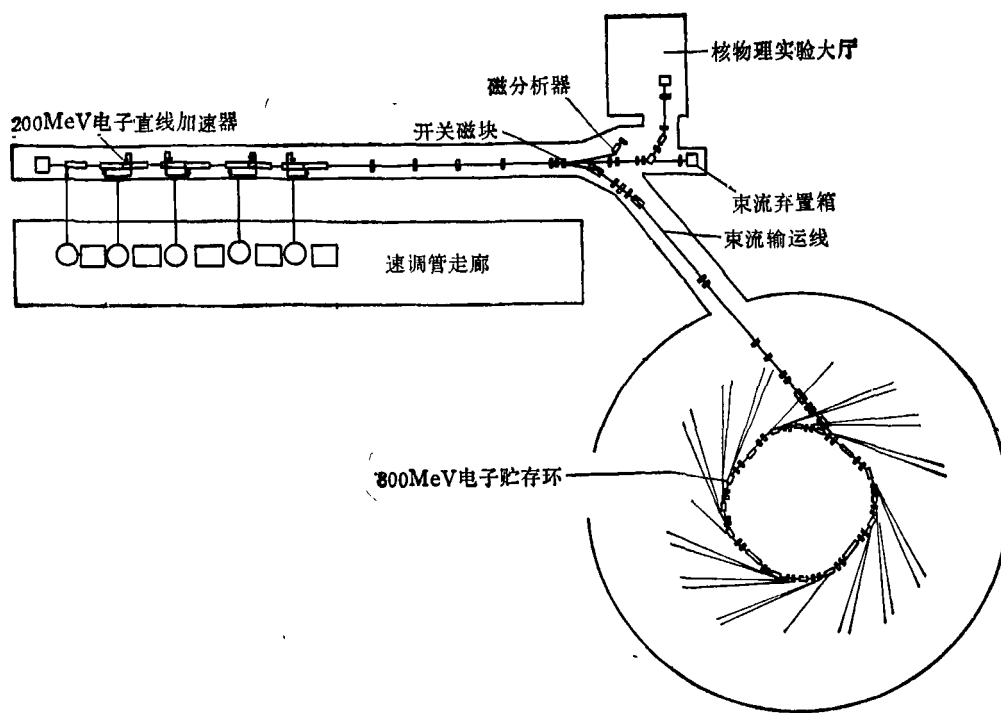


图1 合肥国家同步辐射光源平面图

表1 200MeV 电子直线加速器主要参数表

参数名称	设计值	已达到值
电子能量	220MeV	225MeV (50mA)
束流强度(脉冲)	50mA	130mA (195MeV)
束流脉宽	0.2~1μs; 2~4ns	
束流能散	±1%	FWHM<0.8%
束调管输出功率	15MW	
束调管数	5	
微波频率	2856MHz	2856.2MHz
工作模式	2π/3	
加速结构	常阻抗	
填充时间	0.83μs	
微波电场强度	120kV/cm	
场衰减常数	α = 0.178/m	
加速器长度	35.128m	
加速管真空	5×10 ⁻⁷ Torr (无束流) 5×10 ⁻⁸ Torr (有束流)	<1×10 ⁻⁶ Torr <5×10 ⁻⁸ Torr

表2 800MeV 电子储存环基本参数

电子能量	800MeV	全环周长	66.1308m
平均流强	100—300 mA	平均半径	10.525m
储存电子数	1.47—4.41×10 ¹¹	电子回旋频率	4.5333MHz
电子每圈辐射能量	16.3keV	高频频率	204.0MHz
总辐射功率(弯铁)	4.89kW	工作真空度	2×10 ⁻⁸ Torr
同步辐射特征波长	24Å		

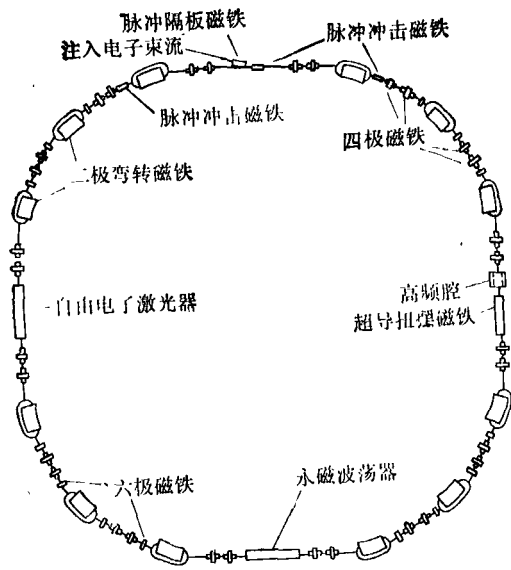


图2 800MeV 电子储存环平面图

光源的注入器是一台 200MeV 的行波电子直线加速器,由电子枪、预聚束器、聚束器和九节各长 3m 的盘荷波导加速管组成,因辐射屏蔽的需要而被安装在地下坑道中。微波功率源系统安装在速调管走廊,主振器产生的 2856 MHz 微波信号经中功率速调管放大后分五路分别激励五只大功率速调管,各放大至 15MW,再经功率分配器和波导馈入预聚束器、聚束器和九根各长 3m 的盘荷波导加速管。电子枪发射的电子束流经预聚束器、聚束器后在 2856 MHz 的每个周期内群聚为一个长仅几个 ps 的束团。进入盘荷波导加速管的微波在其中形成相速度等于光速的行波加速电场,经过群聚的电子束团在加速管中走过很短的路程便被加速到接近光速,然后骑在加速电场波峰上与行波加速电场等速运动,被九个加速管接力加速到 200MeV。表 1 列出了 200MeV 电子直线加速器的主要参数。

