

第 1 章 绪 论

光是人们探索未知、认识世界、改变世界的主要工具，每一次新型光源的出现都伴随着一系列科学技术的进步。以激光为例，它是一种具有高相干性、高单色性、高准直性、高偏振性，且脉宽和功率跨度极广的高品质光源，已在科学研究、工业生产、日常生活等诸多方面发挥了至关重要的作用。然而，由于电子被束缚在原子或分子能级之间，激光的波长一般处于远红外至紫外波段。加速器光源突破了这种能带限制，可在广阔的频率范围内产生高品质辐射。同步辐射和自由电子激光则是典型的代表，目前已被广泛应用于生命科学、材料科学、环境科学等研究领域。

同步辐射装置是一种基于电子储存环的加速器光源，它具有亮度高、偏振性好、准直性高、能谱连续且可被理论准确描述等特点。得益于电子束以近光速在环内回旋，同步辐射的重复频率和稳定性也极高。而自由电子激光（free-electron laser, FEL）则是当今在 X 射线波段峰值亮度最高的一种人工光源，它以自由的电子束作为增益介质，结合微聚束和相干增益过程，可在太赫兹波至 X 射线波段产生超高峰值功率的相干辐射。

近年来，对于大功率（高平均功率）辐射光源的需求越来越强烈，如大功率太赫兹波源和极紫外（extreme ultraviolet, EUV）光源。为此，一种将储存环与自由电子激光微聚束理念相结合的新型稳态微聚束（steady-state microbunching, SSMB）概念被提出^[1]。它通过储存环磁聚焦结构设计或束流的相空间操控，在环内实现超低的束流三维发射度，使束团辐射达到三维相干的状态，不仅能够大幅提升单束团的辐射功率，且可实现连续波（continuous wave, CW）状态的大功率太赫兹波或 EUV 辐射。

1.1 加速器光源的亮度、功率与相干性

功率是描述光源品质的一个重要参数，而在加速器光源中，亮度的概念却应用得更为广泛。它们之间有非常紧密的联系，且均强烈依赖于束团辐射的三维相干性。通常，增强束团辐射的相干性是提升功率和亮度非常直接且有效的办法。

在加速器光源中，使电子束产生加速度并放出辐射的基本元件主要是弯铁和波荡器（或扭摆器）。在这两类辐射器件中，由于电子束运动规律不同，产生的辐射特性存在差异，如图 1.1 所示。弯铁辐射的方向在束流偏转平面内不断变化，辐射场的空间集中度不高，是一种“扫描式”光源，能谱连续；波荡器或扭摆器辐射则在束流运动的全过程中，仅分布在轴线附近的小角度内，具有更高的空间集中度和亮度^[2]。对于水平（ x ）和垂直（ y ）分布近似为高斯函数的电子束，利用高斯光学（几何光学的傍轴近似）对它们的辐射光进行定性分析后，可将其辐射亮度定义成类似的形式，分别为^[3-8]

$$\begin{cases} B_b = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \Sigma_x \Sigma_y \Sigma_{y'} \frac{\Delta\omega}{\omega}} \frac{d\dot{N}_{ph}}{d\theta_x}, & \text{弯铁} \\ B_u = \frac{\dot{N}_{ph}}{(2\pi)^4 \Sigma_x \Sigma_{x'} \Sigma_y \Sigma_{y'} \frac{\Delta\omega}{\omega}}, & \text{波荡器} \end{cases}$$

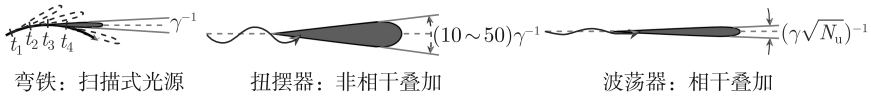


图 1.1 弯铁、扭摆器、波荡器的辐射模式

其中 $\dot{N}_{ph}$ 表示辐射频率在 $\omega \sim (\omega + \Delta\omega)$ 的光子通量； $\Sigma_{x,y} = \sqrt{\sigma_{x,y}^2 + \sigma_{ph}^2}$ 和 $\Sigma_{x',y'} = \sqrt{\sigma_{x',y'}^2 + \sigma_{ph'}^2}$ 分别为水平和垂直方向上光源的有效尺寸和有效散角；而 $\sigma_{x,y}$ 和 $\sigma_{x',y'}$ 则分别表示电子束在两个横向方向的均方根尺寸和散角。在这个定义中，辐射光被当成是具有横向尺寸 σ_{ph} 和横向散

