

2022年高能物理研究所先进光源物理研讨会

**清华大学 “稳态微聚束”
加速器光源研究进展**

邓秀杰

代表清华大学SSMB研究组

高能物理研究所东莞研究部，2022年8月19日-21日

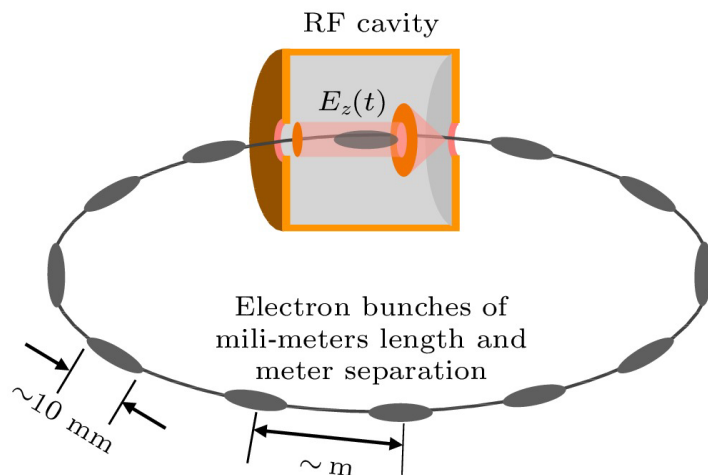
目录

- SSMB光源原理简介
- SSMB原理验证实验
- SSMB核心物理及关键技术挑战
- 清华SSMB-EUV光源

加速器光源—当前主力军

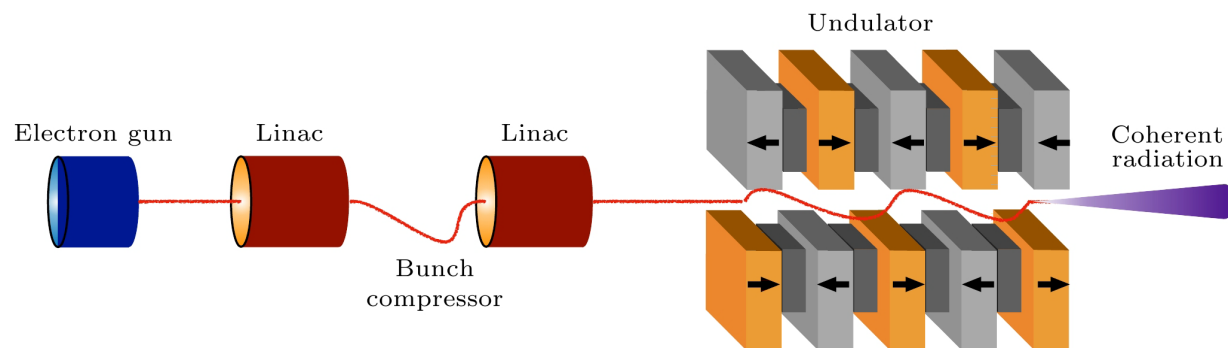
• 同步辐射光源

- 高亮度、宽能谱、高重频
- 横向部分或全相干、纵向非相干
- 研究热点：衍射极限环，挖掘束团横向的潜力



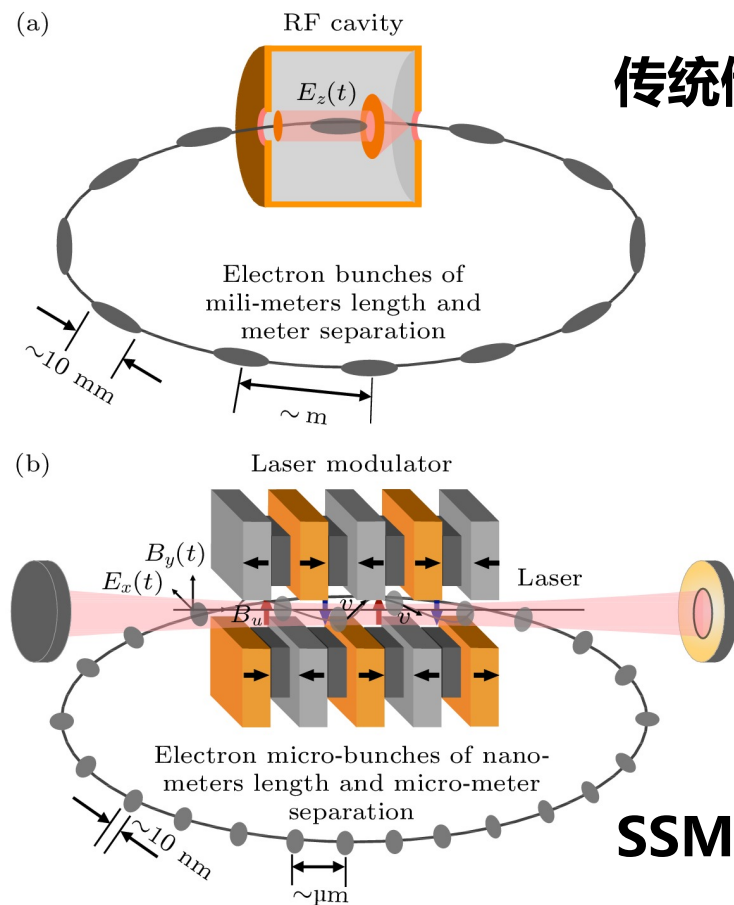
• 自由电子激光

- 超高峰值亮度、窄带宽、低重频
- 横向全相干、纵向部分或全相干
- 研究热点：进一步提升辐射的纵向相干性、重复频率，开发各种新工作模式满足用户多样的需求等

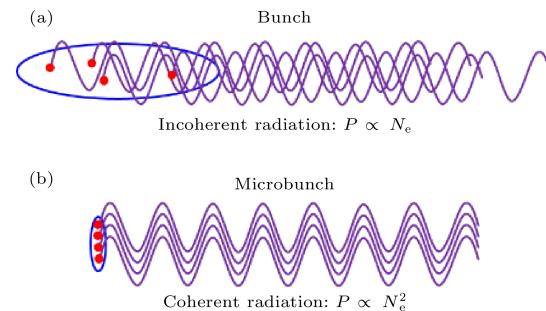


稳态微聚束加速器光源

- 基于电子储存环，**挖掘束团纵向的潜力**
- 聚束系统：由激光调制器取代微波射频腔
- 两个要素：
 - “微聚束” 是为了产生强相干辐射
 - “稳态” 是为了实现高重频发光
- 产出：提供高平均功率、窄带宽的相干辐射，波段可覆盖从太赫兹到软X射线
- 潜在应用：EUV光刻、高能量分辨率ARPES



传统储存环



SSMB储存环

SSMB合作组

- 2017年, 清华大学联合国内外研究团队, 组建了SSMB研究合作组, 针对EUV光刻对大功率EUV光源的需求, 研究基于SSMB原理的EUV光源的物理及技术实现
- 三大任务:
 1. 原理验证实验
 2. EUV SSMB储存环设计
 3. 解决关键技术挑战

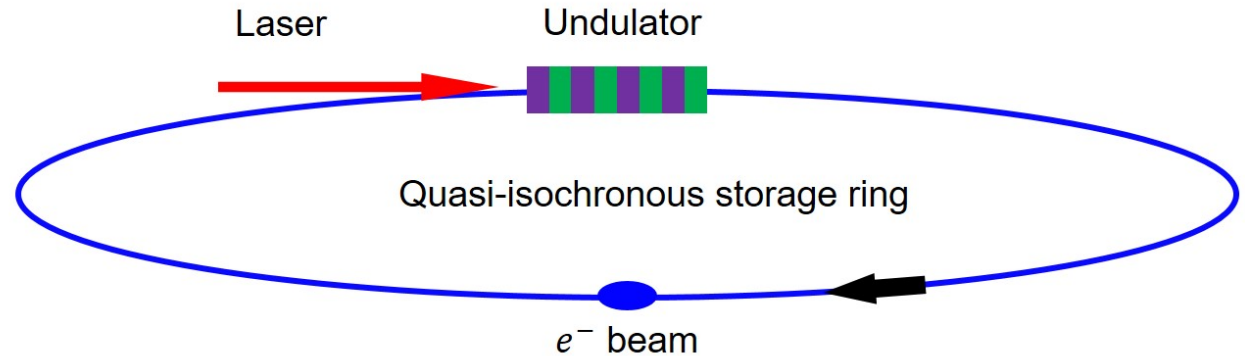


目录

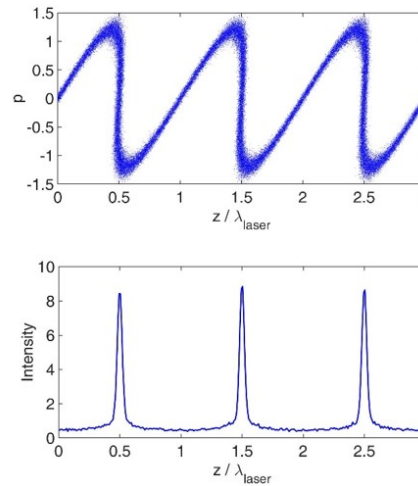
- SSMB光源原理简介
- **SSMB原理验证实验**
- SSMB核心物理及关键技术挑战
- 清华SSMB-EUV光源

SSMB原理验证实验

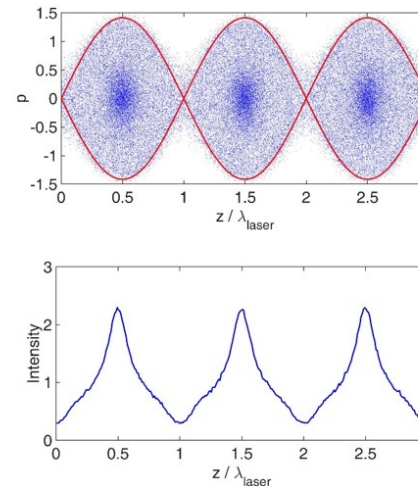
- 三步走的策略
- Phase I: microbunching based on stored electron bunch, turn-by-turn phase correlation
- Phase II: bounded motion, microbucket, quasi steady state
- Phase III: real steady state, balance of diffusion and damping



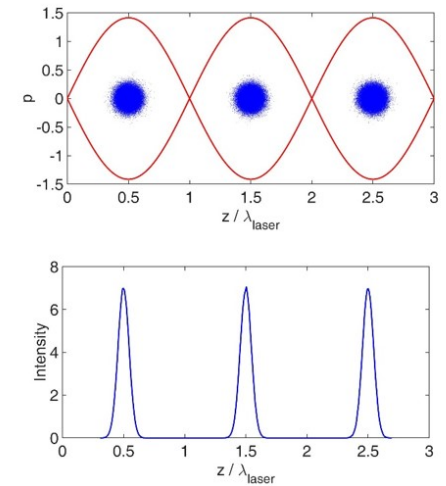
Phase I: a single laser shot, shot-lived microbunching



