



漫话插入元件

石才士

同步辐射是本世纪 70 年代发展起来的一种新型光源,具有亮度高、波长(从红外到 X 光波段)连续可调、准直性好、完全确定的偏振度、洁净的工作环境(优于 10^{-9} 的真空度)、快速而精确的光脉冲时间结构等一系列优点,在物理、化学、生物、医学、农业、材料科学、冶金、能源、地矿、微电子、化工等多学科领域有着广泛的应用。然而,早年用于高能物理实验研究的正、负电子对撞机所产生的同步辐射虽然远远优于其它辐射光源,但从其本身的条件考虑,仍然是不大理想的,因为这样产生的同步辐射是由储存环中的弯转磁铁产生的。利用弯铁作为同步辐射光源具有一定的局限性。

首先,对弯转磁铁来说,其主要作用是维持储存环中电子束流在封闭的真空管道内循环,应满足储存环上的物理要求,因而同步辐射仅是其一种副产品。由下式可知: $B[T]\rho[m] = 3.336E[GeV]$, 式中 B 为弯铁磁场, ρ 为弯转半径, E 为电子能量。如果储存环的能量确定,弯铁的磁场是一定的,而同步辐射的光谱也是固定的。因为由弯铁产生的同步辐射光谱分布的物理量可通过特征波长 λ_c (或者用特征能量 E_c) 来表示,定义为波长大于 λ_c 与小于 λ_c 的同步辐射的积分功率相等。 λ_c 与弯转半径 ρ , 电子能量 E 与磁场 B 的关系为: $\lambda_c[\text{\AA}] = \frac{5.59\rho[m]}{E^3[GeV]} = \frac{18.64}{B[T]E^3[GeV]}$, 也

可表示为特征能量的形式: $E_c[keV] = 0.6651B[T]E^2[GeV]$ 。由此可见,对于能量较低的储存环就难以得到足够短的短波辐射。若想得到短波辐射,就必须提高储存环的电子能量。而一旦储存环设计建成,想再改变和提高能量是不现实的。

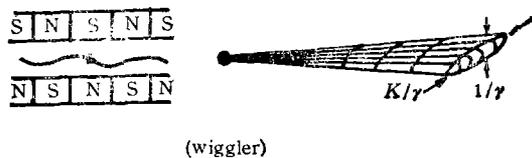
其次,依靠弯转磁铁来提高同步辐射的通量和亮度也是困难的。(所谓通量就是在一定带宽内每秒发射的光子数,也称为辐射通量,而亮度则是通量除以辐射的发射角度和辐射源的截面面积。)当电子在弯铁中沿圆弧运动时,虽然垂直发射角很小,但辐射却扫过一个相当宽的水平区域,而且均匀分布(图 1)。因此,单位水平张角内的通量较弱,或者说单位立体角内亮度较低。

由于弯铁光源具有上述的局限性,使得同步辐射的性能受到限制。但随着同步辐射研究的不断发展,一种插入在同步辐射装置(即储存环)中具有周期结构的磁体可发出当今世界上最强的紫外光和 X 射线。这种磁体就是七十年代末才迅速发展起来的扭摆磁铁(wiggler)和波荡磁铁(undulator)(或者叫扭摆器和

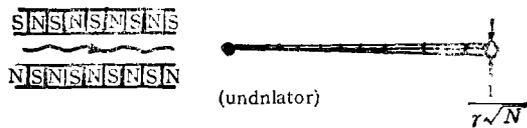


图 1 弯铁辐射

波荡器),统称为同步辐射装置中的插入元件(insertion devices)。由于在插入件设计时考虑磁场的剩余积分值尽量趋于零,因此它仅使电子束流通过该直线段时作局部的扭摆运动,而对直线段外基本上没有影



(wiggler)



(undulator)

图 2 插入件辐射

响,这样插入件就基本上脱离了储存环对磁场的限制。所以象扭摆磁铁,磁场可以设计得很高,按使用常规 wiggler 和超导 wiggler 的不同,磁场可分别高出弯铁的 2~5 倍, E_c 也就可提高 2~5 倍,可把 wiggler 看成一个增频器,能解决低能量下应用同步辐射光的问题。即在一个低能量的小环上,插入高磁场的扭摆磁铁,就能实现扩展同步辐射的光谱范围,使得可利用的光谱向高能量(或短波长)的区域移动。而象波荡磁铁,磁场可设计得较低而周期数很多,可使同步辐射光最大限度地集中在很小的扇角区内(图 2),提供比常规弯铁所产生的辐射具有更高的通量和亮度,使得同步辐射的应用领域更加广泛。

插入元件是一种周期性二极磁体结构(图 3),均由两排磁体构成,建立起许多垂直于电子束的极性交替变化的磁场。这些交变磁场,使得电子束在通过器件时作左右摆动或上下摆动,各个电子的轨道呈现正弦曲线形状,放射出亮度极高的同步辐射光。扭摆器和波荡器之间的主要区别在于磁极所产生的角偏转量。在扭摆器里,它的偏转角度比同步辐射的自然发射角大,所产生的连续频谱与弯铁产生的辐射类似,只

