



·先进同步辐射物理及技术·

储存环全相干光源*

姜伯承¹, 唐传祥², 冯超¹, 邓海啸¹, 李任恺²

(1. 中国科学院上海高等研究院上海光源中心, 上海 201204; 2. 清华大学工程物理系, 北京 100084)

摘要: 基于电子储存环的同步辐射具有稳定性高、光子能量范围广、支持多用户等优势, 但其辐射相干性较差。在储存环上实现相干辐射不但可以大幅提高辐射光的相干性, 同时还可以极大地提高特定频谱范围内的光通量、亮度和能量分辨率。随着光通量的提高, 其功率有可能达到工业应用的水平, 这将拓展光源的应用范围。回顾了基于电子束储存环的各类相干光源的发展历史, 并展望其发展趋势。

关键词: 电子储存环; 相干辐射; X 射线自由电子激光振荡器; 角色散机制

中图分类号: TL54⁴

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220047

Storage ring based coherent light sources

Jiang Bocheng¹, Tang Chuanxiang², Feng Chao¹, Deng Haixiao¹, Li Renkai²

(1. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Synchrotron radiation from an electron storage ring holds many advantages such as stability, broad spectrum, multi-users supporting. However, it lacks coherence. When the coherent radiation is produced from a storage ring, not only the coherence of the light is enhanced, but also the flux, brightness and the energy resolution of the light can be remarkably improved. As the flux is further increased, the power of the radiation may reach the requirement of industry. This paper presents a review of various kinds of electron storage ring based coherent light sources and gives an outlook of its development.

Key words: electron storage ring, coherent radiation, X-ray free-electron laser oscillator, angle dispersion mechanism

当电子运动速度接近光速($\beta \approx c$), 在受到横向偏转力作用时, 会沿运动的切线方向辐射电磁波, 这一现象于 1947 年在美国通用电气公司的一台同步加速器上首次被观测到^[1], 因此该辐射被称为同步辐射。同步辐射在 X 射线波段具有极大的优势, 它具有指向性好、波长覆盖范围广、亮度高、偏振性好等优异特性, 是研究微观世界的有力探针。目前全球有 30 多台第三代同步辐射光源在运行, 是探测微观世界的主力军之一, 每年产出大量的科研成果^[2]。

自同步辐射被发现以来, 提高辐射光的亮度成为其发展的主要方向。亮度的提高不但可以缩短实验时间, 提高效率; 还可以提高空间分辨率, 提高信噪比, 观察更细微结构; 并使动态过程的测量成为可能。同步辐射经历了三代的发展历程, 目前正处于第四代同步辐射光源的建设高潮中。其中第一代同步辐射光源是基于电子对撞机的兼用光源, 在对撞机电子储存环局部引出同步辐射光, 其实验站数量有限, 并且用光时间受对撞实验影响不能全时开放。第二代同步辐射光源虽然是专用光源, 但电子束发射度较大, 大量采用二极铁辐射光, 其同步辐射亮度不高。第三代同步辐射光源储存环电子束发射度在几个 $\text{nm}\cdot\text{rad}$ 量级, 并以波荡器的大量使用为特征。为安装波荡器, 第三代同步辐射光源储存环留有大量的直线节。第四代同步辐射光源将电子束发射度进一步减小并逼近 X 射线光子衍射极限, 光源亮度进一步提高, 第四代同步辐射光源又被称为衍射极限光源(DLSR)。但即便是第四代同步辐射光源, 其辐射也只是在横向部分相干。实现基于电子储存环的相干辐射是加速器光源领域一个重要的发展方向, 它不但可以大幅提高亮度, 同时还可以实现超短脉冲、全相干等特性。下文将回顾各类储存环相干光

* 收稿日期: 2022-02-17; 修订日期: 2022-04-10
基金项目: 国家自然科学基金项目 (11975298)
联系方式: 姜伯承, jiangbocheng@zjlab.org.cn。
通信作者: 唐传祥, tang.xuh@tsinghua.edu.cn。