Phase II: multiple laser shots, quasi-steady-state microbunching

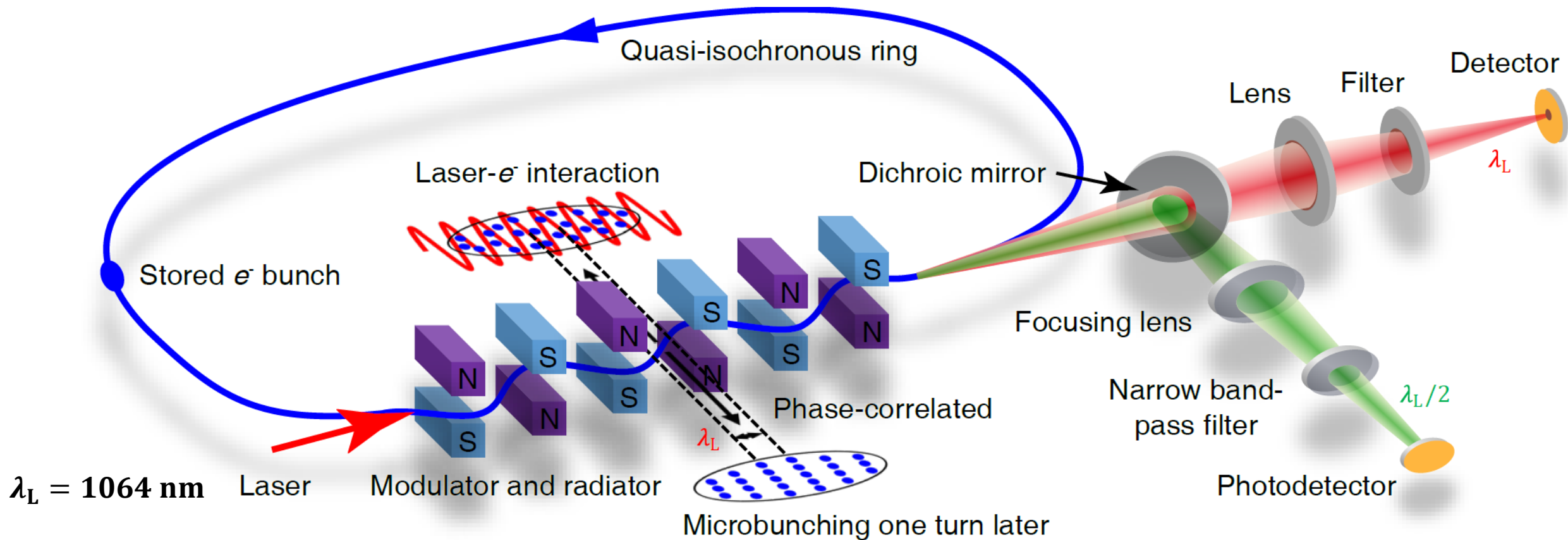


Phase III: infinite laser shots, real-steady-state microbunching

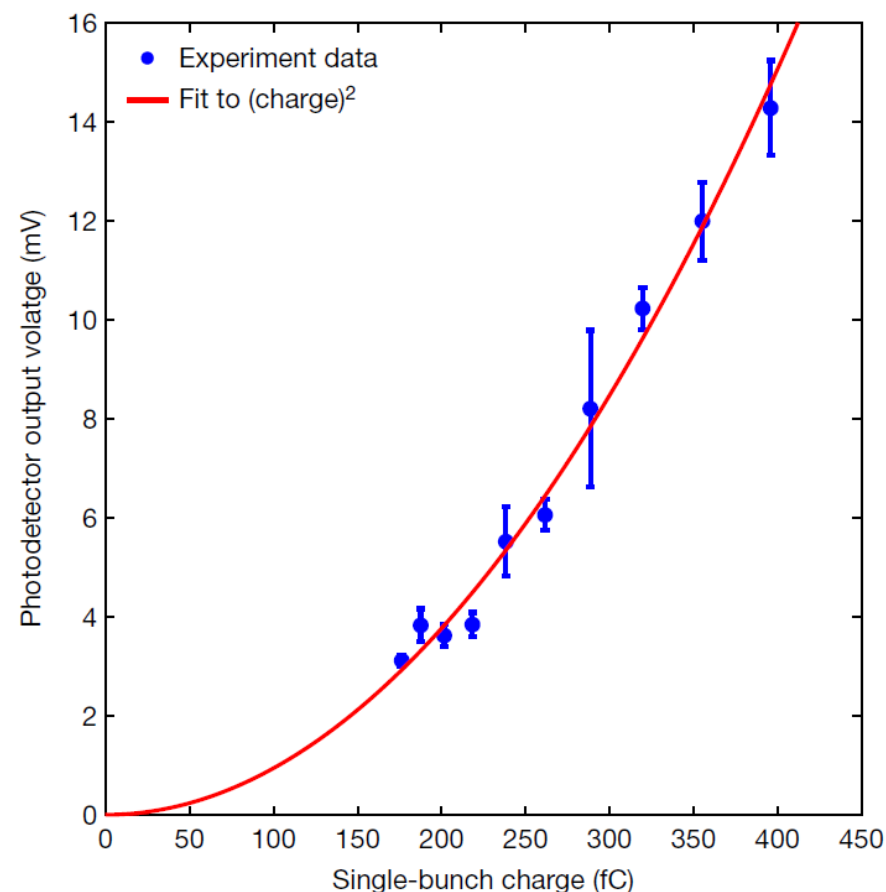
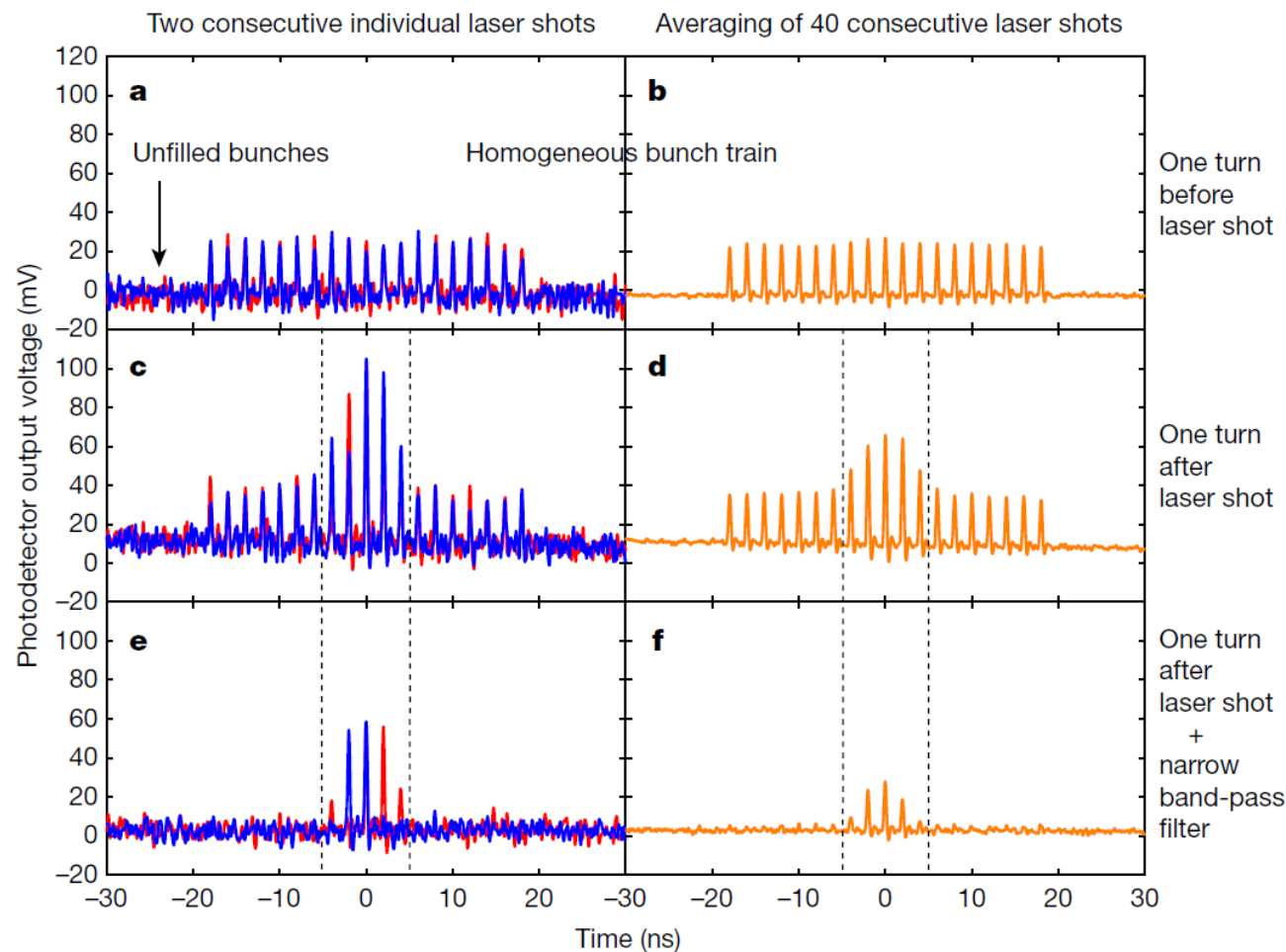


PoP Phase I (Tsinghua, HZB & PTB)

$$C = 48 \text{ m} \quad \eta \approx -2 \times 10^{-5} \quad E = 250 \text{ MeV}$$



辐射的窄带宽特性以及辐射功率与电荷量的平方正比关系，有力地证明了微聚束的形成

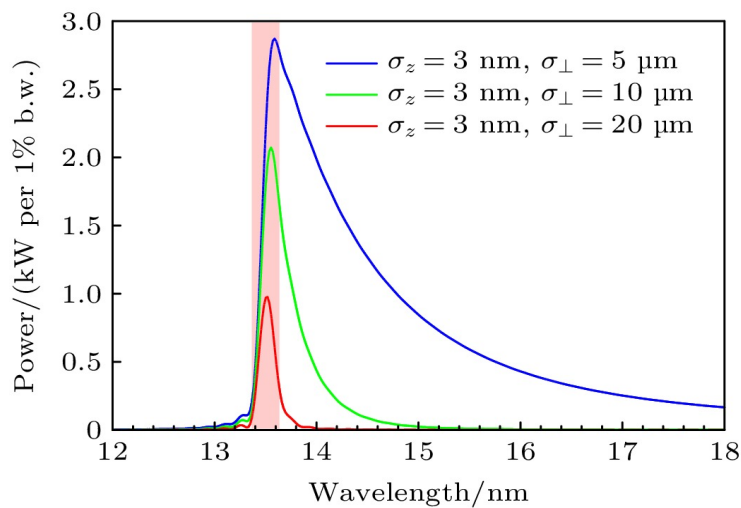


目录

- SSMB光源原理简介
- SSMB原理验证实验
- SSMB核心物理及关键技术挑战
- 清华SSMB-EUV光源

SSMB辐射特性

- 研究显示在束流平均强度1 A，微束团长度3 nm的情况下，SSMB 可较为直接地实现**平均功率大于1 kW的EUV光输出**
- SSMB相干辐射的窄带宽特性跟束团横向尺寸有显著关系，随着束团横向尺寸的增大，总的辐射功率会下降，而且辐射的单色性变好，辐射更集中于电子束前进方向
- 考虑电子的点状特性和辐射的量子特性，不同束团、或同一束团不同圈的辐射功率会存在涨落



