

# 同步辐射的特性及发展历史

金玉明

## 一、引言

高速电子在电子同步加速器或电子储存环中作回旋运动时，沿着圆弧轨道的切线方向会发射出一种极强的光辐射，这种光辐射我们称它为“同步辐射”或“同步光”。专门以生产这种辐射为目的的电子储存环叫“同步辐射光源”或“光子工厂”。

我们从电动力学理论知道带电粒子在作加速运动时便会以电磁波的形式辐射能量。因此一个电子在磁场中作圆周运动时由于受到向心加速作用也会辐射能量。当电子的速度很小时(即  $v/c \ll 1$ )，辐射如图 1(a) 所示，是一个典型的偶极辐射，呈桔形；而当电子的速度接近光速时(即  $v/c \approx 1$ )，辐射如图 1(b) 所示，是一个沿电子运动的切线方向的光锥。其辐射能量随电子

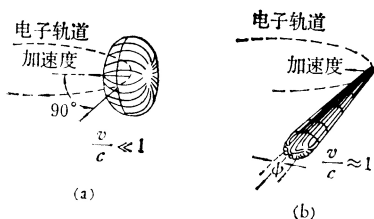


图 1 电子在磁场中作圆周运动时的辐射：

(a) 当电子的速度比光速小很多时；  
(b) 当电子的速度接近光速时

能量的增加而迅速增加。例如一个能量为 5 亿电子伏的电子，在曲率半径为 1.67 米的电子储存环中回旋一圈所辐射的能量为 3.3 千电子伏，而一个能量为 25 亿电子伏的电子，在曲率半径为 8.17 米的电子储存环中回旋一圈所辐射的能量为 423 千电子伏。电子能量增加到 5 倍，而辐射的能量则增加到 100 多倍。

## 二、同步辐射的发展历史

早在上个世纪末(1898 年)李纳特就指出沿圆形轨道运动的电子将辐射能量。二十世纪四十年代初出现了电子感应加速器，1944 年苏联学者伊凡宁柯就预言这种辐射会限制电子感应加速器的能量提高(这种加速器的最高能量为 3 亿电子伏左右)。1946 年逊格尔推测这种辐射在可见光的范围内应该可以用肉眼看见。1947 年爱尔德等人果然在美国通用电气公司的 80 兆电子伏的电子同步加速器上首次观察到了。他们发现当电子的能量为 30 兆电子伏时发射暗红的光，而电子的能量提高到 80 兆电子伏时发射蓝白色的光。此后，对同步辐射的理论和实验研究就逐步开展起来。1948 年中国朱洪元作了关于快速带电粒子在磁场中发射辐射的研究，导出了辐射的能谱、角分布及光子数

的公式，指出了一个小锥体内，锥角的大小具有  $m_0c^2/E$  的量级( $E$  为电子的总能量， $m_0c^2$  为电子的静止能量)。1949 年许温格也发表了他的详细理论计算，给出了单能电子的总能量损失以及角分布和光谱分布等解析表达式。而实验研究则在美国通用电气公司的 80 兆电子伏的电子同步加速器、美国国家标准局的 1.8 亿电子伏的电子同步加速器、莫斯科列别捷夫研究所的 2.5 亿电子伏的电子同步加速器、美国康奈尔大学的 3 亿电子伏的电子同步加速器和西德汉堡的 75 亿电子伏的电子同步加速上陆续展开。这些实验研究工作证实了关于同步辐射的强度、角分布、光谱分布、偏振度等等的理论预言。

使用同步辐射光来作其他学科的研究工具是在六十年代以后才开始的。自从 1961 年美国国家标准局修改了它的 1.8 亿电子伏的电子同步加速器作同步辐射用，并首先成功地使用这种辐射研究气体的吸收光谱，此后便在国际上激发起使用同步辐射的兴趣。于是意大利等国科学家先后开展了同步辐射的应用研究，完成了许多原子、分子和固体光谱的工作。1972 年左右，利用同步辐射的计划也在波恩(西德)、埃里温(苏联)、路德(瑞典)等地的电子同步加速器上进行。1974 年 5 月美国斯坦福同步辐射实验室在斯坦福直线加速器中心(SLAC)的正负电子对撞机 SPEAR(22.5 亿电子伏，40 亿电子伏)开始工作。在一年内，同步辐射的计划也在苏联新西伯利亚的 VEPP-3(22.5 亿电子伏)、西德汉堡的 DORIS(22 亿电子伏，50 亿电子伏)这些电子对撞机上开始进行。从这些电子储存环和电子同步加速器上的实验结果，使科学家们信服同步辐射对于许多领域如原子物理、生物学和微结构制造的基础和应用研究都是有利的工具。