角 $\sigma_{\text{ph}'}$ 的高斯光束。对于波长为 λ 的辐射, σ_{ph} 和 $\sigma_{\text{ph}'}$ 通过光的发射度联系在一起, 即 $\epsilon_{\text{ph}} = \frac{\lambda}{4\pi} = \sigma_{\text{ph}}\sigma_{\text{ph}'}$ 。

光源亮度是一个源于辐射测量的物理量, 标准单位为 “ph/s/mrad²/mm²/0.1%bw”, 即定义中的 $\Delta\omega$ 一般取关注的辐射频率 ω 附近千分之一带宽 (bandwidth, bw) 内的部分。它表征单位面积单位投影立体角内的光谱光子通量, 或相空间内的光谱光子通量密度。其他辐射参量几乎均可以通过亮度获得, 如对亮度进行立体角积分即可获得空间光谱光子通量, 进行光源面积积分则可获得角光谱光子通量, 而同时积分后便是总光谱光子通量。对于辐射频率处于 $\omega \sim (\omega + \Delta\omega)$ 的辐射功率, 则可直接表示成

$$P(\omega) = \iint \hbar\omega B_{\text{u,b}} dA d\Omega$$

因此, 提升光源亮度, 辐射功率也相应增加。

无论是弯铁还是波荡器, 辐射亮度均强烈依赖于束团的尺寸和散角。随着横向尺寸、散角的不断下降, 束团的横向发射度也减小, 但其辐射的横向相干性增加, 亮度也将不断提升。然而, 当束团横向尺寸和散角低至与辐射光的尺寸、散角接近, 即束团的横向发射度 $\epsilon_{x,y} \approx \frac{\lambda}{4\pi}$ 时, 整个光源逼近衍射极限, 辐射亮度几乎无法进一步提升^[9-11]。这也对应着储存环同步辐射光源的发展历程。考虑到衍射极限下的波荡器辐射亮度为 $B_{\text{u}}^{\text{u}} = \dot{N}_{\text{ph}} / \left[(2\pi)^4 \sigma_{\text{ph}}^2 \sigma_{\text{ph}'}^2 \frac{\Delta\omega}{\omega} \right]$, 一般将束团辐射在波长 λ 处的横向相干性定义成^[3]

$$f_{\text{coh}}(\lambda) = \frac{B_{\text{u}}}{B_{\text{u}}^{\text{u}}} = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 \Sigma_x \Sigma_{x'} \Sigma_y \Sigma_{y'}} \quad (1-1)$$

因此, 束团辐射的横向相干性越好, 光源的亮度和功率也就越高。

此外根据亮度的定义, 除了束团横向尺寸和散角会大幅影响辐射亮度, 束团的纵向长度和能散 (或纵向发射度) 也同样会通过影响辐射能谱的形状, 进而改变辐射频率在 $\omega \sim (\omega + \Delta\omega)$ 的光子数, 从而改变辐射光源的亮度。比如, 对纵向密度分布为高斯型的电子束, 若其均方根束长为 σ_z , 表征其辐射纵向相干性的聚束因子^[12] 为

$$b(\lambda) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi\sigma_z}{\lambda} \right)^2} \quad (1-2)$$

束团长度缩短,相干辐射频率将往更高频方向移动,因此在高频部分的光子数增多,辐射亮度和功率也相应增加。

1.2 自由电子激光和同步辐射

作为加速器光源中的代表,自由电子激光(FEL)和同步辐射是现今 X 射线波段峰值亮度非常高的两种光源。其中 FEL 的峰值亮度高达 10^{35} ph/s/mrad²/mm²/0.1%bw^[13],第四代同步辐射亮度也达到 10^{23} ph/s/mrad²/mm²/0.1%bw^[14]。然而,它们的实现方式却不尽相同:前者通过微聚束过程,很好地结合了辐射的横向相干性和纵向相干性;而后者则仅依赖于横向相干性的提升。

1.2.1 自由电子激光的纵向相干性

FEL 是当今 X 射线波段峰值亮度最高的人工光源,由 John Madey 于 1971 年提出^[15],其辐射波段可从太赫兹跨越至 X 射线。与同步辐射相比,它最大的特点是充分利用了纵向相干性。