束团的横向形状因子

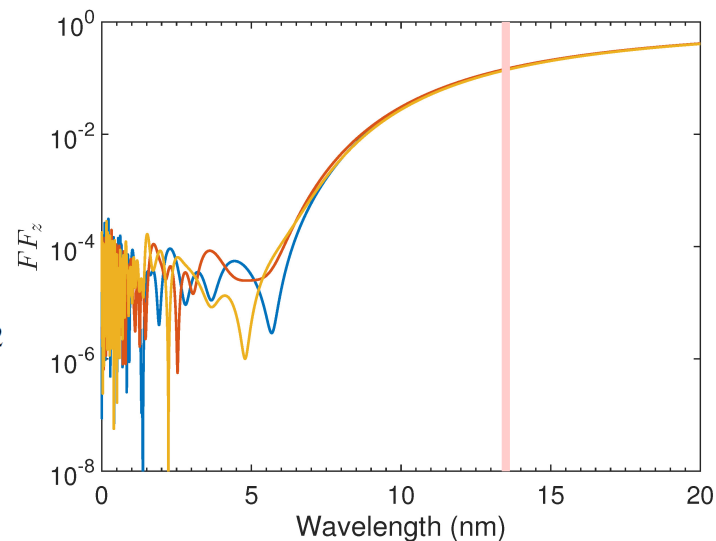
$$FF_{\perp}(H, \sigma_{\perp}, \omega) = \exp[-4N_u \pi S (H - \omega/\omega_0)] \\ \times \frac{2}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{2S} \right) + S \ln \left(\frac{(2S)^2}{(2S)^2 + 1} \right) \right],$$

$$P_{N_e}(\omega) = P_{1e}(\omega) [N_e + N_e(N_e - 1)|b_z(\omega)|^2 FF_{\perp}(\omega)]$$

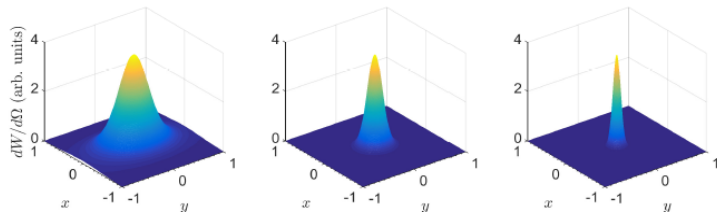
$$P_{H, \text{peak}}[\text{kW}] = 1.183 N_u H \chi [JJ]_H^2 I_P^2 [\text{A}] FF_{\perp}(S) |b_{z,H}|^2$$

束团相干辐射功率的涨落

$$\frac{\text{Var}[P(\omega)]}{\langle P(\omega) \rangle^2} = \frac{1}{\langle N_{\text{ph}}(\omega) \rangle |_{\text{beam}}} + \frac{2}{N_e} \left(\frac{1 + \sqrt{FF_z(2\omega)}}{FF_z(\omega)} - 2 \right) \\ + \mathcal{O} \left(\frac{1}{N_e^2} \right),$$



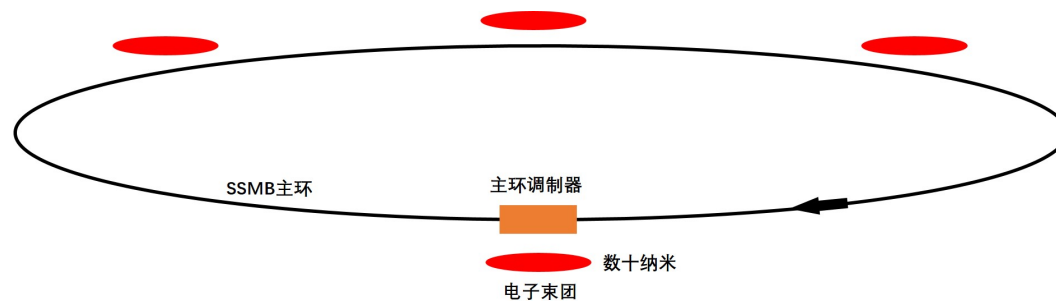
辐射的涨落特性可以作为束流诊断的工具



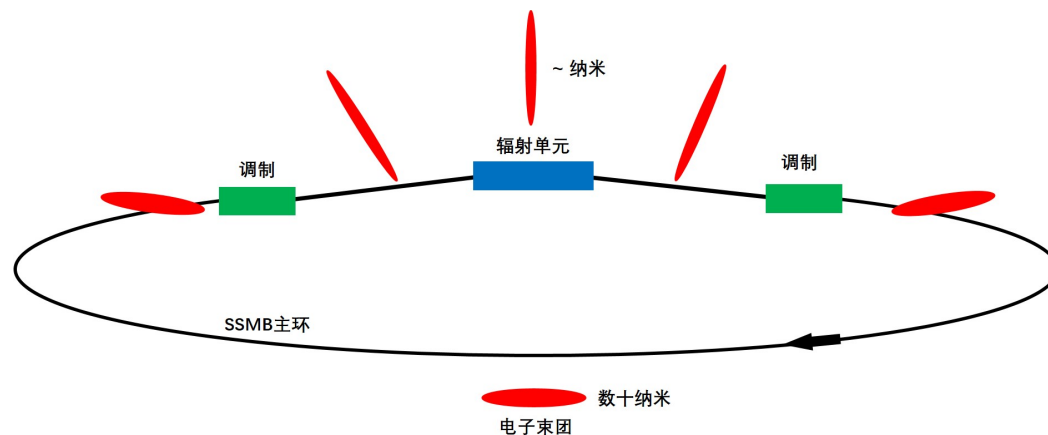
为实现高功率EUV辐射，清华SSMB团队研究的三大方案

- **纵向弱聚焦**：在MW调制激光功率及 $1e-6$ 的动量压缩因子情况下，可实现数十纳米的束长，无法在13.5 nm波段产生相干辐射
- **纵向强聚焦**：可实现纳米级束长，从而产生13.5 nm的相干光，但所需调制激光功率在百MW量级，导致光腔只能工作在脉冲模式，从而限制输出的EUV光平均功率
- **广义纵向强聚焦**：基于平面型储存环垂直发射度极小的特点，巧妙利用横纵向耦合，可以实现将束长压缩到纳米，且调制激光功率相比纵向强聚焦方案低了一个量级，但非线性动力学优化极富挑战

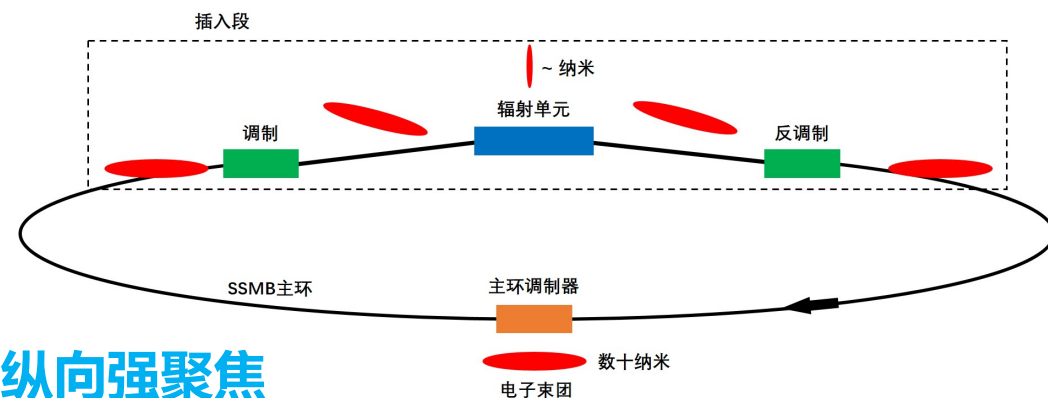
目前的优选方案：广义纵向强聚焦



单粒子动力学
设计**已完成**



单粒子动力学
设计**已完成**

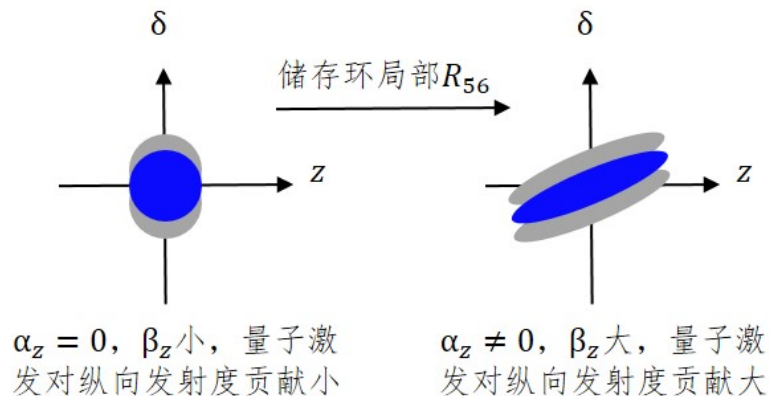


单粒子动力学
设计**进行中**

**三种方案的第一步均是设计一个能稳定存储
束长数十纳米(~ 0.1 fs)微束团的SSMB主环,
涉及全新的加速器物理课题**

纵向弱聚焦-物理分析

- 经典定标律 $\sigma_z \propto \sqrt{|\eta|/V_{RF}}$ 在滑相因子 η 趋于0时失效，需要考虑局部滑相因子或局部R56对纵向Courant-Snyder参数从而对纵向发射度的影响



- 储存环lattice给定后, 存在一个束长极限, 当将束长推到该极限时, 束团能散会显著增加

- 解决方案: 同时降低全局及局部滑相因子, 也即使储存环的每一个局部都尽可能接近是等时的(isochronous), 从而使环中每块二极铁处的 β_z 都尽可能小

$$\epsilon_z = \frac{55}{96\sqrt{3}} \frac{\alpha_F \lambda_e^2 \gamma^5}{\alpha_L} \oint \frac{\beta_z(s)}{|\rho(s)|^3} ds$$

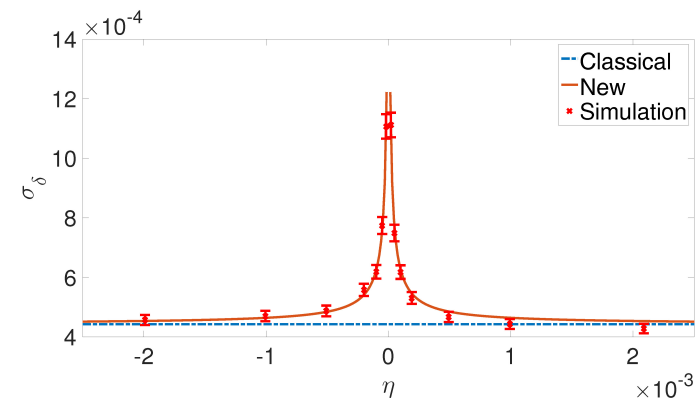
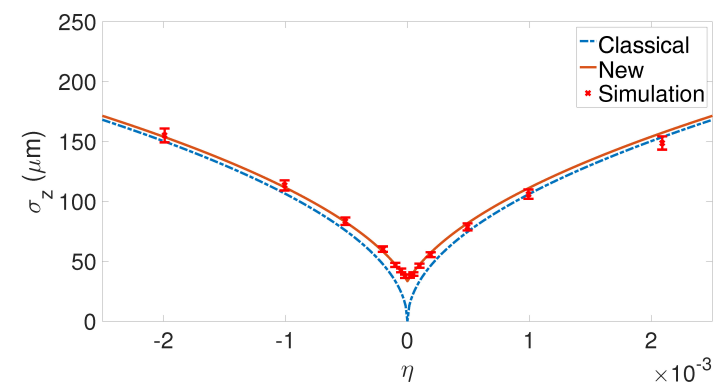
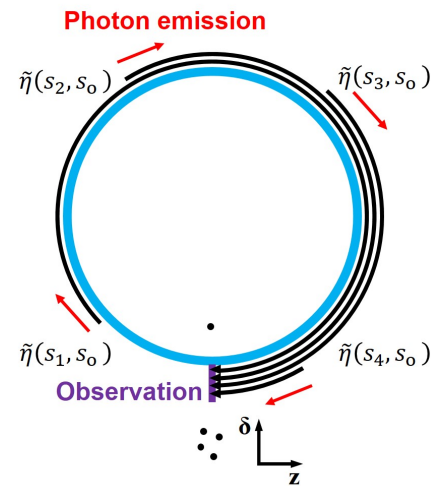
$$\tilde{\eta}(s_j, s_o) = \frac{1}{C_0} \int_{s_j}^{s_o} \left(\frac{D_x(s)}{\rho(s)} - \frac{1}{\gamma^2} \right) ds$$

$$\beta_z(s_j) = \frac{-\eta C_0 + \tilde{\eta}(s_{rf+}, s_j) \tilde{\eta}(s_j, s_{rf-}) h C_0^2}{\sin \Phi_z}$$

$$\epsilon_z = \epsilon_{zS} \left(1 + h C_0 \frac{\langle \tilde{\eta}^2(s_{rf+}, s_j) \rangle + \eta \langle \tilde{\eta}(s_{rf+}, s_j) \rangle}{\eta} \right)$$

$$\sigma_{z,limit} = \sigma_{\delta S} \sqrt{\langle \tilde{\eta}^2(s_{rf+}, s_j) \rangle C_0}$$

经典的分析忽略了 β_z 沿全环的变化



Shoji, Y., et al. *Phys. Rev. E* 54.4 (1996), R4556.