源的发展历史,并展望其发展趋势。

1 太赫兹相干同步辐射

在电子储存环中,其自发辐射相干性较低。其中横向相干性占比如图1所示^[3]。

其辐射光横向相干性占比计算式为

$$f_{\text{co}}(\lambda) = f_{\text{co},x}(\lambda)f_{\text{co},y}(\lambda) = \frac{\varepsilon_r(\lambda)}{\varepsilon_r(\lambda) \otimes \varepsilon_x(e^-)} \frac{\varepsilon_r(\lambda)}{\varepsilon_r(\lambda) \otimes \varepsilon_y(e^-)} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_r(\lambda)$ 为光子衍射极限发射度; $\varepsilon_x(e^-)$, $\varepsilon_y(e^-)$ 分别为电子水平、垂直方向发射度; \otimes 表示卷积。

$$\varepsilon_r(\lambda) \approx \lambda/4\pi \quad (2)$$

从式(1)可以看出其辐射的横向相干性占比不但和电子束的发射度有关,还和辐射的波长相关。在长波段实现高相干性相对容易。

同时同步辐射储存环中,电子束的长度一般在毫米量级,其辐射在纵向一般不具备相干性,但在特殊情况下可以在长波段发出太赫兹波相干辐射。其中最为典型的是德国的 BESSY-II 光源,其在 low-alpha 短束长模式下,可以稳定产生太赫兹波段相干辐射^[4]。类似 BESSY-II 稳定的太赫兹相干辐射不具有普遍性,这和其加速器的特殊状态相关,它的电子束在相干同步辐射(CSR)作用下纵向高斯分布产生了一个稳态的畸变,畸变高斯分布的傅里叶变换包含有太赫兹频谱分量,在通过二极铁时可以产生稳定的太赫兹辐射^[5]。其他同步辐射光源也有太赫兹相干辐射输出,但大多是脉冲形式的^[6],这类现象在众多同步辐射光源上都被观察到,这里就不一一列举。脉冲型太赫兹辐射和 CSR 不稳定性相关^[7],发生 CSR 不稳定性时会产生微聚束,微聚束产生太赫兹相干辐射,但同时能散也会增大,增大的能散产生朗道阻尼机制破坏微聚束,束团恢复到稳态,CSR 效应又开始发展,如此循环往复,产生 Hz 量级的太赫兹辐射脉冲输出。CSR 不稳定性是光源运行所要避免的,它不能给用户 provide 稳定的太赫兹光,也没有用户基于此开展太赫兹实验。

在储存环中产生太赫兹相干辐射的另一种方法是 Femto-slicing^[8-10]。Femto-slicing 实验本来是为产生飞秒超短脉冲而设计,其示意图如图2所示。它是通过一个飞秒激光和电子束在波荡器中相互作用,使局部电子束能量产生调制。这一部分切片电子束在水平色散函数不为零处和正常电子束分离,收集该部分电子束产生的辐射就可以获得超短辐射脉冲。但它的一个副产品是产生太赫兹相干辐射,因为经过调制的电子束,其电荷分布在正常轨道上位于这个切片处产生缺失,电荷分布在纵向上形成了一个局部低谷,这样的分布可以产生太赫兹相干辐射。Femto-slicing 产生太赫兹相干辐射也是脉冲形式的,它的重频和激光调制频率相同,在 kHz 量级。

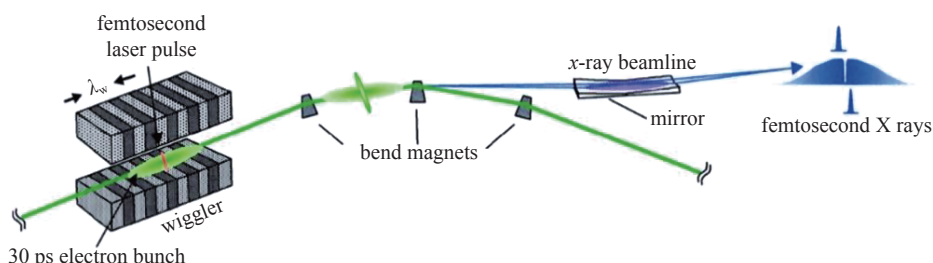


Fig. 2 Sketch of femto-slicing

图2 Femto-slicing 布局示意图

2 基于储存环的自由电子激光

基于储存环的同步辐射光源具有较高平均亮度、高重复频率和满足多用户运行等特点,而自由电子激光(FEL)具有高峰值亮度和高相干性等特点,如果能将二者的优势相结合,基于储存环产生超短、全相干以及高峰值亮度的短波长辐射,则能够极大提升储存环的性能,拓宽其应用范围。

目前国际上在运行的高增益 FEL 装置有 10 台左右,而电子储存环装置有 60 台以上。一个自然的想法是将储存环与 FEL 物理相结合,在储存环的电子束中引入微聚束,这样即使没有高增益过程,辐射亮度也可以比由插入

