

基于SXFEL装置的先进自由电子激光实验

冯超

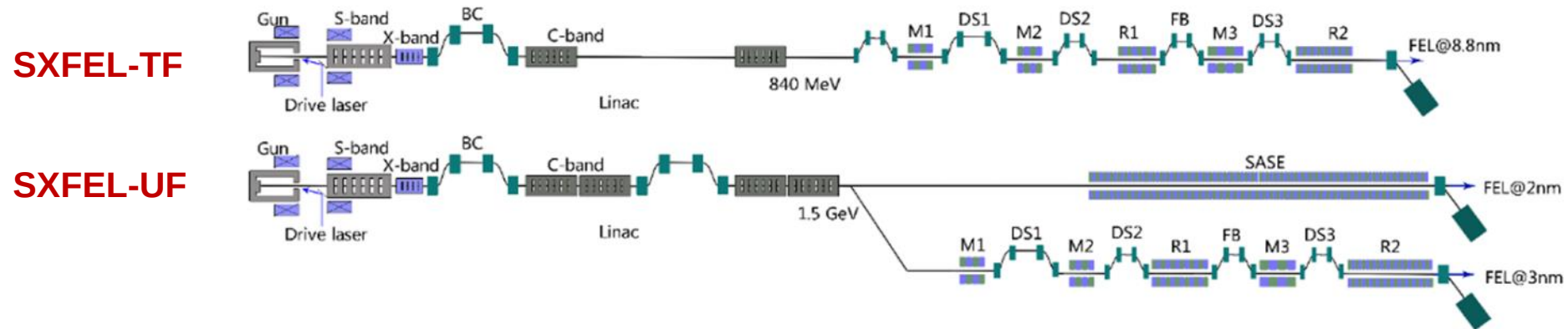
上海高等研究院
高能物理研究所先进光源物理研讨会
2022.8.19-21

内容

- SXFEL简介
- SXFEL已开展的部分先进FEL实验
 - FEL脉冲重构
 - EEHG&EEHC
 - HLSS
- SXFEL未来计划开展的先进FEL实验
- 小结

SXFEL: Shanghai Soft X-ray FEL Facility

- **SXFEL** 位于上海光源北侧由三个项目所组成: SXFEL 试验装置(SXFEL-TF) + SXFEL 用户装置/ SXFEL线站工程 (SXFEL-UF + SBP);
- **SXFEL-TF** 从2014年开始建设, 2016年开始调试和运行, 最高电子束能量~800MeV, 最短波长8.8nm;
- **SXFEL-UF (+SBP)** 将直线加速器升能至1.5 GeV 并将同时支持两条波荡器线和5个线站, 输出波长覆盖“水窗”波段.



Total length	532m
Photon energy	0.2 – 0.6 keV
Pulse length	~100 fs
Repetition rate	10 - 50 Hz
Peak photon power	1 GW
Electron energy	0.8 - 1.5 GeV