FEL 纵向相干性来源于电子束在波荡器中的微聚束过程,如图 1.2 所示。这个微聚束过程可以在原本的宏束团内逐步形成一系列间隔为波荡器共振辐射波长的微束团,每个微束团的长度均小于辐射波长,根据 (1-2) 式,这些微束团辐射纵向相干性非常好,而所有微束团辐射场的相干叠加可以使辐射集中在很窄的带宽内,从而产生无与伦比的峰值辐射功率和亮度。事实上,从宏束团进入波荡器到最终微聚束完全形成(或 FEL 饱和出光)的整个过程,可以看作“波荡器对电子辐射的选频(共振辐射波长)、束内电子对选出频率的位置响应(微聚束)以及之后在选出频率上辐射相干叠加放大”的正反馈过程^[16]。

经过 30 多年的发展,FEL 的运行机制已经非常丰富^[17],如表 1.1 所示。其中振荡器型和非预聚束的种子光直接驱动型 FEL 工作在低增益模式,其他机制的 FEL 则通常工作在高增益模式。振荡器型 FEL 与激光很相似,通过与光腔的相互结合,将 FEL 产生的光储存在光腔内,并作为下一个进入波荡器的电子束的种子光,进而得到不断放大。但这种方式受限于腔镜的反射率,在可见光范围之外难以找到合适的高反射率腔

镜材料。高增益 FEL 无需光腔，在较长波荡器的作用下，电子仅需单次通过波荡器，相干辐射场在整个过程中即可呈指数形式放大并最终饱和和出光，产生高亮度的辐射。这种方式不再受限于材料，可将辐射波长推至长波长的太赫兹或者短波长的 X 射线范围。然而，在往短波方向推进时，不易找到合适的种子光进行直接驱动。对 FEL 高增益模式的理论研究表明，尽管存在不稳定性，但 FEL 可以从束流的噪声中发展起来^[18-19]，即所谓的自放大自发辐射（self-amplified spontaneous emission, SASE）。这个机制于 2000 年在实验上被证实^[20]，并发展成短波长 FEL 的主要实现方案。

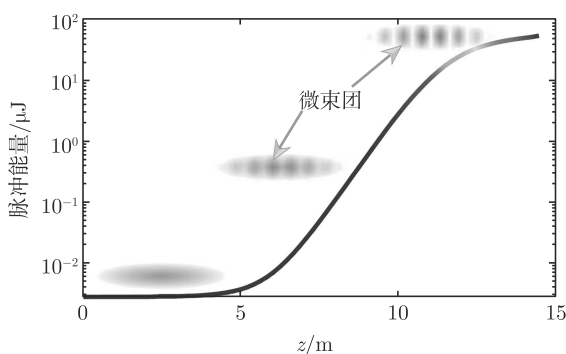


图 1.2 自由电子激光微聚束与辐射脉冲能量增长过程示意图

表 1.1 自由电子激光运行机制类型

外种子型	非预聚束	振荡器型
		种子光直接驱动
	预聚束	HGHG、EEHG、PEHG
无外种子型	SASE	
	SASE 自种子运行	

SASE 解决了短波长 FEL 的主要问题，辐射能谱也从同步辐射的连续或准连续谱变成了集中在部分频段的窄谱^[21]。但由于起源于噪声，SASE 模式下的 FEL 纵向相干性和能谱单能性不好，每次出光的峰值功率和亮度存在较大的抖动，达到饱和和出光所需要的波荡器长度也较长。因此，探索进一步提升纵向相干性的机制（尤其在短波长波段）是 FEL 研究工作中重要的一部分。

总体上, 目前增强 FEL 纵向相干性的方法有两类。第一类是自种子模式 (SASE)^[21], 它采用两级波荡器, 并将前一级产生的光经单色仪后作为后一级的种子光, 从而增强纵向相干性, 如图 1.3 (a) 所示。另一类则直接借助单能性较好的外种子光, 要么进行直接驱动, 要么先利用种子光和波荡器的调制作用在二维或四维相空间中操控束流, 将宏束团预聚束成间隔为种子激光波长的一系列微束团, 再送入波荡器进行高次谐波辐射, 如图 1.3 (b) 所示。基于高次谐波生成的高增益谐波生成 (high-gain harmonic generation, HHG)^[22-23] 方案是第二类方法中的代表。但它受限于调制深度和调制之后微束团的能散, 只能在种子激光数次谐波范围内有效出光。采用两级高次谐波生成方案的回声增强型高次谐波放大 (echo-enabled harmonic generation, EEHG)^[24] 可以打破这种限制, 将辐射提升至种子激光的数十次谐波, 直接达到软 X 射线范围^[25]。此外还有一些基于相位融合 (phase merge)^[26-27]、角色散调制 (angular dispersion modulation, ADM)^[28-30] 的四维相空间操控方案, 可以产生更短的微束团, 同样可将相干辐射延伸至数十次谐波。这些方法有一个类似的思想: 根据初始宏束团在六维相空间中尺寸最小的维度, 寻找一种相空间操控方法, 使微聚束后微束团的长度仅仅依赖于该维度的尺寸, 从而实现微束团束长的最小化和高次谐波的最大延伸^[31]。