束流输运线的作用是传输电子到所需要的地方并实现相空间匹配,不加速电子。它主要由若干四极磁铁和二极磁铁组成。四极磁铁的作用相当于光学中的透镜组,它们聚焦电子束使不致在传输中散开。二极磁铁的作用是在需要的地方水平或垂直方向偏转电子束。

2. 储存环

800MeV 电子储存环采用分离功能强聚焦结构。图 2 是它的平面图。表 2 和表 3 列出了它的参数,它由以下几个主要部分组成。

(1) 真空系统

一个周长 66m 的环形真空管道(真空室)把储存环的其他各种元件串在一起,储存电子束流沿管道中心回转(称为储存)。为减少储存电子与管道中剩余气体原子分子碰撞损失,用 23 台集中式和 12 台分布式溅射离子泵把真空室抽到 10^{-10} mmHg 的超高真空。

(2) 磁铁

储存环的主磁铁是 12 块二极弯转磁铁、32 块四极磁铁和 14 块六极磁铁,均为叠片铁。二极磁铁的作用是弯转电子束,每块二极磁铁将电子束偏转 30° ,电子在 12 块二极磁铁中的轨迹正好是一个半径为 2.22m 的圆。电子束在被弯转时便产生同步辐射,储存电子能量为 800 MeV,弯铁场强为 1.2T,同步辐射特征波长为 24 \AA ,可用波长范围为 5 \AA 至远红外。四极磁铁的作用是聚焦电子束。六极磁铁的作用是校正色品以克服束流头尾不稳定性。

(3) 高频系统

储存电子因发出同步辐射而损失能量,如得不到能量补充,其轨道将收缩,电子因与真空室碰撞而丢失。高频系统的作用就是为电子补充能量,它由高频腔、高频机 and 控制系统组成。高频机产生的高频功率输入腔内,建立起驻波加速电场,当电子通过腔时便受到加速得到能量补充。电子每回转一圈从高频腔获得的能量等于每圈因同步辐射而损失的能量,它便始终维持在同一轨道回转。800MeV 储存环的高频频率为 204MHz,与电子回旋频率之比为 45,可以储存 1—45 个电子束团,光脉冲的长度约 100 ps,根据储存束团数目的多少,光脉冲间隔时间从约 5ns 到约 220ns 可调。

把来自输运线的电子注入到储存环是一个复杂的物理过程,该储存环使用三块脉冲冲击磁铁,使已注入环内并在其中回转的电子束流形成脉冲局部凸轨,使用一块脉冲隔板磁铁,偏

表3 800MeV 电子储存环的聚焦结构参数及光学参数

参数名称	符号	通用光源 GPLS 模式	高亮度光源 HBLS 模式
每圈的横向振荡数	ν_x	3.58	5.82
	ν_y	2.58	2.42
β, η 函数最大值 (m)	β_{xmax}	22	22
	β_{ymax}	13	13
	η_{max}	1.6	0.85
束流发射度(水平方向, nm · rad)	ϵ_{x0}	166	26.87
动量紧缩因子	α	0.0444	0.0116
自然色品	ζ_x	-6.13	-17.72
	ζ_y	-2.41	-4.47
横向振荡耦合系数	k	1.0	0.1
弯铁中点和扭曲磁 铁中点的束团截面 尺寸 (mm)	σ_{x1}	0.44	0.17
	σ_{y1}	1.03	0.115
	σ_{x2}	0.82	0.2
	σ_{y2}	0.35	0.14
	σ_{x3}	0.44	0.22
	σ_{y3}	1.03	0.95
	σ_{x10}	1.34	0.116
	σ_{y10}	0.53	0.177
束团长度 (mm)	σ_l	32.6	17.3
光源亮度(光子/s · A · mm ² · mrad ² · 1% 宽带)	B_{r1}	4.4×10^{13}	1.01×10^{13}
	B_{r2}	6.9×10^{12}	0.7×10^{13}
	B_{r1}	4.4×10^{13}	0.95×10^{13}
	B_{r10}	2.8×10^{13}	0.96×10^{13}

转来自输运线的电子束,使之按一定角度和位置入射,与局部凸轨相吻合,从而注入储存环内,与先前注入的束流一起振荡回转,被俘获储存。

800MeV 储存环有四个长直线节,第一个长直线节用于安装注入隔板磁铁和冲击磁铁,第二个长直线节的一部分用来安装高频腔,它的空余部份以及第三和第四长直线节将用来安装插入元件。所谓插入元件就是沿一轴线紧密排列,极性垂直于轴且沿轴周期性变化的一系列磁铁。电子束沿轴线进出插入元件,而在插入元件中则成蛇形前进。在储存环里插入元件被用来产生特殊要求的辐射。插入元件的性质