上述的电子同步加速器和电子储存环起初都是为高能物理实验建造的，因此同步辐射的实验只能“寄生运行”。同步辐射的这种“寄生”工作的状况自然不能满足使用同步辐射的科学家的要求，于是就出现了专用于同步辐射的电子储存环。首先是 1968 年美国威斯康星大学的 2.4 亿电子伏的电子储存环作为专用的同步辐射光源开始工作。1971 年法国奥赛的 5.4 亿电子伏的电子储存环也作为专用的同步辐射光源了。用电子储存环作同步辐射源比起电子同步加速器来具有辐射强度大、稳定性好、光谱分布几乎为常数等优点。尤其其它的超高真空环境对于固体光谱实验特别有益。专用于同步辐射的电子储存环可以根据同步辐

射实验的要求来调节储存环的工作状态，因此更适合同步辐射用户的使用。

1974年日本东京大学建成了一台能量为4亿电子伏的专用于同步辐射的电子储存环SOR Ring。从此专用于同步辐射的电子储存环即“光子工厂”的设计和建造便在世界各地兴起。目前正在建造中的有6台，它们是美国布鲁克海汶国家实验室2台，威斯康星大学1台，日本筑波1台，英国达累斯堡1台，西德西柏林1台。它们的能量都是在7—25亿电子伏之间，建成时间都是在1981年左右。1978年提议以及正在设计中的也有6台，它们是苏联埃里温，莫斯科，荷兰阿姆斯特丹，加拿大，日本电气技术所各1台，中国科技大学1台(能量为8亿电子伏)。能量也是在6—25亿电子伏这个范围。

### 三、同步辐射的特性及其应用

同步辐射具有强度大、光谱范围宽、方向性好、偏振性好、光的脉冲短、非常干净、波谱可以准确计算等优点，因此在物理学、化学、生物学、材料科学、医学以及超大规模集成电路的光刻等方面得到广泛的应用。

1. 辐射光强度大：能量为几十亿电子伏的电子储存环(储存电流为几百毫安)的平均辐射功率可达一百千瓦的数量级，而最大的旋转靶的X光机的平均辐射功率仅仅10瓦左右，其功率相差达一万倍。即使一个中等能量的电子储存环(能量为10亿电子伏左右，电流为几百毫安)，其功率也达10千瓦的数量级，比普通的X光机的功率也大一千倍左右。因此用同步辐射来作实验比起普通X光机来具有实验时间短、信噪比高的优点。例如用普通X光机测铜的广延X射线吸收精细结构谱(EXAFS)需两周时间、信噪比为300:1；而用同步辐射做同一实验仅需20分钟、信噪比为10000:1。

2. 光谱连续而且范围宽：同步辐射是一种范围宽广的连续光谱(见图2)。因为同步辐射是非束缚态电子的辐射，所以它的光谱是连续的，并且非常宽广(从红外、可见光、紫外直到X射线)。利用各种单色器它就可以成为波长连续可调的光源。这个特性对于研究某些原子、分子的吸收光谱是很有用的。尤其是波长在1000埃以下，除了同步辐射外几乎没有什么可资利用的波长连续的光源了。所以氢原子的共振吸收谱线(200埃)、氮分子的吸收谱线(409埃)、一氧化碳分子的吸收谱线(600埃)等等只有利用同步辐射才能测出来。

3. 优良的时间结构：同步辐射是一种脉冲光。因为电子在电子同步加速器或电子储存环中回旋时，由于自动稳相的结果，电子都聚集在平衡相角附近沿着回旋轨道呈一团一团分布的(图3(a))。束团的个数即是高频的谐波数。这些一团团的电子束在发光时