SXFEL装置概貌

上海同步辐射光源SSRF

3.5 GeV 第三代同步辐射光源
2009年正式开放，超过15000名用户
13条光束线投入运行
二期在建设中 (2016-2022)

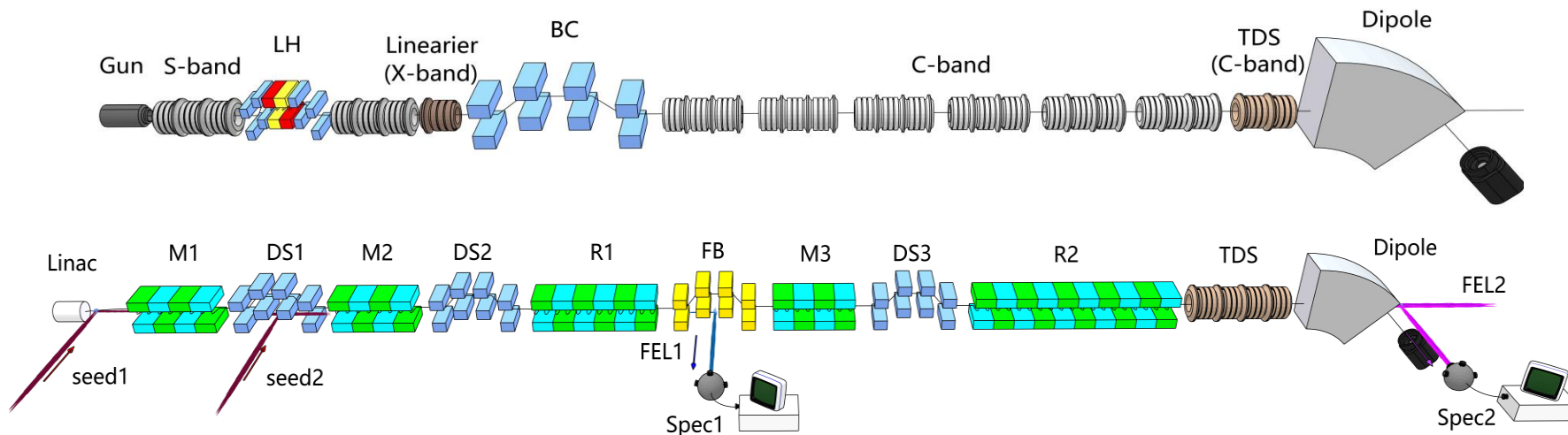
X射线自由电子激光装置

总长532米，包括1台直线加速器，2条波荡器线，5个实验站
1.5 GeV常温加速器 (S+C+X波段)
覆盖水窗波段



SXFEL试验装置

- 项目科学目标：探索两级外种子FEL级联模式，包括两级级联HGHG和EEHG-HGHG级联模式（EEHC）



	Baseline (8.8nm)	
Scheme	HGHG-HGHG	EEHG-HGHG
Harmonics	6 × 5	6 × 5
Beam energy/MeV	790	790
FEL wavelength/nm	8.83	8.83
FEL pulse/fs	100 – 200	100 - 200
FEL power/MW	>100	>100

内容

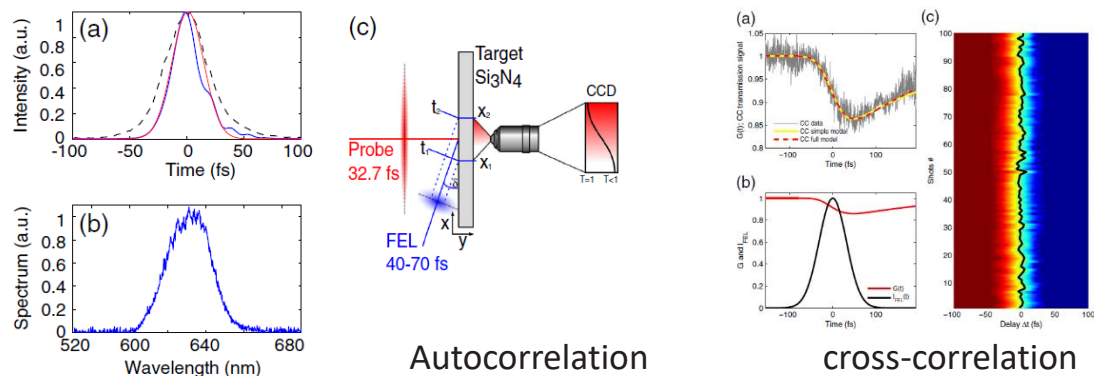
- SXFEL简介
- **SXFEL已开展的部分先进FEL实验**
 - FEL脉冲重构
 - EEHG&EEHC
 - HLSS
- SXFEL未来计划开展的先进FEL实验
- 小结

基于TDS的种子型FEL单脉冲重构

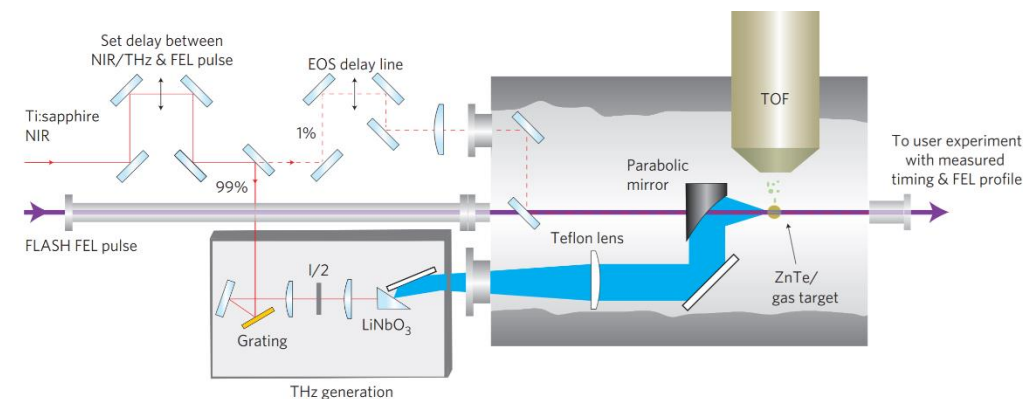
➤ 现有FEL辐射脉冲的测量方法大致有两类：

- FEL脉冲的直接测量

PHYS. REV. X 7, 021043 (2017)