是它所发出的辐射的通量和亮度比同样磁场的弯铁所发出的辐射的通量和亮度高出磁周期数（即电子束所作的振荡数）的两倍。在波荡器时，由于磁周期短，周期数多，每一组磁极引起的角偏转度小于或相当于同步辐射的自然发射角。在这种情况下，每一电子所发射的电磁波能相互增强或彼此抑制，从而增强了某些发射角上的某些波长的发射，使被增强了的波长上的辐射能达到极高亮度。所以波荡器所发出的辐射还具有和辐射亮度成正比的相干作用。而亮度比弯铁所产生的辐射亮度高出大约振荡数的平方倍。

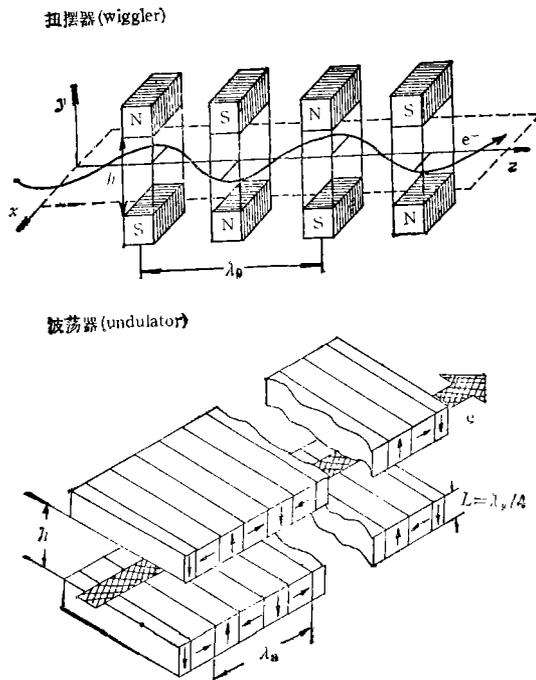


图3 插入件的结构

插入元件依材料不同，分为常规电磁铁、超导磁铁和永久磁铁三种类型。其插入装置各有优缺点。早期的插入件一般都建造电磁类，其优点是技术上成熟，容易实现，磁场调节方便，而缺点是需要水冷、维护并消耗电功率。超导磁铁的磁场可做得很高（场值可达5~8特斯拉），但技术上复杂，投资大。永磁装置省电，无需水冷维护，适用于低磁场短周期结构，但磁场调节不灵活。随着第三代同步辐射装置的发展，越来越倾向于永磁结构插入件的研究。这是因为：在第三代同步辐射专用环上，束流发射度很小，直线节很长，通常为5~6米，更适合于永磁插入件的利用。像日本的TRISTAN储存环上设计有若干个5米多长的直线节，还有几个70多米的超长直线段来设计安装永磁插入件。

插入元件依场形不同而分为两种形式：一种是螺

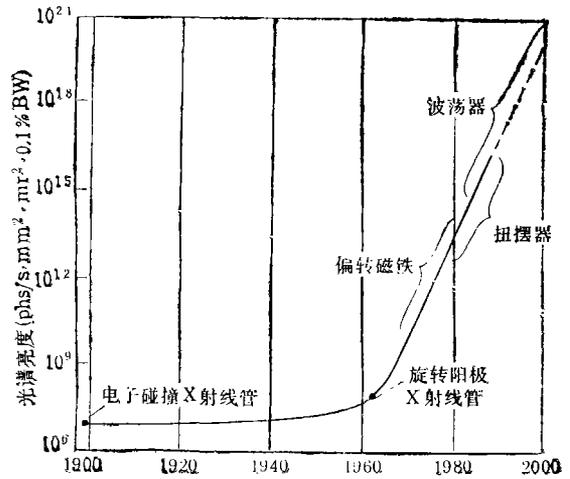


图4 几种辐射源的亮度

旋式 (Helical) 磁场装置，即相对论性电子绕轴线作螺旋形运动，产生的辐射是圆偏振的，这在相同的峰值磁场下，它能产生较强的辐射功率。但其圆形孔径难于与不同的水平和垂直束流孔径条件的大多数储存环相匹配，一般不大采用。另一种是平面型 (Flat) 磁场装置，这是目前大部分插入件都采用的。它产生一个

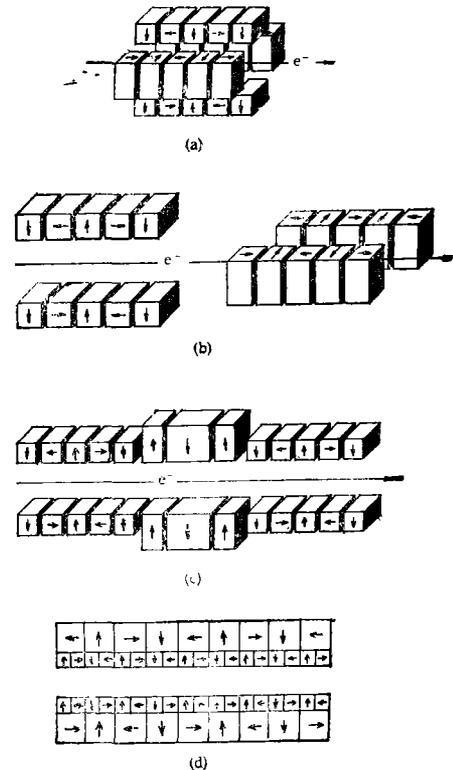


图5 几种不同形式的波荡器

沿轴向周期变化的横向磁场，相对论性电子在中心平

寄语我的学生

华南师范大学物理系主任

熊承斌

(一)