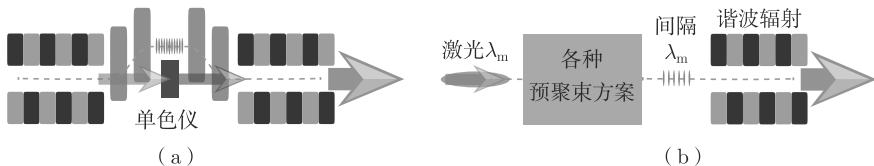


图 1.3 增强 FEL 纵向相干性的方法（前附影图）

(a) SASE 自种子运行; (b) 预聚束

得益于电子枪和阴极技术的发展, FEL 束流横向归一化发射度可低至亚微米, 结合纵向的微聚束后, 微束团辐射可同时具有很好的横向相干性和纵向相干性。这使得 X 射线波段 of FEL 峰值亮度相比同步辐射光源可高出近十个量级。但 FEL 重复频率较同步辐射光源低很多, 目前新一代高重频电子枪和超导加速器的结合有望将 FEL 重复频率提升至兆赫兹水平。而针对进一步提升 FEL 束流能量利用效率和平均辐射功率的问题则催生了许多新方案, 如能量回收型直线加速器 (energy-recovery linac,

ERL)^[32-34] 和基于储存环的 FEL^[30,35-38]。

1.2.2 同步辐射光源的横向相干性

同步辐射光源的主体是电子储存环,源于同步加速器的发展。自 1947 年同步辐射在通用电气实验室的同步加速器上被首次直接观察到后^[39-41],伴随着 1952 年 Ernest D. Courant 和 M. Stanley Livingston 等对横向强聚焦原理的提出^[42]和成功应用^[43],以及 1956 年储存环概念的产生^[44],到现在同步辐射光源已经历了四代发展,环内束流稳态横向发射度不断降低,同步辐射横向相干性不断变好,亮度也不断增加^[2,45],如图 1.4 所示。

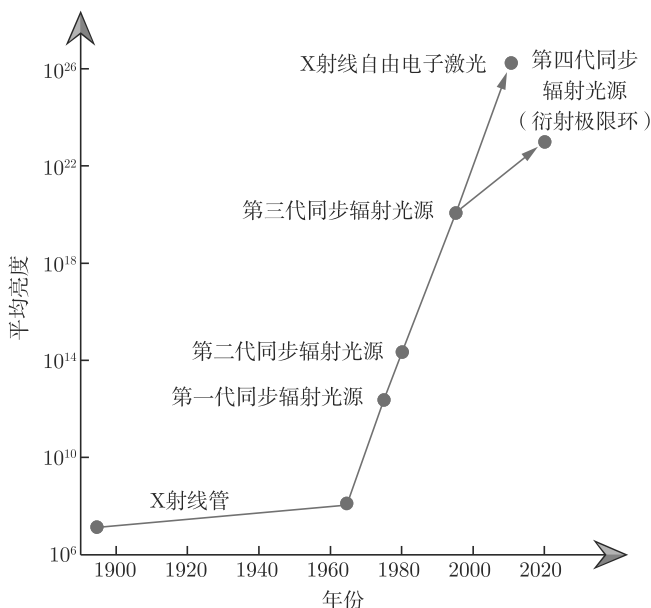


图 1.4 同步辐射光源和 FEL 平均亮度的演化

第一代同步辐射被称为“寄生辐射”，彼时正是高能物理发展的阶段，由于同步辐射几乎是同步加速器中高能粒子进一步提高能量的阻碍，在 20 世纪 50—70 年代，它一直被当成弊端对待。尽管有部分科学家利用它开展实验，但也仅仅是作为高能加速器的伴随产物而被动地利用。如当时在 DESY-I 6 GeV 的储存环上进行高能物理实验的同时，同步辐射波长