由一个叫做偏转参数的量 $K = 0.934 \lambda_0(\text{cm}) B_0(\text{T})$ 所表征,其中 λ_0 为磁铁的周期长度, B_0 为磁铁的峰位磁场。对于磁场强、周期长, $K \gg 1$ 的插入件,它所产生的同步辐射的特征波长比储存环二极主弯转磁铁的同步辐射特征波长更短,强度也得到加强,这种插入元件称为扭摆磁铁(wiggler),对于周期短、场强低, $K \leq 1$ 的插入件,它将在某些特定波长附近极窄的带宽内产生准单色的亮度极高的辐射,而不再是同步辐射连续谱,这种插入元件称为波荡器(undulator)。在800MeV 储存环的第二长直线节内,将安装一个磁场强度为6T的超导扭摆磁铁,以产生特征波长为5Å、最短可用波长为1Å的X射线。第三长直线节将安装一永磁波荡器,以产生几十埃到几百埃可调谐的高亮度的准单色光。第四长直线节将安装一个自由电子激光器。

800MeV 储存环的设计流强为100—300 mA,注入能量为200MeV。一般注入时间为几分钟,停止注入后同步增加各磁铁场强和高频加速电压,电子能量将增加,一般在2—3min时间内电子便被慢加速到800MeV,然后在此能量下长期储存,数小时后,储存电子束流强度自然衰减到一半以下,便把剩余束流扔掉,进行新的一次注入。

3. 束测和控制

由于电子以近光速运动,从电子枪经直线加速器、输运线到储存环仅需要约0.4μs时间,储存环的电子每秒钟要在环内转450多万圈,电子束的加速、输运、注入、慢加速和储存的物理过程相当复杂,束流测量和控制是一件非常困难的事情,也是非常重要的事情。沿直线加速器、输运线和储存环设置有各种束测探头以测量束流强度、位置、截面、长度、能谱、发射度、振荡频率等。控制系统是一个由中央机、通信微机和多台本地控制微机组成的分布式计算机控制系统。

4. 合肥国家同步辐射光源工程进展

在国际上同步辐射研究迅猛发展的形势下,我国科学界1977年开始议论建造自己的第

一台同步辐射光源。1978年初中国科学院决定以中国科学技术大学为主开始筹备工作,1978年到1981年完成了预制研究和物理设计,1983年4月8日国家计划委员会正式批准由中国科学院负责在中国科学技术大学建设国家同步辐射实验室。1984年11月破土兴建,1987年11月200MeV电子直线加速器出束,能量和流强均超过设计指标。800MeV电子储存环于1989年4月26日储存第一个束流产生同步辐射光,1991年6月储存环调束工作结束,储存电子能量为800MeV,流强超过200mA,最高达267mA。与国际上同类型加速器相比,其主要性能指标已经达到国际先进水平。

三、合肥国家同步辐射光源的应用前景

当电子被储存环弯转磁铁弯转时便产生同步辐射光,我们在真空室壁上开出窗口,接上光束线,把同步辐射光引到实验站照射样品进行实验。光束线的作用是实现分光、单色和聚焦。每块弯铁的真空室上开有120mrad和85mrad的两个窗口,从每个窗口出来的光可以分开供给两个分光束线。全环12块弯转磁铁共24个窗口,三个插入元件各有一个窗口,全环共可容纳五十余条分光束线,能同时供50余个实验站进行实验。储存环大厅是一个直径为50m的圆厅,位于大厅中央的储存环直径约20m,储存环外的环形地带是光束线和实验站所在地。

目前已经建成了五条光束线和五个实验

站,这些线站和可做的工作如下:

(1) 光电子能谱光束线和实验站:它将用于半导体和晶体的自由表面研究,金属-半导体、半导体-半导体以及半导体-绝缘体界面研究,非晶半导体及有机半导体材料研究,多功能光电子能谱的发展研究等。

(2) 时间分辨光谱光束线和实验站:它将用于稀土材料的能量传递,非晶体材料与激光材料的荧光寿命测量,蛋白质的低温荧光谱、荧光寿命和能量迁移研究,固体中的高能元激发研究等。

(3) 光化学实验站:它将用于原子分子的吸收谱和荧光光谱研究,高电子激发态分子的化学反应研究,分子离子反应研究等。

(4) 软X射线光刻光束线和实验站:它将用于毫米波器件光刻、表面超声器件光刻、计量光栅光刻、超微细加工以及超大规模集成电路光刻工艺研究等。

(5) 软X射线显微术光束线和实验站:它将主要用于软X射线显微术、轻元素材料(包括生物样品)的显微分析和微区结构分析、软X射线衍射、软X射线全息和软X射线光刻用的掩模的研制。

随着投资的不断增加,将会建设更多的光束线和实验站,服务于更多的科学技术领域的更多的用户,我国的第一台专用同步辐射光源将会在我国科学技术发展中发挥越来越大的作用。