Deng, X. J., et al. *Phys. Rev. Accel. Beams* 24.9 (2021): 094001.

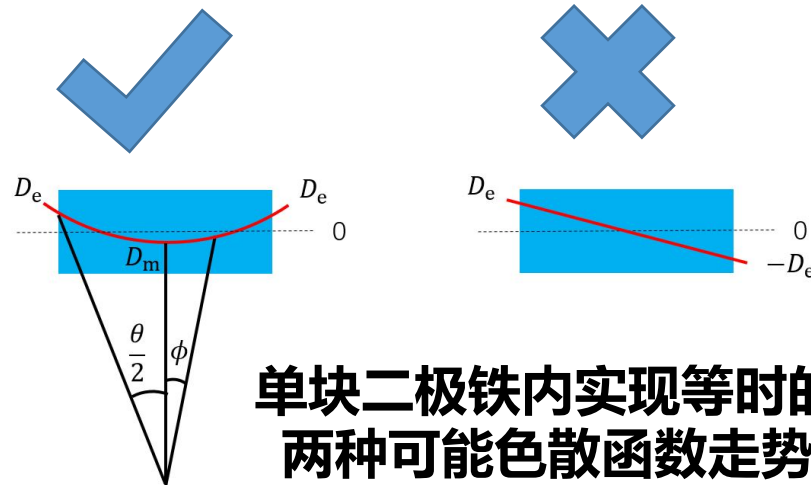
Deng, X. J. 2021 Ph. D. Dissertation (Beijing: Tsinghua University).

纵向弱聚焦-lattice实现

束长及纵向发射度的理论极限值

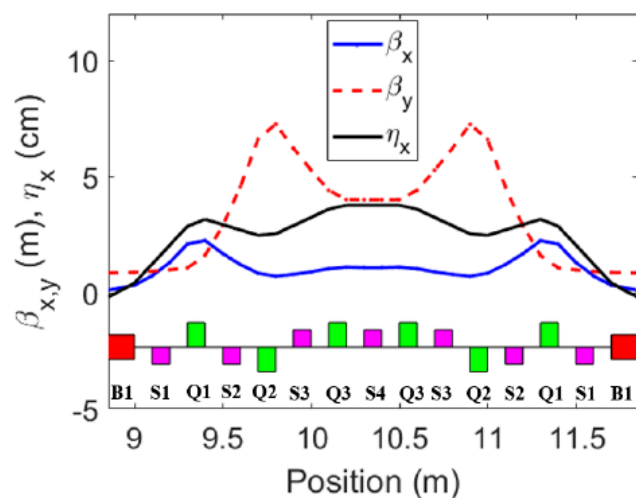
$$\sigma_{z,\min} \approx \frac{\sqrt{2415}}{20160} \sqrt{\frac{C_q}{J_s}} \sqrt{\rho} \gamma \theta^3 \propto \sqrt{\rho} \gamma \theta^3,$$

$$\epsilon_{z,\min} \approx 2 \frac{\sqrt{2415}}{20160} \frac{C_q}{J_s} \gamma^2 \theta^3 \propto \gamma^2 \theta^3,$$

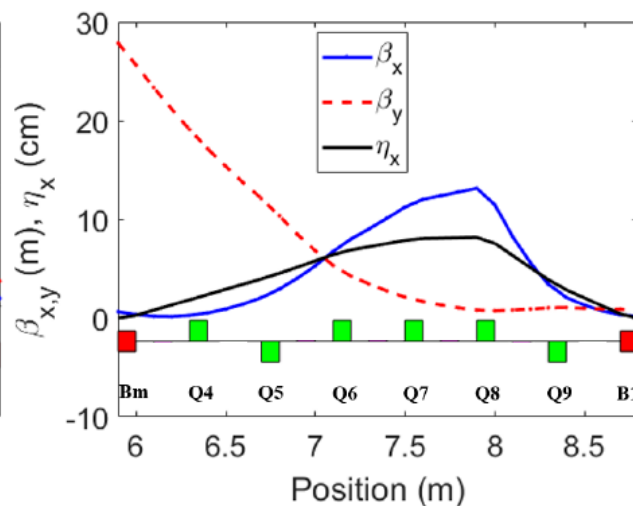


SSMB主环采用该设计，可以实现数十纳米的稳态束长

Lattice实现



(a) 主单元磁铁构成及光学函数



(b) 匹配单元磁铁构成及光学函数

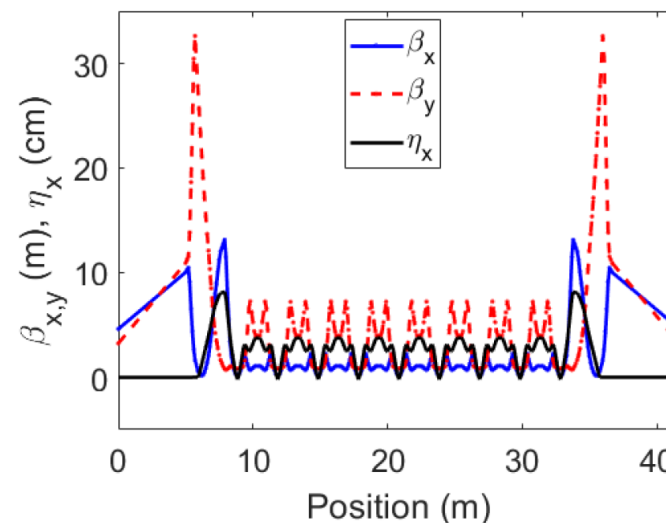


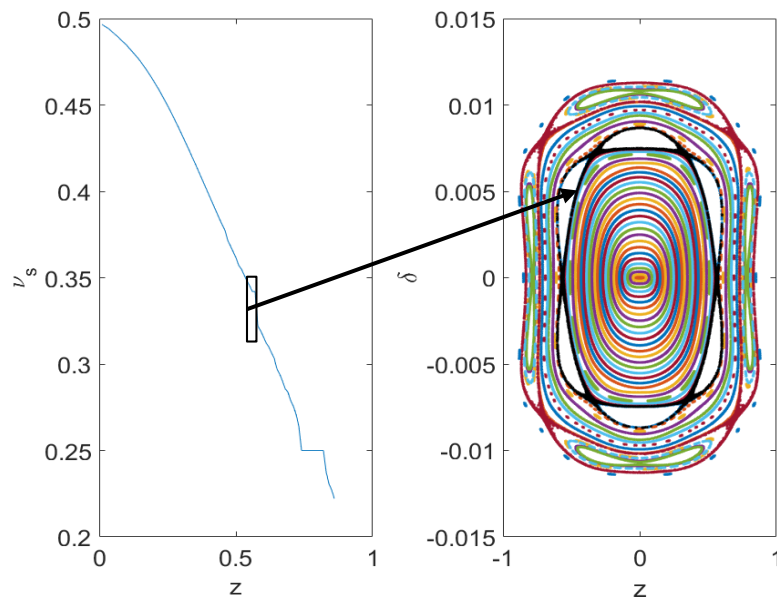
图 5.9 每个对称偏转结构的光学函数。

纵向强聚焦

- 为了实现束长的进一步压缩, 可应用纵向强聚焦原理实现对 β_z 的强有力的操控

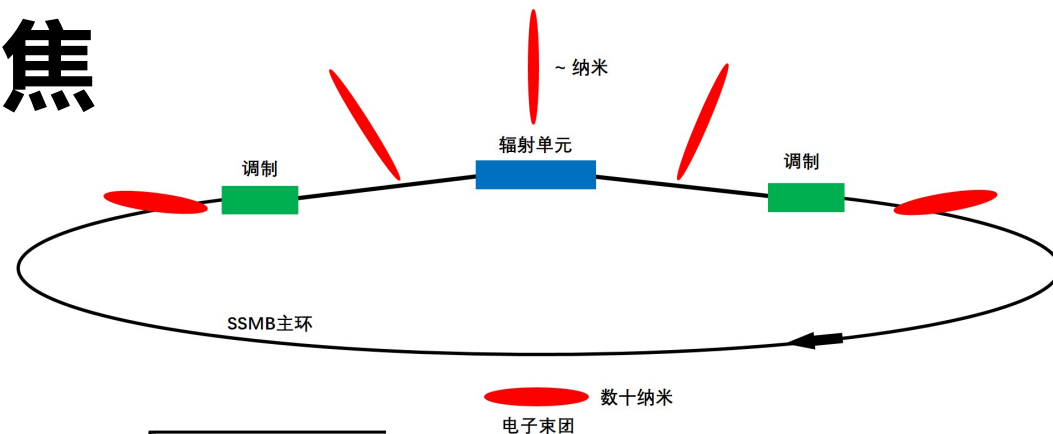
R56: 纵向漂移节, RF: 纵向四级铁 (线性近似)

- 优化线性设计, 降低纵向发射度以及束长。考虑sine调制波形的非线性, 线性参数选择会影响非线性动力学的表现, 从而反过来影响线性设计

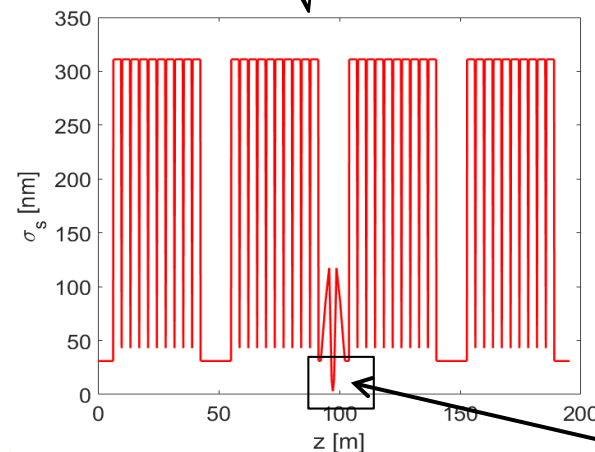


强混沌动力系统

激光功率:
300 MW

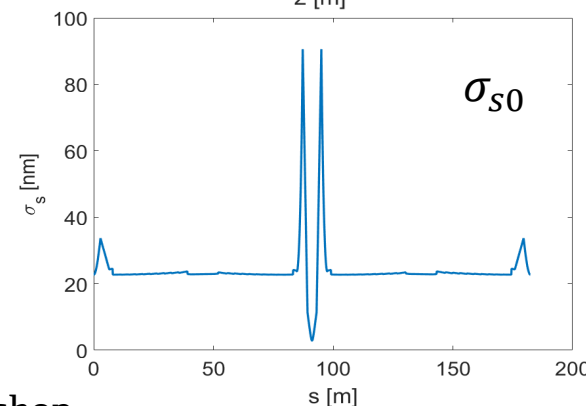


$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_{s0}^2 + \mathcal{H}_x \epsilon_x}$$