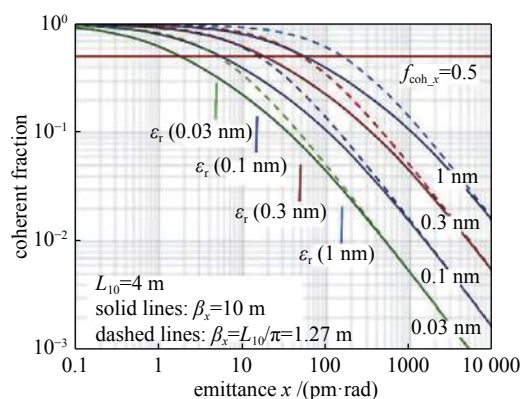


Fig. 1 Transverse coherent fraction versus emittance

图1 同步辐射横向相干性占比和电子束发射度关系图

件产生的自发辐射高4~5个量级以上。将储存环与FEL相结合的概念已经历了多年的发展,主要有两种工作模式:一种为基于光学谐振腔的低增益FEL^[11],另外一种为基于光学速调管(OK)的超辐射FEL^[12]。20世纪80年代至21世纪初,世界上有十余台同步辐射装置先后开展了基于如上两种原理的FEL实验^[13-22],我国的合肥同步辐射光源也在基于光学速调管的相干谐波产生型FEL(coherent harmonic generation,简称CHG-FEL)方面开展了相关研究工作^[23]。谐振腔型FEL受到反射材料的限制,输出波长很难达到200 nm以下,所以CHG-FEL逐渐成为了储存环FEL的主流发展方向。

CHG-FEL需要借助常规激光作为种子,并对其进行谐波转换以产生短波长的辐射。CHG的结构通常由两段波荡器中间加一个色散段所组成,其中第一个波荡器共振在外种子激光的波长上,叫做调制段。种子激光与电子束在调制段中发生相互作用在电子束中引入能量调制,在经过色散段时,能量调制被转换为密度调制,即形成以种子激光波长为周期的微聚束。电子束密度调制的大小可以用群聚因子来衡量,对于CHG-FEL,群聚因子不仅出现在种子激光的基波上,还在高次谐波上有较强的分量^[24]。利用这一特性,可以调整第二个波荡器(辐射段)的共振条件选择对某一个高次谐波进行放大,从而拓展其波长覆盖范围。由于电子束在辐射波长上产生了群聚,谐波辐射纵向是全相干的,且辐射功率沿波荡器长度呈平方增益,在几米的波荡器内就可以产生比自发辐射强4~5个量级以上的强脉冲。另外,CHG的辐射脉冲长度由种子激光所决定,因而可以在皮秒到飞秒量级进行调节。基于储存环的CHG-FEL似乎为用户提供了一种理想的超短脉冲全相干光源,然而CHG-FEL的谐波转换次数受到电子束能散的限制,一般可达到的谐波数非常有限。储存环上典型的电子束能散为0.1%量级,若要产生一定的谐波群聚,一方面需要超强的种子激光(峰值功率在GW至百GW量级)引入足够大的能量调制,另外一方面又要限制能量调制的幅度以保证电子束品质不被破坏。正是由于实际的诸多限制,近二十年来,基于储存环CHG-FEL并没有取得很大的发展。

近些年来,在电子束的精细操控方面取得了一系列新的进展^[25-35],通过采用比传统CHG更为复杂的调制结构对电子束相空间进行操控,以实现较小能量调制的条件下得到更高的谐波转换效率,从而使产生覆盖更短波段的全相干FEL成为可能。把这些FEL领域的新近研究成果应用于储存环,也为储存环FEL的发展带来了新的可能性。如利用蛇形束产生高次谐波辐射^[28]。利用回声机制产生高次谐波(EEHG),相比于CHG能够降低能量调制振幅并且提高谐波转换次数^[29]。利用相位融合技术(PEHG)产生高次谐波辐射^[31]。利用EEHG两次调制电子束的特性,能够产生短于调制激光的辐射脉冲^[36]。利用频率啁啾种子激光在储存环中获得双色脉冲^[37]和利用少周期激光产生亚飞秒脉冲^[38]等。

在短波长领域,要产生高强度的X射线FEL,需要非常高质量的电子束,要求高的电子能量,非常小的电子束发射度和切片能散。因此,所有正在运行的高增益硬X射线自由电子激光装置都采用了直线加速器^[39]。

衍射极限储存环相比于第三代同步辐射装置,其发射度降低了1~2个数量级,达到了几十pm·rad的量级,可以产生高亮度电子束。DLSR可以驱动XFEL的潜力吸引了同步辐射研究领域的注意。基于直线加速器的高增益XFEL是成功的,但基于DLSR的XFEL只能达到软X射线波段的光子能量^[40]。在DLSR中,束内散射等集体效应限制了发射度的进一步降低和峰值电流的提高,因此,基于DLSR的高增益XFEL输出3 keV以上的X射线非常困难。并且,高增益XFEL方案需要100 m量级的波荡器,对储存环的设计和束流动力学的影响很大。