已经降至 $0.1 \text{ \AA}$ ，研究人员开始将它用于金属和碱卤化物的吸收测量^[40]。但由于尚未针对同步辐射进行优化，储存环内的束团在达到稳定后的横向发射度很大（一般在数百纳米水平），同步辐射亮度和横向相干性很差。

1974 年日本 INS-SOR 率先在东京建造了一台专门产生同步辐射的储存环，开启了第二代同步辐射光源（专用同步辐射装置）的建造^[46]。之后，美国的 NSLS 和 Aladdin、日本 KEK 的光子工厂、德国柏林的 BESSY 等同步辐射装置相继在 20 世纪 80 年代落成并出光。这些装置主要以弯铁作为辐射器件，但为了提高辐射亮度并将辐射光子延伸至更短波长范围，波荡器和扭摆器被引入部分装置中，如斯坦福同步辐射实验室的 SPEAR 环^[47-49]。第二代同步辐射光源内束团的横向发射度平均降至百纳米水平^[50]。同步辐射横向相干性的提升搭配较强磁场弯铁、扭摆器的共同作用，使得其平均亮度达到 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ ph/s/mrad}^2/\text{mm}^2/0.1\% \text{bw}$ 。20 世纪 70—90 年代初，同步辐射光源的应用范围快速扩展至大量学科，对辐射波段在红外到硬 X 射线范围内的高品质同步辐射需求也急剧增加。一些用户和加速器专家敏锐地认识到，新一代的储存环可具有更低的发射度和更长的波荡器或扭摆器，进而实现更高的亮度，并且这样的同步辐射光可具备很好的空间相干性。

自此，储存环进入了依靠设计和优化全环磁聚焦结构（lattice）以降低储存环横向发射度的新阶段，即第三代同步辐射。这些装置主要以图 1.5 所示的双弯铁消色散结构（double-bend achromat, DBA）^[51] 和三弯铁消色散结构（triple-bend achromat, TBA）^[52] 为基础磁聚焦结构，搭配较多的直线节，并以直线节中的插入件（insertion device, ID，即波荡器或扭摆器）为主要的同步辐射产生器件，针对硬 X 射线、软 X 射线或者极紫外辐射做了专门亮度优化。1994 年，欧洲同步辐射装置（ESRF）成为第一个运行的第三代同步辐射光源，其运行能量为 6 GeV，可在硬 X 射线波段产生高亮度同步辐射。随后，如伯克利的 ALS (1.9 GeV)、韩国的 PLS (2 GeV)、美国阿贡国家实验室的 APS (7 GeV)、日本的 Spring-8 (8 GeV) 等设施均在 20 世纪 90 年代出光。图 1.6 给出了一些典型的第三代同步辐射光源的亮度谱^[53]。由于大量插入件的使用，第三代同步辐射光源中阻尼作用较强；加之大量直线节的加入和 DBA、TBA 消色散结构的使用，使得环内的弯铁数目增加，单块弯铁偏转角减小，平衡的束团横向

发射度普遍降至 10 nm，束团辐射横向相干性相比第二代同步辐射光源有了质的变化，平均辐射亮度也达到约 10^{20} ph/s/mrad²/mm²/0.1%bw，如图 1.4 所示。截至目前，全世界范围内已经有超过 50 台第三代同步辐射装置^[54]，它们的信息可以通过网页^[55] 查到。这些装置在生命科学、材料科学、环境科学等诸多领域发挥着不可替代的作用，且存在供不应求的状况。

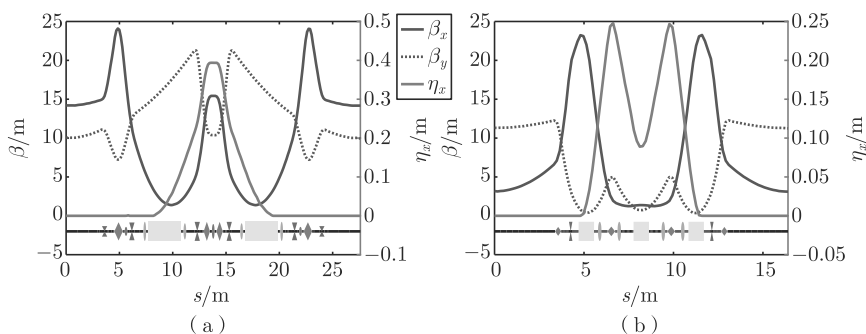


图 1.5 典型的 (a) DBA 结构 (APS 环) 和 (b) TBA 结构 (ALS 环)
(前附彩图)