已有单粒子动力学自治的物理方案设计, 但所需调制激光功率在百MW量级, 光腔只能工作在脉冲模式

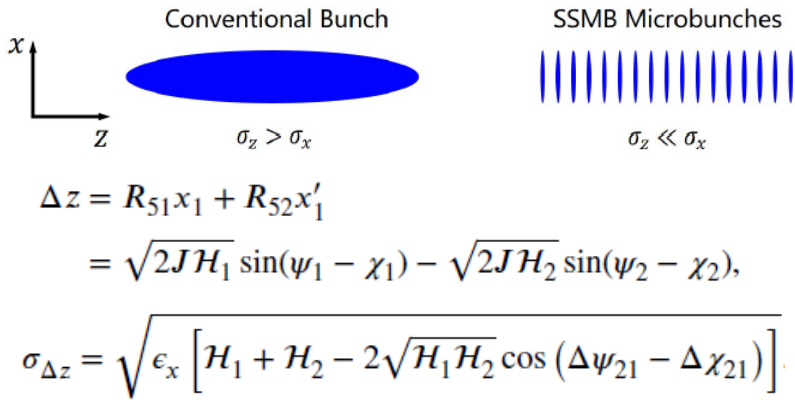
2.9 nm



Refer to ZHANG Yao's talk

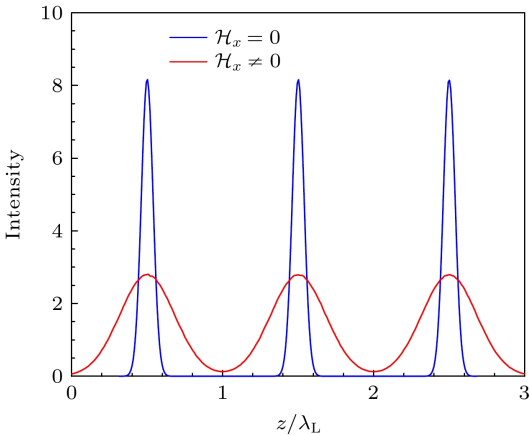
广义纵向强聚焦

- 横纵向耦合导致束团的被动拉伸：
本质是由二极铁的偏转引起



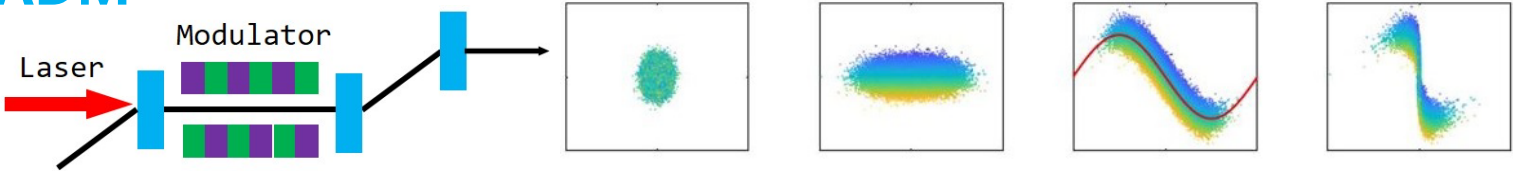
SSMB流强在有/无色散处的分布

利于
抑制
CSR



- 主动用于束团压缩：基于平面型储存环垂直横向发射度极小的特点，并巧妙利用横纵向耦合，可以在较低的调制激光功率下实现对束团的长度的压缩。我们把这种对束团实现逐圈压缩的方式或原理称为**广义纵向强聚焦**

ADM



$$h^2(\text{Mod})\mathcal{H}_y(\text{Mod})\mathcal{H}_y(\text{Rad}) \geq 1 \quad P_L \propto \frac{h^2 \gamma^2}{N_u} \lambda_L^2 \propto \frac{\gamma^2 \lambda_L^2}{N_u \mathcal{H}_y(\text{Mod})\mathcal{H}_y(\text{Rad})} \propto \frac{\gamma B_0^3 \lambda_u \lambda_L^2}{\sigma_z^2(\text{Rad}) \Delta\epsilon_y(\text{Mod, QE})} \epsilon_y$$

Parameter	Value	Description
E_0	400 MeV	Beam energy
ρ_{ring}	2 m	Bending radius of dipoles in the ring
λ_L	1064 nm	Modulation laser wavelength
ϵ_y	4 pm	Vertical emittance
$\sigma_{zy}(\text{Mod})$	505 nm	Bunch lengthening from ϵ_y
$\sigma_z(\text{Rad})$	2 nm	Linear bunch length at the radiator
λ_R	13.5 nm	Radiation wavelength
b_{79}	0.07	13.5 nm bunching factor at radiator (with Bessel suppression)
h	$h = \frac{\epsilon_y}{\sigma_{zy}(\text{Mod})\sigma_z(\text{Rad})} = 3956 \text{ m}^{-1}$	Energy chirp strength
λ_u	30 cm	λ_u of modulator undulator
K_u	2.6	K of modulator undulator
B_0	0.092 T	Peak magnetic field of modulator
N_u	10	N_u of modulator undulator
L_u	3 m	Modulator length
Z_R	1 m	Rayleigh length
P_L	7.9 MW	Modulation laser power

已完成线性设计，调制激光功率相比纵向强聚焦方案降低了一个量级。非线性动力学的优化正在进行中

Refer to LI
Zizheng's
talk

其他关键物理问题

- 非线性动力学

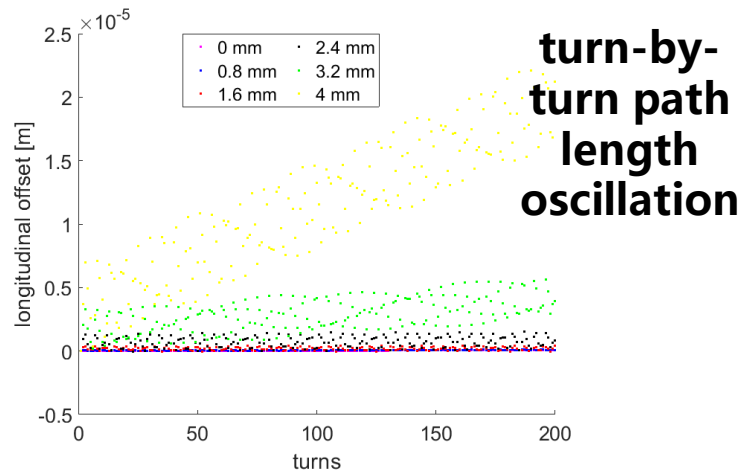
- 通常的动力学孔径优化重点关注横向，现在需要关注六维相空间，优化难度提高。例如高阶横纵向耦合导致的path length oscillation很容易超过调制激光波长，对动力学孔径有显著影响

- 集体效应

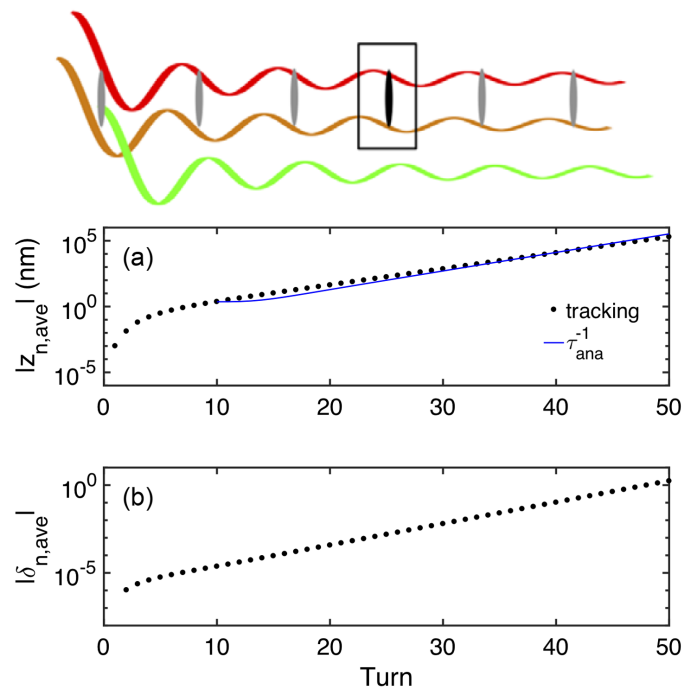
- IBS: 横纵耦合lattice, 需要用SLIM or beam envelope method来研究。目前SSMB-EUV光源优选方案（广义纵向强聚焦）基于极小的垂直发射度，IBS效应的研究和优化极为关键
- 相干同步辐射：在SSMB语境下变为长程，可以引起单束团和多束团不稳定向—single-pass multi-bunch (longitudinal BBU), single-bunch multi-turn(similar but not identical to FEL instability)
- 阻抗壁尾场：微束团间距很小，经典公式不再适用，需更细致研究

- 各类噪声及误差的影响：

- 激光噪声：低频噪声导致束团质心漂移，需要满足绝热条件，使束团的发射度保持不变；高频噪声引起束团的扩散，需要保证其引起的发射度增长在可接受的范围



radiation-electron interaction in optical cavity



SSMB关键技术挑战

- **激光调制器**：为了实现SSMB，需要调制激光功率高、相位锁定；而为了实现高的束流占空比，从而提升SSMB辐射光的平均功率，需要采用连续波或高占空比的调制激光。SSMB的激光调制系统拟采用光学增益腔
- **长脉冲注入系统**：为了实现高的辐射功率，SSMB的平均流强较高，约为1 A。大电荷量、长脉冲(百纳秒量级)注入束流的实现需要专门的设计。为了减少SSMB出光过程中的功率变化，希望SSMB能工作在流强基本恒定不变的top-up模式。同时，top-up 工作模式也可降低对单次注入束流强度的要求
- **直线感应加速腔**：为了提高SSMB储存环的束流占空比，除了需要采用连续激光，对长脉冲电子束的能量补充也提出了不同于传统储存环的要求。MHz重频的直线感应加速器是实现SSMB束流能量补充的可行选择之一
- 此外，高精度磁铁、高精度控制系统等也需要在现有的同步辐射光源的基础上进一步发展