最近提出的X射线自由电子激光振荡器(XFELO)方案^[41]在原理上可以放松这些限制。XFELO需要的电子束峰值流强更低,波荡器长度更短。因此,XFELO方案其波荡器可以安装在DLSR的普通直线节,而不破坏DLSR多用户运行的特性。XFELO使用晶体的布拉格(Bragg)反射来构建光学谐振腔。谐振腔反射的波长可以根据Bragg定律 $\lambda = 2d\cos\theta$ 来确定。辐射脉冲在谐振腔中振荡,并且不断地与电子束相互作用来放大,其结构示意图如图3所示。单次通过的FEL增益 G 是衡量XFELO可行性的一个重要参数。在平衡状态下的DLSR将提供发射度为几十pm·rad的电子束,但是其相对能散较大(DLSR的电子束能散在0.1%左右,而直线加速器中通常为0.01%)。大能散造成的增益下降可以通过横向梯度波荡器(TGU)来缓解^[42]。使用TGU后,单次通

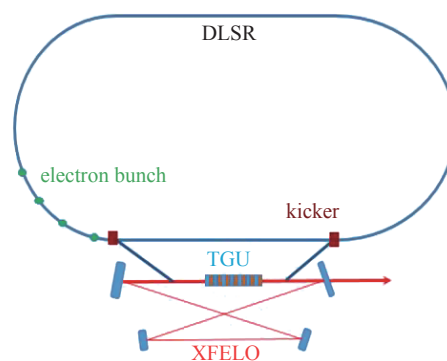


Fig. 3 Layout of XFELO

图3 XFELO布局示意图

过的增益可以写成^[43]

$$G \approx \frac{1.53\pi^3\gamma\lambda}{\lambda_u} \frac{K^2[JJ]^2}{1 + \frac{K^2}{2} \frac{D}{\sigma_x} + (5.46N_u)^2 \frac{\sigma_x}{D}} \frac{N_u/\sigma_\eta}{D} \quad (3)$$

式中: D 是色散; σ_x 是束团横向大小; N_u 是波荡器周期数; $[JJ]$ 是修正因子; σ_η 是相对能散; γ 是电子能量。目前, 已经有基于 PEP-X^[43] 和 PETRA-IV^[44] 装置的 XFEL 方案研究。在这些方案中, 束流发射度为 ~ 10 pm·rad, 峰值流强为 ~ 10 A, 相对能散为 0.1%, 基于 TGU 的单次增益 G 可以达到 30% 左右, 输出功率可以达到 MW 量级, 而相对带宽在 10^{-6} 量级。基于 TGU 的 XFEL 可以充分利用 DLSR 的低发射度, 同时有效地抑制其能散造成的增益下降, 是产生稳定的全相干 X 射线辐射的重要途径之一。

除了上述低增益方案外, 利用储存环电子束实现高增益 FEL 的方案也有探索。要实现高增益同样需要 TGU 来和大能散的电子束匹配^[45-47], 并且波荡器的总长度较长。然而由于储存环中电子束的峰值流强较低, 并且由于其能散较大, 限制了其束团长度被进一步压缩, 因此其饱和峰值功率也较基于直线节加速器的 FEL 低。

3 基于角色散机制的储存环光源

角色散机制于 2017 年被提出^[32]。它是一种四维空间的操作手段, 利用电子束垂直方向发射度小的特性, 产生超高次谐波辐射。它的结构非常简单, 如图 4 所示, 电子束在经过一块二极铁(B)后与激光相互作用产生能量调制, 经能量调制后的电子束经过色散段(D)后即可形成微聚束。

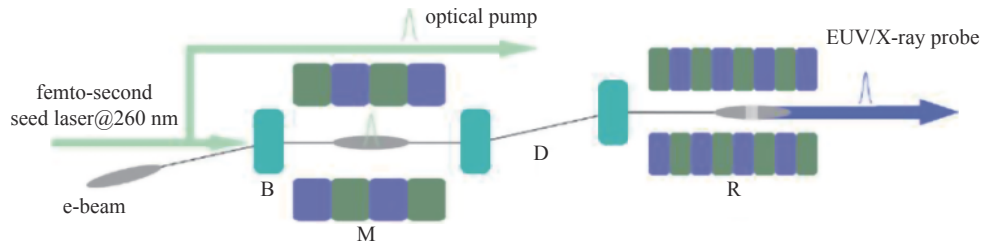


Fig. 4 Sketch of ADM

图 4 角色散机制示意图

角色散机制在 y - z 平面的传输矩阵如式(4)所示。当满足条件 $h\xi = -1$, $\xi = b\eta$ 时, 即可满足聚束条件, 束团长度只取决于垂直平面的角散。这里 b 为二极铁偏转角度, h 为能量调制幅度, η , ξ 分别为垂直色散段 D 的 R_{53} 和 R_{56} 。