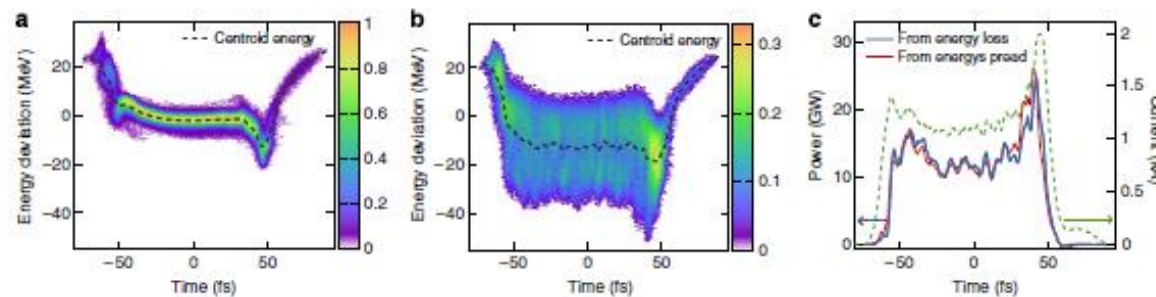
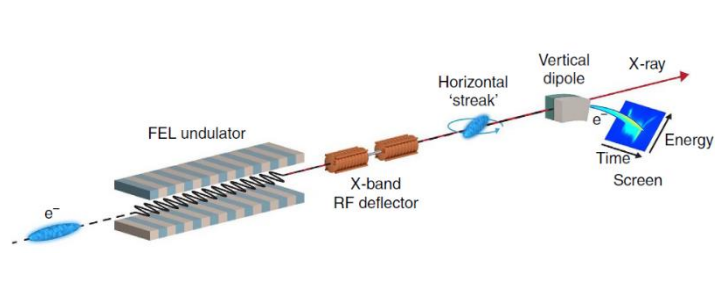


Nat. Photon. 13, 555–561 (2019).