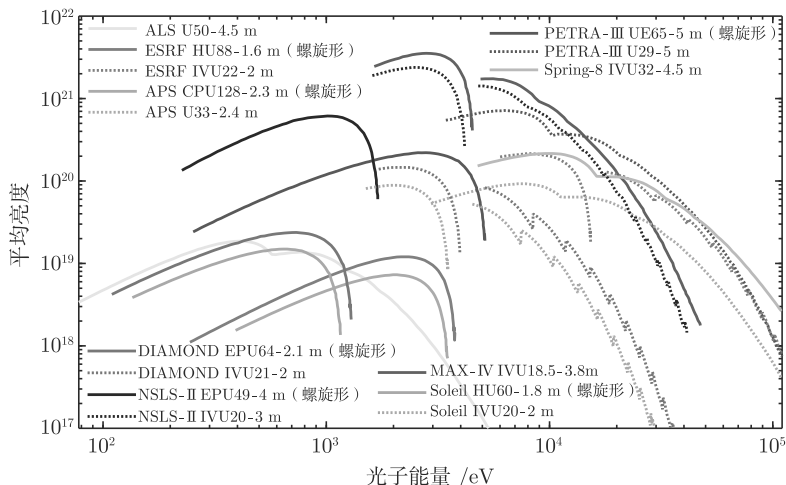


图 1.6 一些典型同步辐射光源平均亮度谱 (前附彩图)

从图 1.6 中可以发现，在这些同步辐射装置中，PETRA-III、NSLS-II

和 MAX-IV 三台装置的亮度明显高于平均水平。这源于其较小的束流横向发射度。前两台装置主要依靠阻尼扭摆器 (damping wiggler, DW) 的作用, 分别将横向发射度降低至 1 nm 和 0.5 nm; 而第四代光源 MAX-IV 实现 0.3 nm 的方式则完全不同, 它的磁聚焦结构相对前两者发生了很大的变化^[53,56]。

根据对储存环内束流稳态发射度的理论分析, 人们发现理论上最小的稳态束流水平发射度大致为^[57-58]

$$\epsilon_x = \frac{1}{12\sqrt{15}} \left(\frac{M+1}{M-1} \right) C_q \gamma_c^2 \theta^3 \propto \frac{\gamma_c^2}{N_b^3}$$

其中 $C_q = \frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{\hbar}{m_e c} = 3.84 \times 10^{-13} \text{ m}$ 为一常数; θ 为平均单块弯铁的偏转角; M 为每个超周期内的弯铁数目; N_b 为全环弯铁数目。这个关系直接表明, 进一步增加环内的弯铁数目可显著降低束流水平发射度, 进而使辐射的横向相干性增加, 将同步辐射亮度在第三代装置基础上再提升两个量级 (见图 1.7^[57-58] 中红线和蓝线), 这便是第四代同步辐射装置。图 1.7 展示了目前世界范围内第四代同步辐射装置的概况。为增加环内的弯铁数目, 降低色品不变量的均值, 它们普遍采用多弯铁消色散结构 (multi-bend achromat, MBA)^[59-62]。如第一台四代同步辐射光源——MAX-IV 为 7BA, 随后的 Sirius^[63] 和 ESRF-EBS^[64] 分别采用 5BA 和混合 7BA 将横向发射度降至 250 pm 和 135 pm, 辐射亮度也超过 $10^{22} \text{ ph/s/mrad}^2/\text{mm}^2/0.1\% \text{ bw}$ 。当束流的横向发射度减小至与同步辐射光的发射度接近甚至更小时, 同步辐射横向相干性逼近衍射极限, 亮度难以进一步依靠减小横向发射度提升。这样的储存环被称为“衍射极限环” (diffraction-limited storage ring, DLSR), 最早由 Teng 等提出^[9]。对于能量为 1 keV 的软 X 射线同步辐射, 其波长 $\lambda = 1.24 \text{ nm}$, 衍射极限要求环内束团稳态横向发射度达到 99 pm 以下。这样的发射度目前尚未有装置可实现 (见图 1.7), 当前世界范围内已有以 APS-U (目标: 42 pm)、PETRA-IV (目标: 20 pm) 为代表的许多装置拟通过升级的方式往第四代同步辐射装置过渡, 国内也有以 HEPS (目标: 小于 60 pm) 为代表的新装置在建, X 射线波段的衍射极限环不久便会实现。当然, 对于波长较长的同步辐射, 如 13.5 nm 的极紫外光对应的衍射极限发射度