$$\begin{bmatrix} 1 + hb\eta & L & h\eta & \eta - (L - L_b)b \\ 0 & 1 & 0 & -b \\ b(1 + h\xi) & \eta & 1 + h\xi & \xi - b\eta \\ hb & 0 & h & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

角色散机制的优势在于能量调制幅度非常小, 能量调制幅度在 1 倍能散之内就可以产生几十次高次谐波。其应用于储存环有非常明显的优势, 首先储存环中电子束做循环运动, 对扰动非常敏感, 能量调制幅度越小和储存环兼容性越好。另外储存环中电子束重复频率非常高, 具备实现高重频调制的基础。在高重频下, 较低的能量调制幅度可以大幅降低对激光平均功率的需求, 使得高重频激光的实现成为可能。同时储存环中电子束能散较大, 采用角色散机制很好地克服了能散大造成高次谐波难产生的问题。

在储存环中采用角色散机制, 可以使同步辐射亮度在第四代光源的基础上再提高 2 个量级^[34]。由于储存环中电子束团比较长, 在对整个束团做能量调制后, 其辐射的带宽非常窄, 这样的光源同时具备超高的能量分辨率, 对开展角分辨光电子能谱 (ARPES), 共振非弹性 X 射线散射 (RIXS) 实验非常有利。

为进一步提高调制的重复频率, 可在储存环中引入反调制, 即电子束在调制和反调制之间 $R_{56} = 0$, 调制和反调制点激光相位差 π , 那么能量调制可以被消除。在储存环中其他地方看到的是一个正常的电子束^[48]。经过反调制后, 电子束可以承受更高频率的调制, 发出更高频率的相干辐射。在这种工作模式下, 辐射波荡器长度只有 2~3 m, 辐射基本没有增益, 电子束能散不会被破坏。其辐射的峰值功率要比自由电子激光小约 5 个量级, 但比自发辐射要高约 3 个量级。和基于直线加速器的自由电子激光比其重频更高、峰值功率更低。

除上述方案外, 通过激光斜入射也可以实现角色散机制^[33, 35]。该方案在激光和电子束相互作用点没有色散, 在反调制作用后, 理论上可以控制对垂直发射度的影响。但该方案激光和电子束相互作用不但产生能量调制, 同

时也有角度调制,作用较为复杂,实际应用时技术挑战较大。

目前角色散机制在国际上已经引起了广泛关注,日本的 KEK ATF^[49] 和意大利 Elettra 都提出了原理验证计划。上海光源团队也提出了基于角色散机制的储存环全相干光源方案^[50]。

4 稳态微聚束

稳态微聚束(SSMB)概念由 Daniel F. Ratner 和 Alexander W. Chao 于 2010 年提出^[51],它是在储存环中实现高平均功率相干辐射的一种新机制。该方案中采用激光谐振腔调制电子束,发挥类似于传统储存环中利用微波谐振腔对电子束加速和聚束的作用,但是激光波长要远小于微波的波长,因此在电子束内形成的束团长度非常短的高电荷密度区域,称为微聚束。同时,为使微聚束能在储存环中稳定运行,储存环的磁聚焦结构要做专门的设计,使得动量压缩因子(α)非常小,并且局部动量压缩因子(partial α)也要非常小^[52-55],以避免由于电子束经过二极铁辐射时的量子激发导致束团长度的增长。

研制稳态微聚束中的高功率光学谐振腔对窄线宽驱动激光器与光学谐振腔镜提出了极高的要求,现有技术路线和研究方向聚焦在 $1\ \mu\text{m}$ 左右的激光波长,因此对应的电子束中微聚束的周期间隔也为 $1\ \mu\text{m}$ 左右。初步的磁聚焦结构设计结果表明,储存环中每个微聚束的长度可以控制在 $100\ \text{nm}$ 左右。为了产生能够在 EUV 波段实现高功率辐射的高聚束因子,需要对电子微聚束进一步进行纵向聚焦^[56]。实现以上目标的可能技术方案之一,如图 5 所示,在电子束进入辐射段前,先对微聚束做能量调制形成能量啁啾,然后经过磁压缩段形成更短束团,通过波荡器辐射短波长光。辐射后的电子束在经过一个同样的磁压缩段,电子束纵向长度开始增大,然后通过一个相同的能量调制,消除大部分的能量啁啾。