目录

- SSMB光源原理简介
- SSMB原理验证实验
- SSMB核心物理及关键技术挑战
- 清华SSMB-EUV光源

清华SSMB-EUV光源

• 总体方案示意及设计参数

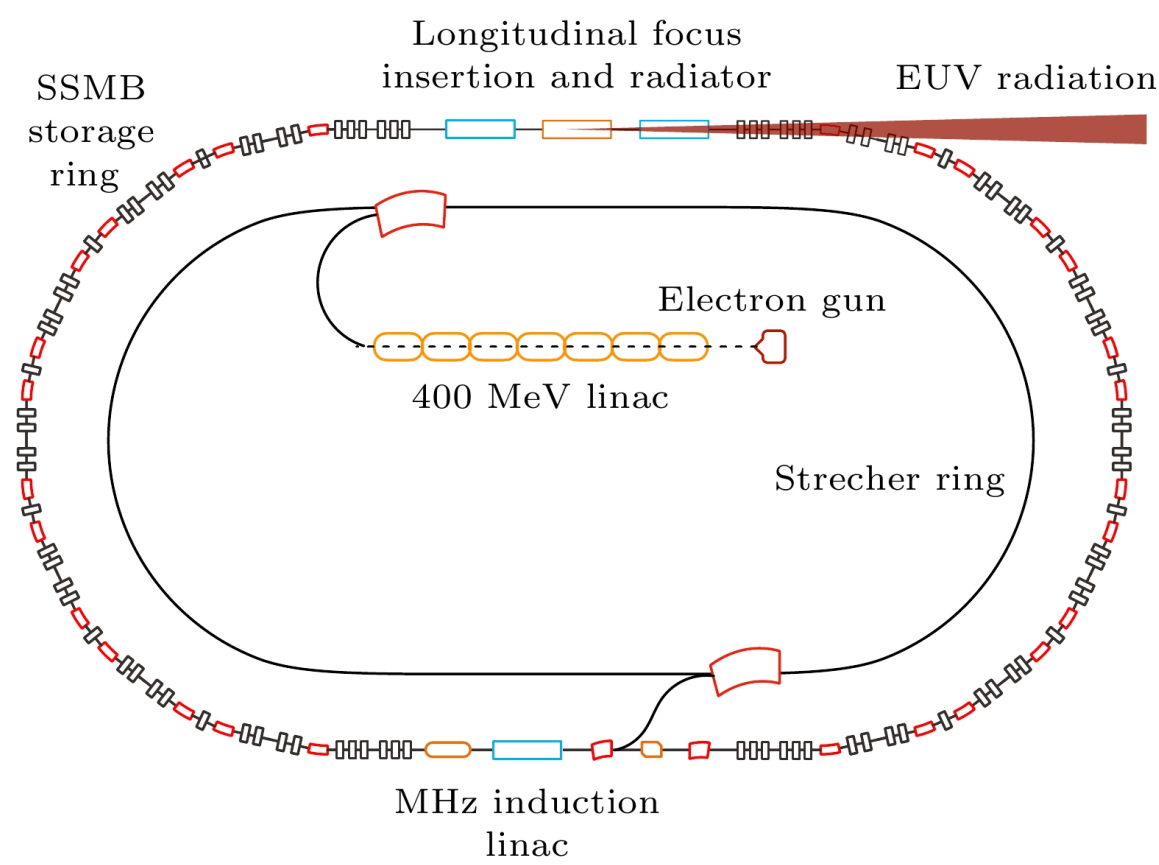


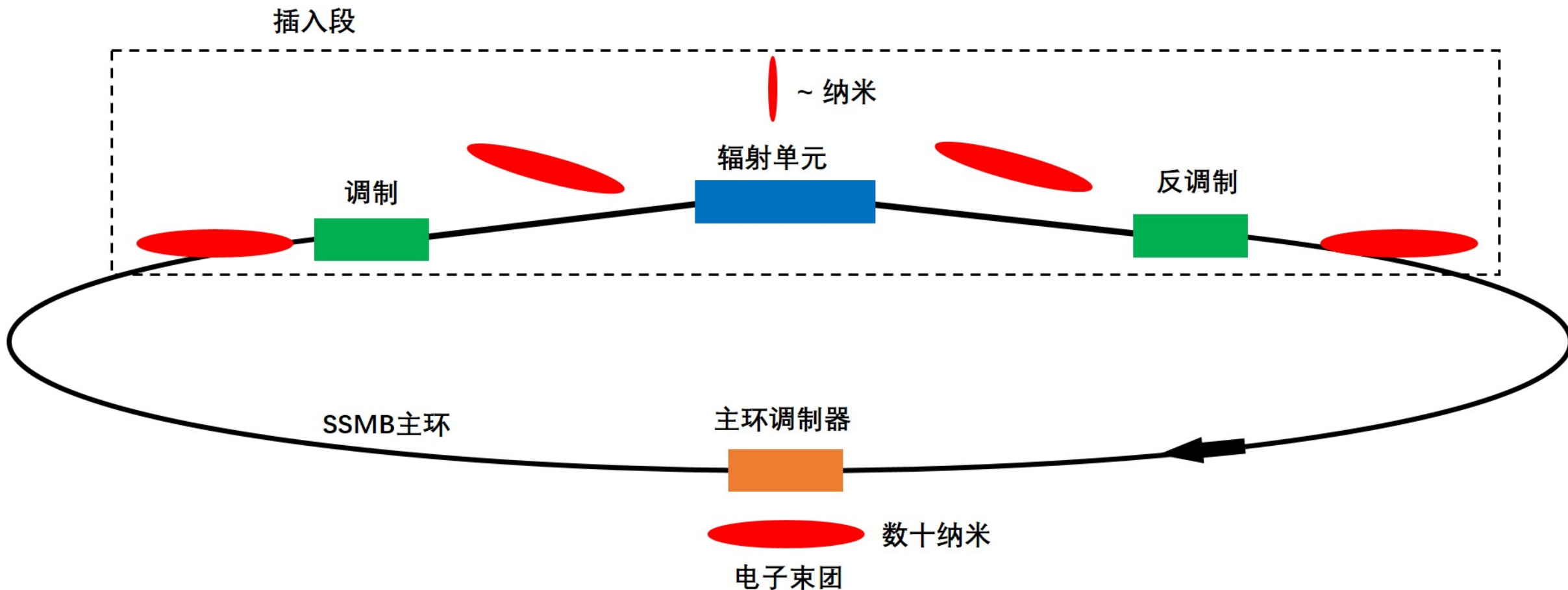
表 1 清华 SSMB-EUV 光源总体设计参数

Table 1. The design parameters of Tsinghua SSMB-EUV light source.

技术参数	单位	设计指标
储存环周长	m	100—150
电子束能量	MeV	≥ 400
束流强度	A	≥ 1
辐射波长	nm	5—100
13.5 nm EUV功率 (2%带宽内)	kW	≥ 1
13.5 nm EUV峰值/ 平均亮度	phs/s/mm ² /mrad ² / 0.1%b.w.	$> 10^{23}$

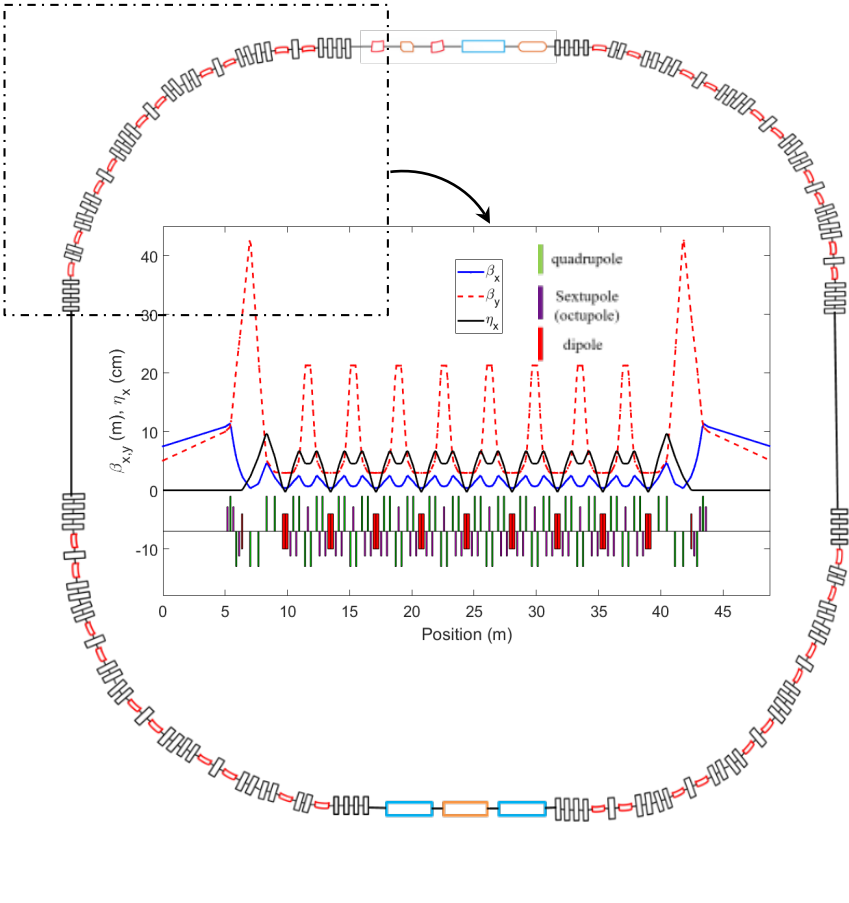
目前的优选方案—广义纵向强聚焦

- 插入段三大功能：
 - 束团压缩—为了产生13.5 nm相干辐射
 - 调制相消—为了消除sine调制的非线性
 - 去横纵耦合—为了保障超低的垂直发射度



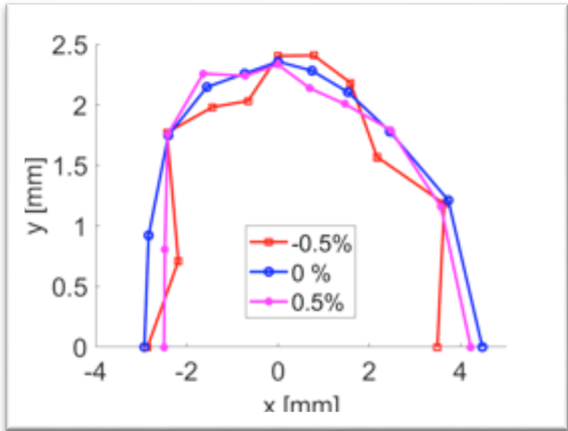
SSMB主环—lattice设计

- 在环中实现数十纳米的稳态束长

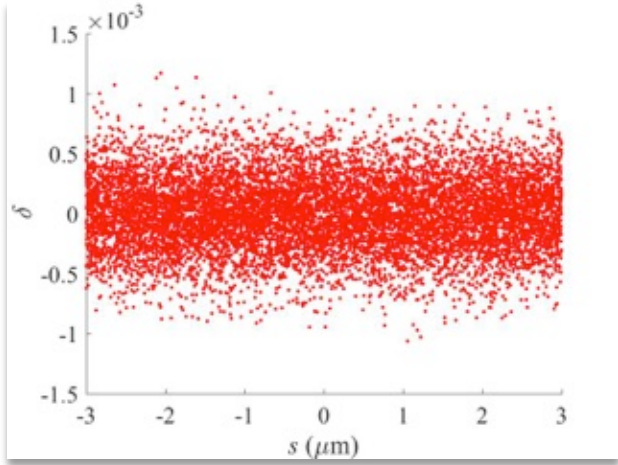


磁聚焦结构优化设计结果

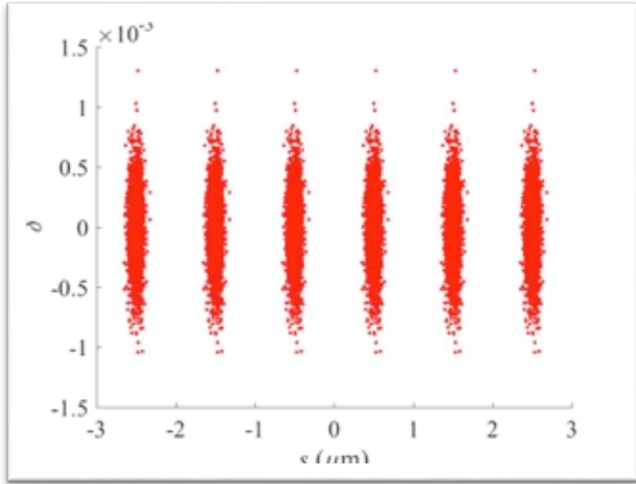
Parameters	Value
Circumference[m]	166.78
Tunes(x/y)	30.677/11.391
Chromaticity(x/y)	0.006/-0.0008
alphac	2.11e-6
alphac2	6.39e-5
alphac3	7.13e-3
partial alpha	3.07e-7
Sdelta0 σ_s	2.52e-4
U0 [keV]	1.23
Natural emittance [pm]	54.4
Hor./Ver damping time [ms]	361.4/362.2
Long. Damping time [ms]	181.3