毋庸讳言,物理学正面临着重大的突破,但是有幸工作在物理学前沿的人毕竟是少数。科学的根本目的不在于科学的本身,而在于造福人类。对于大多数物理工作者,如果能认识以下两方面工作的重要性,不失时机地做些创造性的工作,定能对祖国、对人类作出有意义的贡献:其一是学科的交汇处有新天地。物理学与其他自然科学乃至社会科学的交叉,为物理学研究工作者提供了广阔的用武之地。物理学向其他学科的渗透、边缘学科的建立,正召唤着大批的能人志士。其二是扩展物理学科与应用科学的沟通渠道,开发物理基础理论在各个经济建设领域中的应用市场,开拓物理学科直接服务于社会的有效途径,

既是社会发展的迫切需要,也是物理工作者建功立业的理想舞台。天高海阔,有志者莫负春光。

面上作周期振荡运动,从而放射出线偏振的同步辐射光。鉴于插入元件的特殊结构,使得储存环中循环的电子束不产生净偏转和位移,因此能够使相对论性电子产生比弯转磁铁亮度高得多的同步辐射、使实验者能充分利用同步辐射功率。

人们知道,自从出现同步辐射光源以来,X射线的亮度已经提高了许多个数量级。插入在储存环中的插入件——波荡器是目前最亮的辐射源(图4)。第一台用作实验X射线源的永磁波荡器于1980年建成,并安装在SPEAR储存环上。它在光子能量1000电子伏特左右释放出的X辐射比储存环弯铁所产生的辐射亮100多倍。这一成功,更加促使各国为自己的储存环上研制插入件,即扭摆器和波荡器。特别是波荡器的研制和发展更为迅速,形式和种类也更多(图5)。

目前在北京正负电子对撞机(BEPC)上用作同步辐射的插入件是一台单周期的电磁扭摆器,(也称为波长移动器 wavelength shifter)。它提供的磁场强度比储存环弯铁高一倍。而在八·五期间,计划建造两台新的插入件插入在BEPC上,预计其所产生的同步辐射亮度比弯铁所产生的强2~3个数量级,将进一步扩大我国同步辐射光的应用范围。

(二)

物质世界永恒不灭,物理学长河永无止境,要在浪里淘金,必须付出艰巨的劳动。物理大厦中光辉闪烁的群星并非上帝恩赐的宝石,而是物理学前辈们无以伦比的探索热忱升华的结晶。爱因斯坦在对居里夫人的悼词中说过:“她一生中最伟大的科学功绩……所以能取得,不但是靠着大胆的直觉,而且是靠着在难以想象的极端困难情况下工作的热情和顽强,这样的困难,在实验科学的历史中是罕见的。”

同时,物理学研究必须造福于人类,服务于祖国四化大业,这是每一个物理工作者不容稍离的目标。爱因斯坦反复强调:科学工作者“对于时代和历史进程的意义,在其道德品质方面,也许比单纯的才智成就方面还要大”。金玉良言,你们在埋头于图表和方程时,切勿不可忘记。

· 物理学家小故事 ·

退稿之后

清明

那还是在抗日战争年代,王淦昌流离到遵义,依旧考虑中微子实验的验证问题,终于写出《关于探测中微子的一个建议》这一重要短文。他把文章寄给《中国物理学报》,却被作为“退稿”处理了。1941年10月13日,王淦昌将文章寄到美国《物理评论》,很快在该刊第2年1月号发表。不过二个月,阿伦根据他的建议做了Be⁺的K电子俘获,测量了Li⁺的反冲能量,取得肯定的结果。

· 专家评《现代物理知识》 ·

一本雅俗共赏的好杂志

中科院物理所研究员 麦振洪

我是《现代物理知识》的一名热心读者。它是一份融科学性、知识性、趣味性为一体,雅俗共赏的好杂志。它的知识面覆盖面广,时间感强,深入浅出。我从中吸取了很多我的专业以外的知识。

愿《现代物理知识》在新的一年里更上一层楼。我愿继续为本刊效劳。

(上接第13页)

技术为研制高密度数据存储器提供了科学依据。

本文叙述了STM在毫微米加工领域中的应用。尽管其应用前景非常广阔,但由于STM本身才诞生十年,它在该领域中的应用还需要做更深入更细致的研究,以便进一步了解其加工与刻蚀机理。若希望STM能在器件制造领域中得到实际应用,还需解决一系列技术问题,这些问题主要是需获得稳定、耐用和分辨率足够高的针尖,写入或沉积方法本身必须具有足够的可靠性,所获得结构对时间和环境都必须足够稳定等。(续完) (编者按:参考文献省略。)