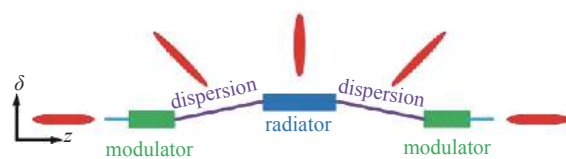


Fig. 5 Microbunch compression in the storage ring of SSMB
图 5 电子储存环中 SSMB 电子束纵向压缩示意图。

SSMB 方案具有很多优势,例如无需使用大规模超导加速单元从而降低装置成本,另外其辐射功率以连续波形式输出,因此其峰值功率较小,有利于避免光学元件的损伤,在原理上 SSMB 存在输出 kW 级 EUV 辐射的可能性,有望在 EUV 光刻领域有重要应用前景。同时 SSMB 的辐射还具有带宽极窄、重复频率高且可调、脉冲长度可调等优势,可以为量子材料、能源、化学等领域的科学实验提供非常强大的支持。

清华团队和德国 MLS 光源合作,在 MLS 储存环上成功进行了 SSMB 原理验证实验,实验原理图如图 6 所示,利用激光调制在电子束团内产生了微聚束,并实现了微聚束经过整个储存环的传输和相干发光^[57]。其实验原理图如下图所示,储存环运行在准等时状态下(quasi-isochronous),波荡器既做调制器又做辐射器,激光采用波长 $1064\ \text{nm}$ 的红外激光。电子束经红外激光作用后产生了微聚束,并在第二圈产生了二次谐波辐射,该实验证明了第二圈微聚束依然存在,实验中也观察到辐射功率随电子束流强的平方增长,即属于相干辐射。目前第二阶段的原理验证实验正处在关键设备研制、安装与调试阶段,实验目标为实现多圈的激光调制和微束团的保持。

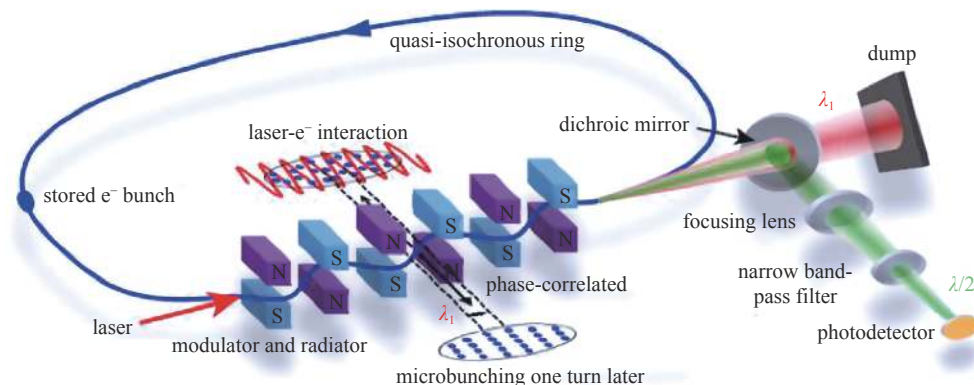


Fig. 6 Schematic of the experimental set-up of SSMB
图 6 SSMB 原理验证示意图

5 结论

基于电子储存环的相干光源经历了漫长的发展历程,其发展过程遵循从长波长到短波长,从易到难的规律。

在第四代同步辐射光源后, 储存环全相干光源是光源发展的一个重要突破口, 而实现高通量、高亮度、高稳定性的全相干光源, 需要深入研究电子束和激光的相互作用, 同时依赖于加速器技术和激光技术的突破。目前在该领域国内和国际基本处于同一起跑线, 并有可能实现领先。

参考文献:

- [1] Elder F R, Gurewitsch A M, Langmuir R V, et al. Radiation from electrons in a synchrotron[J]. *Physical Review*, 1947, 71: 829.
- [2] 赵振堂. 先进X射线光源加速器原理与关键技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2021. (Zhao Zhentang. Principles and key technologies of advanced X-ray light source accelerators[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2021)
- [3] Hettel R. DLSR design and plans: an international overview[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(5): 843-855.
- [4] Jankowiak A, Wüstefeld G. Low- α operation of BESSY II and future plans for an alternating bunch length scheme BESSY^{vsr}[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2013, 26(3): 22-24.
- [5] Byrd J M, Loftsdóttir Á, Venturini M, et al. Stable CSR in storage rings: a model[R]. LBNL-56777, 2005.
- [6] Byrd J M, Leemans W P, Loftsdóttir A, et al. Observation of broadband self-amplified spontaneous coherent terahertz synchrotron radiation in a storage ring[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89: 224801.
- [7] Venturini M, Warnock R. Bursts of coherent synchrotron radiation in electron storage rings: a dynamical model[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89: 224802.
- [8] Schoenlein R W, Chattopadhyay S, Chong H H W, et al. Generation of femtosecond pulses of synchrotron radiation[J]. *Science*, 2000, 287(5461): 2237-2240.
- [9] Ingold G, Beaud P, Johnson S L, et al. Technical report: FEMTO: a sub-ps tunable hard X-ray undulator source for laser/X-ray pump-probe experiments at the SLS[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2007, 20(5): 35-39.
- [10] Zholents A A, Zolotarev M S. Femtosecond X-ray pulses of synchrotron radiation[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(6): 912-915.
- [11] Billardon M, Elleaume P, Ortega J M, et al. First operation of a storage-ring free-electron laser[J]. *Physical Review Letters*, 1983, 51(18): 1652-1655.
- [12] Girard B, Lapierre Y, Ortega J M, et al. Optical frequency multiplication by an optical klystron[J]. *Physical Review Letters*, 1984, 53(25): 2405-2408.
- [13] Couprie M E, Billardon M, Velghe M, et al. Free-electron-laser oscillation on the super-ACO storage ring at Orsay[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1990, 296(1/3): 13-19.
- [14] Couprie M E, Velghe M, Prazeres R, et al. Results and analysis of free-electron-laser oscillation in a high-energy storage ring[J]. *Physical Review A*, 1991, 44(2): 1301-1315.
- [15] Yamada K, Yamazaki T, Sugiyama S, et al. Visible oscillation of storage-ring free electron laser on TERAS[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1992, 318(1/3): IN1,33-37.
- [16] Litvinenko V N, Burnham B, Emamian M, et al. Gamma-ray production in a storage ring free-electron laser[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(24): 4569-4572.
- [17] Yamazaki T, Yamada K, Sugiyama S, et al. First lasing of the NIJI-IV storage-ring free-electron laser[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1993, 331(1/3): 27-33.
- [18] Deacon D A G, Billardon M, Elleaume P, et al. Optical klystron experiments for the ACO storage ring free electron laser[J]. *Applied Physics B*, 1984, 34(4): 207-219.
- [19] Litvinenko V N, Park S H, Pinayev I V, et al. Operation of the OK-4/Duke storage ring FEL below 200 nm[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2001, 475(1/3): 195-204.
- [20] Wu Y K, Vinokurov N A, Mikhailov S, et al. High-gain lasing and polarization switch with a distributed optical-klystron free-electron laser[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96: 224801.
- [21] Yamanaka C. Free electron laser: technical issues and prospects in Japan[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1993, 331(1/3): 191-198.
- [22] Khan S, Bakr M, Höner M, et al. Coherent harmonic generation at DELTA: a new facility for ultrashort pulses in the VUV and THz regime[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2011, 24(5): 18-23.
- [23] 陈念, 徐宏亮, 刘金英, 等. 储存环相干谐波自由电子激光器新光学速调管工作状态分析[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(6): 524-528. (Chen Nian, Xu Hongliang, Liu Jinying, et al. Working condition of reconstructed optical klystron of CHG-SRFEL[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(6): 524-528)
- [24] Yu Lihua. Generation of intense UV radiation by subharmonically seeded single-pass free-electron lasers[J]. *Physical Review A*, 1991, 44(8): 5178-5193.
- [25] Stupakov G. Using the beam-echo effect for generation of short-wavelength radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 074801.
- [26] Xiang Dao, Stupakov G. Echo-enabled harmonic generation free electron laser[J]. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 2009, 12: 030702.
- [27] Xiang Dao, Wan Weishi. Generating ultrashort coherent soft X-ray radiation in storage rings using angular-modulated electron beams[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104: 084803.
- [28] Stupakov G. Frequency multiplication using coherent radiation of a “snake” beam[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2013, 16: 010702.
- [29] Evain C, Loulergue A, Nadjai A, et al. Soft X-ray femtosecond coherent undulator radiation in a storage ring[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14: 023003.