动力学孔径 (RF Off)



微聚束前



微聚束后

SSMB主环—非线性动力学优化

- 高阶横纵向耦合导致的path length oscillation极易超过调制激光波长(~1 um), 会对DA造成显著影响
- Typically, h20001 will be ~10 for high order achromat scheme
- h22001 and h40001 will also be important in many cases
- 优化方法: 1) Minimize some important terms by COSY & 2) using MOGA (diffusion rate)

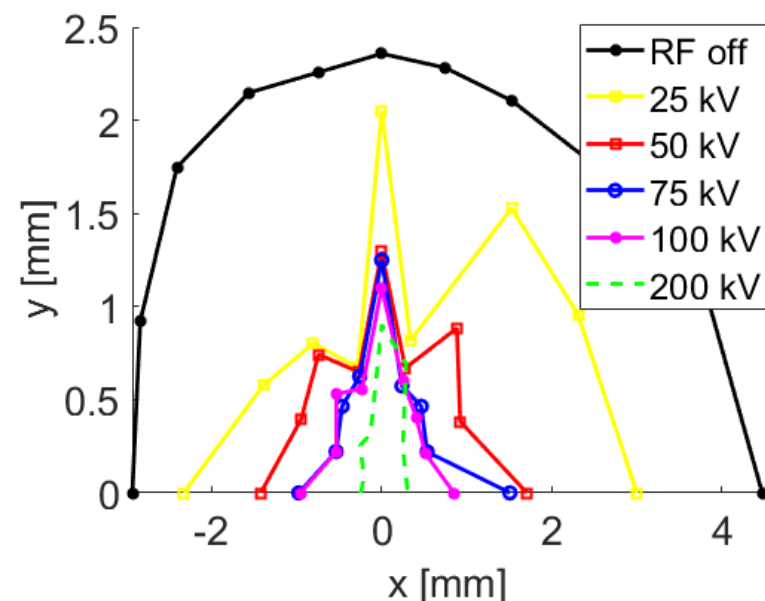
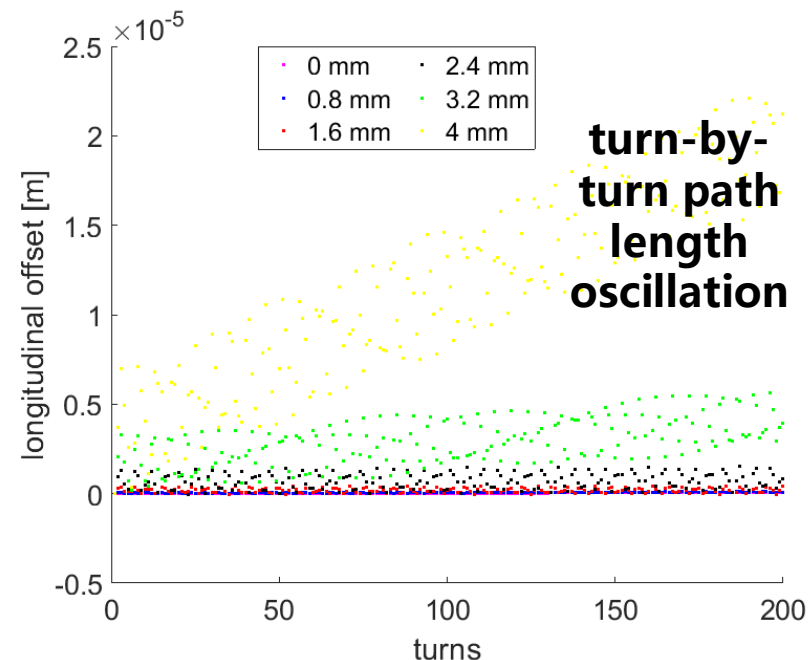
$$H^{(n)} = \sum_{a+b+c+d+e=n} h_{abcde} J_x^{+a} J_x^{-b} J_y^{+c} J_y^{-d} \delta^e \exp(i(a-b)\phi_x) \exp(i(c-d)\phi_y)$$

$$n=3$$

$$dz = \frac{\partial H^{(3)}}{\partial \delta} = 2 * h_{11001} * J_x + 2 * h_{00111} * J_y + 2 * h_{20001} * J_x * \exp(i2\phi_x) + 2 * h_{00201} * J_y * \exp(i2\phi_y).$$

$$n=5$$

$$\begin{aligned} dz = \frac{\partial H^{(5)}}{\partial \delta} = & 4 * h_{22001} * J_x^2 + 4 * h_{00221} * J_y^2 + 4 * h_{40001} * J_x^2 * \exp(i4\phi_x) + 4 * h_{00401} * J_y^2 * \exp(i4\phi_y) \\ & + 4h_{11111} * J_x * J_y + 4 * h_{31001} J_x^2 * \exp(i2\phi_x) + 4 * h_{13001} * J_x^2 * \exp(-i2\phi_x) \\ & + 4 * h_{00311} J_y^2 * \exp(i2\phi_y) + 4 * h_{00131} * J_y^2 * \exp(-i2\phi_y) \\ & + 4 * h_{20201} * J_x * J_y * \exp(-i2(\phi_y + \phi_x)) + 4 * h_{30101} * J_x^{3/2} J_y^{1/2} * \exp(i(3\phi_x + \phi_y)) \\ & + 4 * h_{10301} * J_y^{3/2} J_x^{1/2} * \exp(i(3\phi_y + \phi_x)) + c.c.. \end{aligned}$$