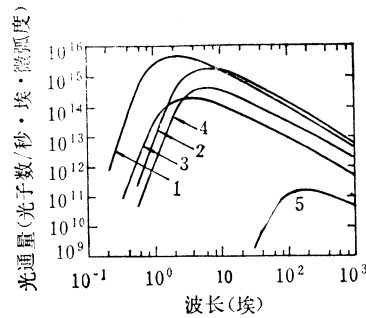


图2 同步辐射光谱图

1—西德电子同步加速器中心的电子储存环(30亿电子伏,250毫安);2—美国斯坦福直线加速器中心的电子储存环(22亿电子伏,250毫安);3—美国哈佛大学的电子储存环(32亿电子伏,15毫安,已关闭);4—美国威斯康星大学的电子储存环2号(17亿电子伏,100毫安,正在建造);5—美国威斯康星大学的电子储存环1号(2.4亿电子伏,10毫安)。

做成飞行时间电子谱仪，或做那些要求时间分辨率高的实验。特别是利用同步辐射的这种时间结构来研究许多动态过程，如肌肉的收缩、神经的活动、晶体的生长等。也可以用来研究某些荧光物质的荧光寿命。

4. 高度准直：当能量大于10亿电子伏的电子储存环，其辐射光锥的张角小于1毫弧度(图1(b))，已接近平行光束，比普通的激光束的发射角还要

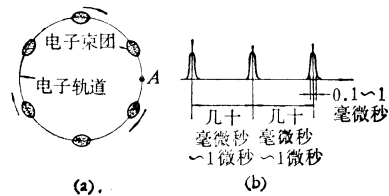


图3 电子束团及光脉冲：  
(a) 在轨道上回旋的电子束团；  
(b) 在电子轨道A点的光脉冲

小些。利用同步辐射的这种高度准直的性质，可做某些高分辨的吸收边的研究，或用它的软X射线波段作光刻以制造微结构。因为波长为10—50埃的软X射线比起可见光和紫外光来衍射效应小得多，因此这种高度准直实际上是平行的光束可以用来在硅片上复制图形而无衍射半影。这个技术的进一步发展就是超大规模集成电路的光刻。目前广泛使用紫外光通过掩膜进行光刻来制造集成电路，由于衍射效应、最小线宽约2微米左右。但若用同步辐射进行光刻，则线宽可降到20埃(1微米=10000埃)，分辨率可提高几个数量级。

5. 高度偏振：同步辐射在电子轨道平面内是完全偏振的光，偏振度达到100%；离开轨道平面，则偏振度迅速下降(见图4)。一般的偏振光，是利用反射起偏振的方法取得的。但在远紫外波段(1050埃以

下),由于反射系数小,偏振器的效率很低,因而在远

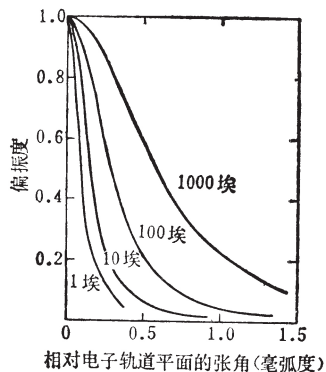


图4 同步辐射的偏振度(根据英国达累斯堡的40亿电子伏电子同步加速器的参数计算结果)

紫外到x射线波段,同步辐射几乎是唯一可使用的偏振光。这种偏振光对研究各向异性的晶体的结构很有用,例如可用来作非立方晶体的电子特性的测量。

6. 洁净的环境:由于同步辐射是在超高真空(储存环中的真空度为 $10^{-9}$ — $10^{-10}$  托)或

高真空(同步加速器的真空度为 $10^{-6}$ — $10^{-8}$  托)的条件下获得的,又没有普通光源中的电极溅射问题,所以同步辐射是一种十分洁净的光源。这种清洁的环境对于表面物理的研究,例如用测光电子谱的方法来研究表面的性质以及测定固体表面的反射系数等都是特别有利的。

7. 波谱可以准确计算:同步辐射的光通量随波长的变化(见图2)可根据加速器或储存环的参数如能量、流强和电子轨道的曲率半径等来准确计算。因此,同步辐射可作为一种标准光源来校准光学仪器 and 别的光源。