- [30] Deng Haixiao, Feng Chao. Using off-resonance laser modulation for beam-energy-spread cooling in generation of short-wavelength radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111: 084801.
- [31] Feng Chao, Deng Haixiao, Wang Dong, et al. Phase-merging enhanced harmonic generation free-electron laser[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16: 043021.
- [32] Feng Chao, Zhao Zhenqiang. A storage ring based free-electron laser for generating ultrashort coherent EUV and X-ray radiation[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4724.
- [33] Wang Xiaofan, Feng Chao, Liu Tao, et al. Angular dispersion enhanced prebunch for seeding ultrashort and coherent EUV and soft X-ray free-electron laser in storage rings[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(3): 677-684.
- [34] Li Changliang, Feng Chao, Jiang Bocheng. Extremely bright coherent synchrotron radiation production in a diffraction-limited storage ring using an angular dispersion-induced microbunching scheme[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2020, 23: 110701.
- [35] Li Changliang, Jiang Bocheng, Feng Chao, et al. Lattice design for angular dispersion enhanced microbunching in storage rings[J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 16: P03004.
- [36] Liu Weihang, Zhou Guanqun, Jiao Yi. Generating femtosecond coherent X-ray pulses in a diffraction-limited storage ring with the echo-enabled harmonic generation scheme[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2018, 29: 143.
- [37] Liu Weihang, Wu Yi, Jiao Yi, et al. Generation of two-color polarization-adjustable radiation pulses for storage ring light source[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, 30: 66.
- [38] Hwang J G, Schiwietz G, Abo-Bakr M, et al. Generation of intense and coherent sub-femtosecond X-ray pulses in electron storage rings[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 10093.
- [39] Huang Nanshun, Deng Haixiao, Liu Bo, et al. Features and futures of X-ray free-electron lasers[J]. *The Innovation*, 2021, 2: 100097.
- [40] Agapov I. Feasibility of a ring FEL at low emittance storage rings[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, 793: 35-40.
- [41] Kim K J, Shvyd'ko Y, Reiche S. A proposal for an X-ray free-electron laser oscillator with an energy-recovery linac[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 244802.
- [42] Huang Zhirong, Ding Yuantao, Schroeder C B. Compact X-ray free-electron laser from a laser-plasma accelerator using a transverse-gradient undulator[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109: 204801.
- [43] Lindberg R, Kim K J, Cai Y, et al. Transverse gradient undulators for a storage ring X-ray FEL oscillator[C]//Proceedings of FEL 2013. New York, NY, USA, 2013: 740-748.
- [44] Agapov I, Chae Y C, Hillert W. Low gain FEL oscillator option for PETRA IV[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. Vancouver, BC, Canada: JACoW Publishing, 2018: 1420-1422.
- [45] Cai Yunhai, Ding Yuantao, Hettler R, et al. An X-ray free electron laser driven by an ultimate storage ring[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2013, 26(3): 39-41.
- [46] Di Mitri S. One way only to synchrotron light sources upgrade?[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, 25: 1323-1334.
- [47] Di Mitri S, Cornacchia M, Diviacco B, et al. Bridging the gap of storage ring light sources and linac-driven free-electron lasers[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 060702.
- [48] Li Changliang, Feng Chao, Jiang Bocheng, et al. Lattice design for the reversible SSMB[C]//Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference. Melbourne, Australia: JACoW Publishing, 2019: 1507-1509.
- [49] KEK. KEK report 2020-4[R].
- [50] Jiang Bocheng, Feng Chao, Li Changliang, et al. A synchrotron-based kilowatt-level radiation source for EUV lithography[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 3325.
- [51] Ratner D F, Chao A W. Steady-state microbunching in a storage ring for generating coherent radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105: 154801.
- [52] Deng X J, Chao A W, Feikes J, et al. Single-particle dynamics of microbunching[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2020, 23: 044002.
- [53] Deng X J, Chao A W, Huang W H, et al. Courant-Snyder formalism of longitudinal dynamics[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 094001.
- [54] Deng X J, Huang W H, Li Z Z, et al. Harmonic generation and bunch compression based on transverse-longitudinal coupling[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 1019: 165859.
- [55] Tang Chuanxiang, Deng Xiujie, Huang Wenhui, et al. An overview of the progress on SSMB[C]//Proceedings of the 60th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources. Shanghai, China: JACoW Publishing, 2018: 166-170.
- [56] Zhang Y, Deng X J, Pan Z L, et al. Ultralow longitudinal emittance storage rings[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 090701.
- [57] Deng Xiujie, Chao A, Feikes J, et al. Experimental demonstration of the mechanism of steady-state microbunching[J]. *Nature*, 2021, 590(7847): 576-579.