广义纵向强聚焦—插入段lattice设计

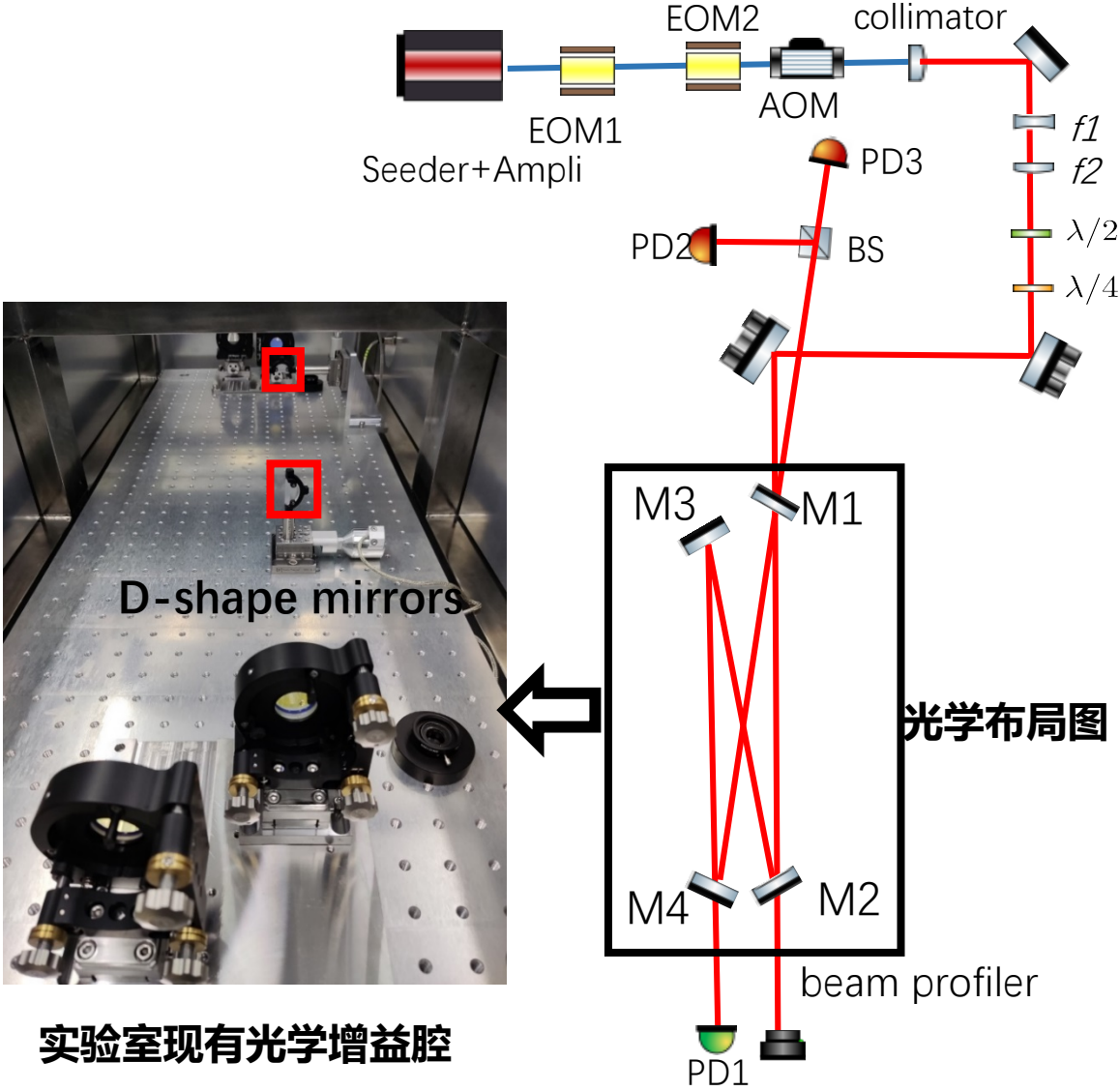
Refer to LI Zizheng' s talk

光腔系统—光腔样机研制

—— 进行高功率光学增益腔样机研制

- 已研制了光学增益腔原理样机
- 目前光腔内储存功率~30kW
- 完成高功率光腔洁净间设计

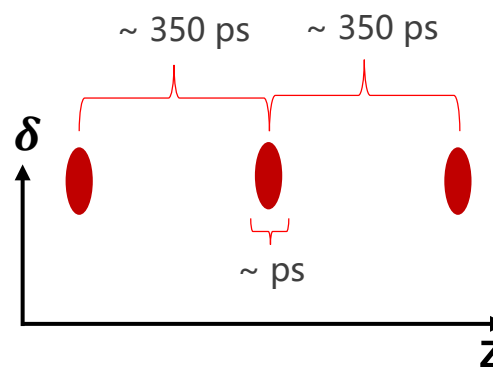
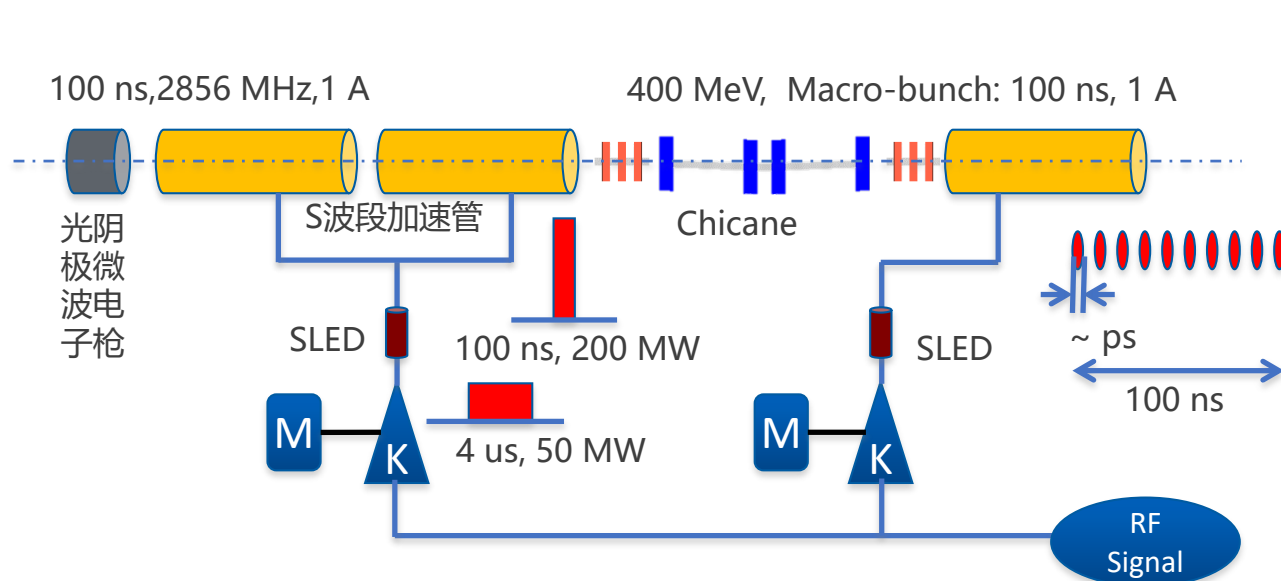
参数	样机指标
激光波长	1064 nm
光腔结构	四镜型
回路长度	3.78 m
工作模式	连续
腔内平均功率	~30kW
增益	1500



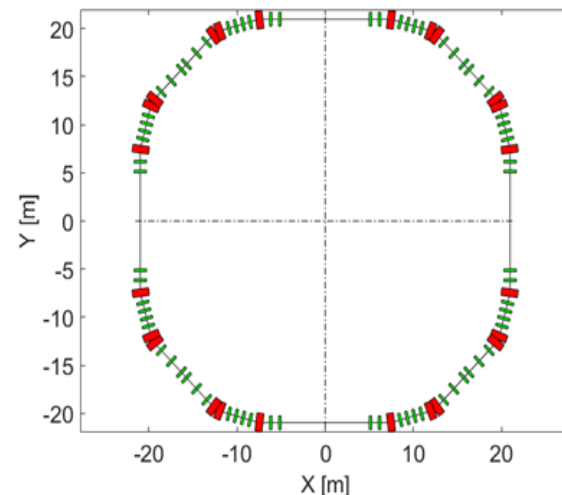
注入系统

验证性装置已在搭建

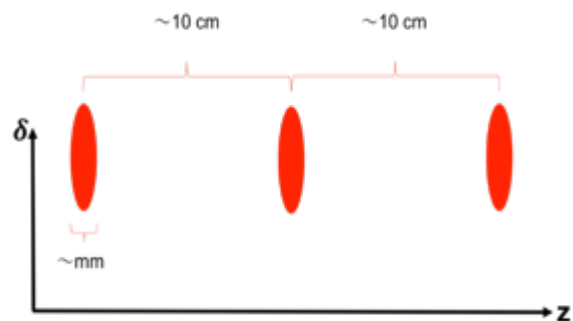
——光阴极电子枪+直线加速器+展束环，创新性的注入结构，实现高平均流强连续束注入



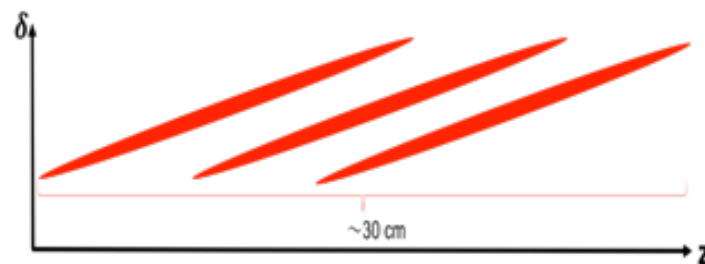
直线注入器出口处
电子脉冲结构示意图



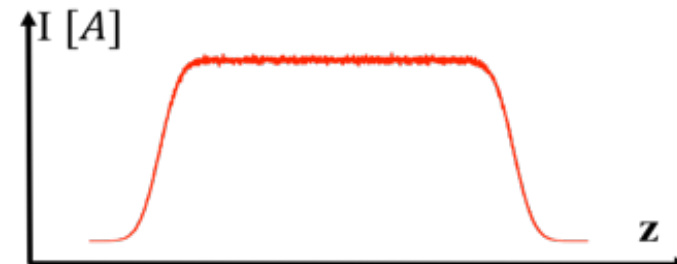
展束环磁聚焦结构



展束环入口纵向相空间



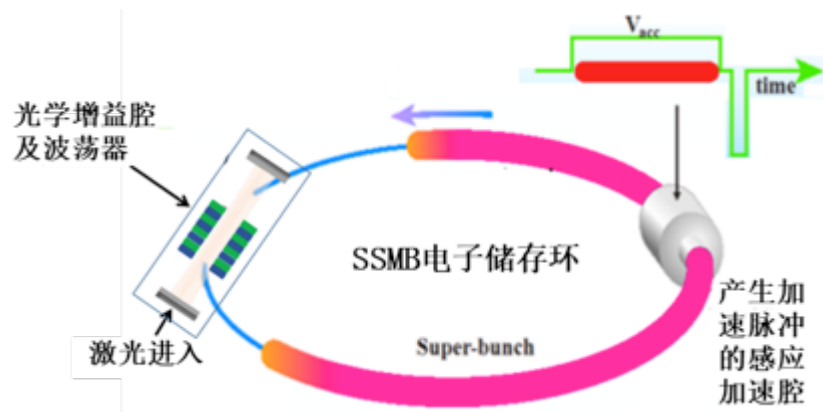
展束环出口纵向相空间



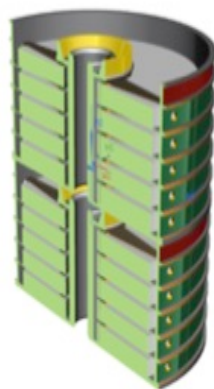
展束环出口流强分布

能量补充单元—直线感应加速腔

——补充电子束在储存环中的辐射能量损失



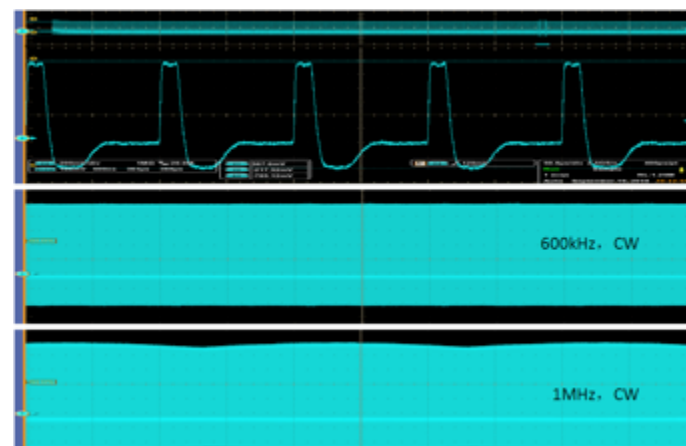
- 串联两个MOSFET全桥电路+感应腔的电路结构，实现1 MHz、1 kV的百纳秒加速电压
- 宏脉冲在轨道中的占空比可达到50%以上，大幅提高平均束流强度



感应腔样机



高重频实验布局



高重频时脉冲波形

总结

- SSMB是一种可以产生高平均功率、窄带宽相干辐射的新型加速器光源原理，有着巨大的科学及产业应用前景
- 清华大学组建了专门的SSMB光源研究团队，在SSMB原理验证实验、SSMB的束流动力学、SSMB-EUV光源物理设计以及关键技术研发方面均取得重要进展
- 下一步：
 - 开展SSMB原理验证实验Phase II，实现Quasi-SSMB
 - 继续深入开展SSMB-EUV光源物理设计，优化广义纵向强聚焦方案的非线性动力学，实现足够的六维动力学孔径及EUV辐射功率
 - 继续开展SSMB关键技术的研究，提升光腔储存的平均功率，开展注入系统实验研究，进一步提高感应直线加速腔的重频和加速电压
 - 积极申报科技部2022年“大科学装置前沿研究”重点专项

报告部分内容来自最新发表的SSMB综述

文章——“稳态微聚束加速器光源”

Tang C.-X.*, Deng X.-J., *Acta Phys. Sin.*, 2022, 71(15): 152901.

SSMB相关文献

➤ SSMB Scenarios:

- D. F. Ratner and A. W. Chao, Steady-State Microbunching in a Storage Ring for Generating Coherent Radiation, *Phys. Rev. Lett.* 105, 154801 (2010).
- A. Chao, et al., High Power Radiation Sources using the Steady-state Microbunching Mechanism, in Proceedings of IPAC16, Busan, Korea, 2016.

➤ SSMB Collaboration:

- C. Tang, et al., An Overview of the Progress on SSMB, in Proceedings of FLS18, Shanghai, China, 2018.

➤ SSMB proof-of-principle experiment:

- X. Deng, et al., Experimental Demonstration of the Mechanism of Steady-state Microbunching, *Nature* 590, 576–579 (2021).

➤ Lattice design for EUV SSMB ring:

- Z. Pan, et al., A Storage Ring Design for Steady-state Microbunching to Generate Coherent EUV Light Source, in Proceedings of FEL19, Hamburg, Germany, 2019.

➤ SSMB radiation:

- Deng, X. J., et al. Average and statistical property of coherent radiation from steady-state microbunching. submitted to *Journal of Synchrotron Radiation* (2022).

➤ SSMB beam physics:

- Deng, X. J., et al., Single-particle dynamics of microbunching. *Phys. Rev. Accel. Beams* 23.4 (2020): 044002.
- Zhang, Y., et al. Ultralow longitudinal emittance storage rings. *Phys. Rev. Accel. Beams* 24.9 (2021): 090701.
- Deng, X. J., et al. Courant-Snyder formalism of longitudinal dynamics. *Phys. Rev. Accel. Beams* 24.9 (2021): 094001.
- Deng, X. J., et al. Harmonic generation and bunch compression based on transverse-longitudinal coupling. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 1019 (2021): 165859.
- Tsai, C-Y., et al. Coherent-radiation-induced longitudinal single-pass beam breakup instability of a steady-state microbunch train in an undulator. *Phys. Rev. Accel. Beams* 24.11 (2021): 114401.
- Tsai, C-Y. Theoretical formulation of multi-turn collective dynamics in a laser cavity modulator with comparison to Robinson and high-gain free-electron laser instability. *Phys. Rev. Accel. Beams* 25.6 (2022): 064401.