- 基于电子束相空间进行FEL脉冲的重构：

NATURE COMMUNICATIONS 5:3762

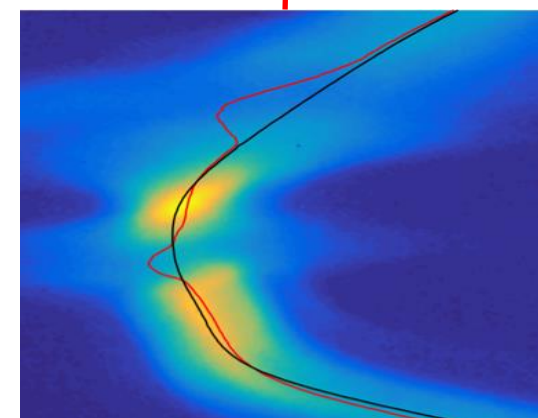
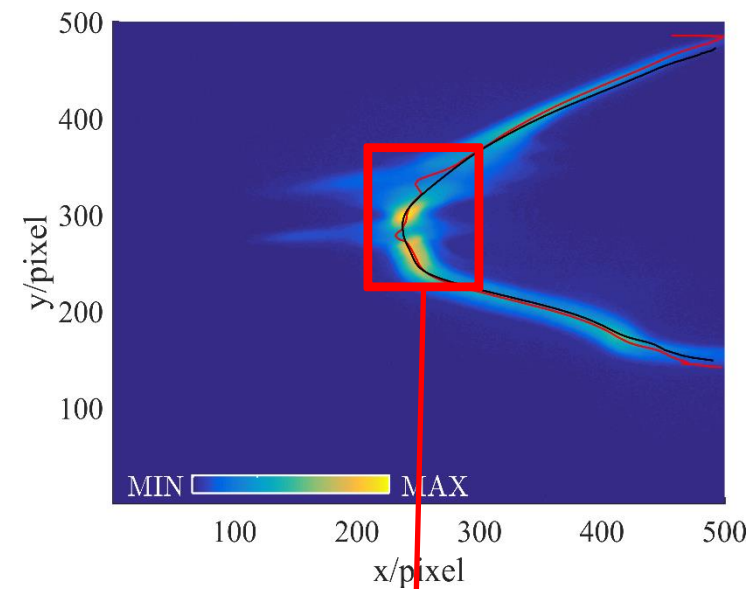
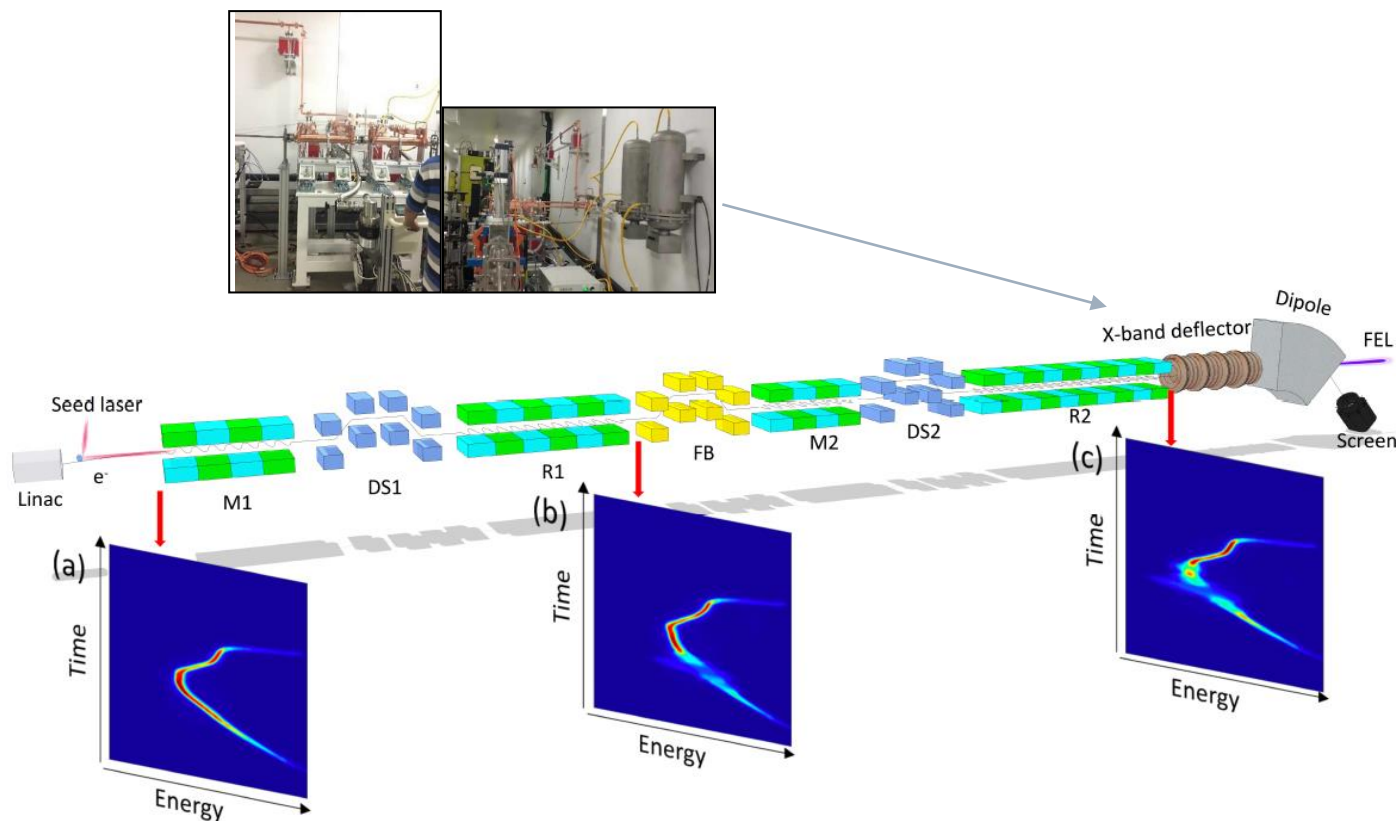


- ✓ 无阻拦
- ✓ 高精度
- ✓ 适用范围广

基于TDS的种子型FEL单脉冲重构

➤ 已有方法的问题主要来自于电子束相空间的抖动:

- 准确度下降
- 拟合耗时

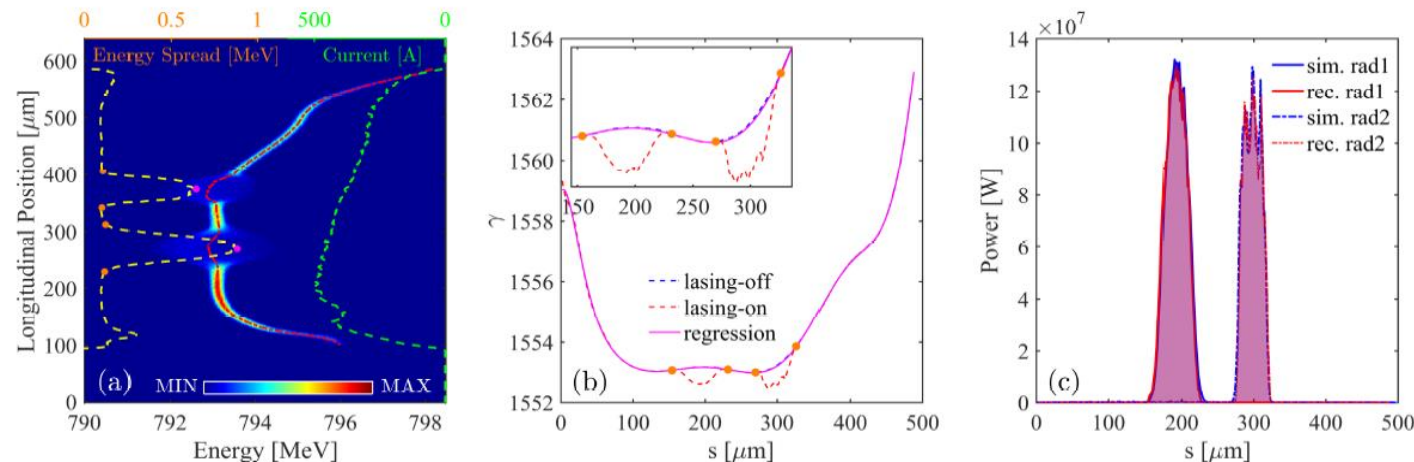


$$E_{on} > E_{off} \quad \text{Power} < 0$$

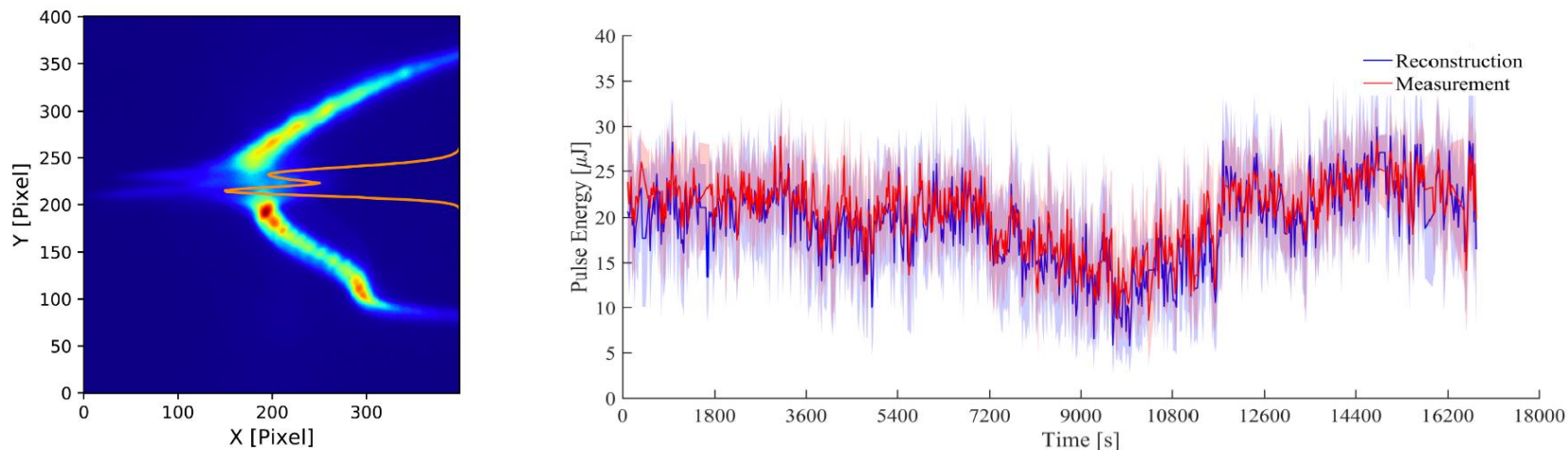
基于TDS的种子型FEL单脉冲重构

- 种子型FEL：仅采用电子束一小部分发光，且发光条件更为理想
- 为实现高精度、高鲁棒性的实时单发脉冲重构提供了新的可能性

模拟演示：



实验验证（第一级HGHG）：



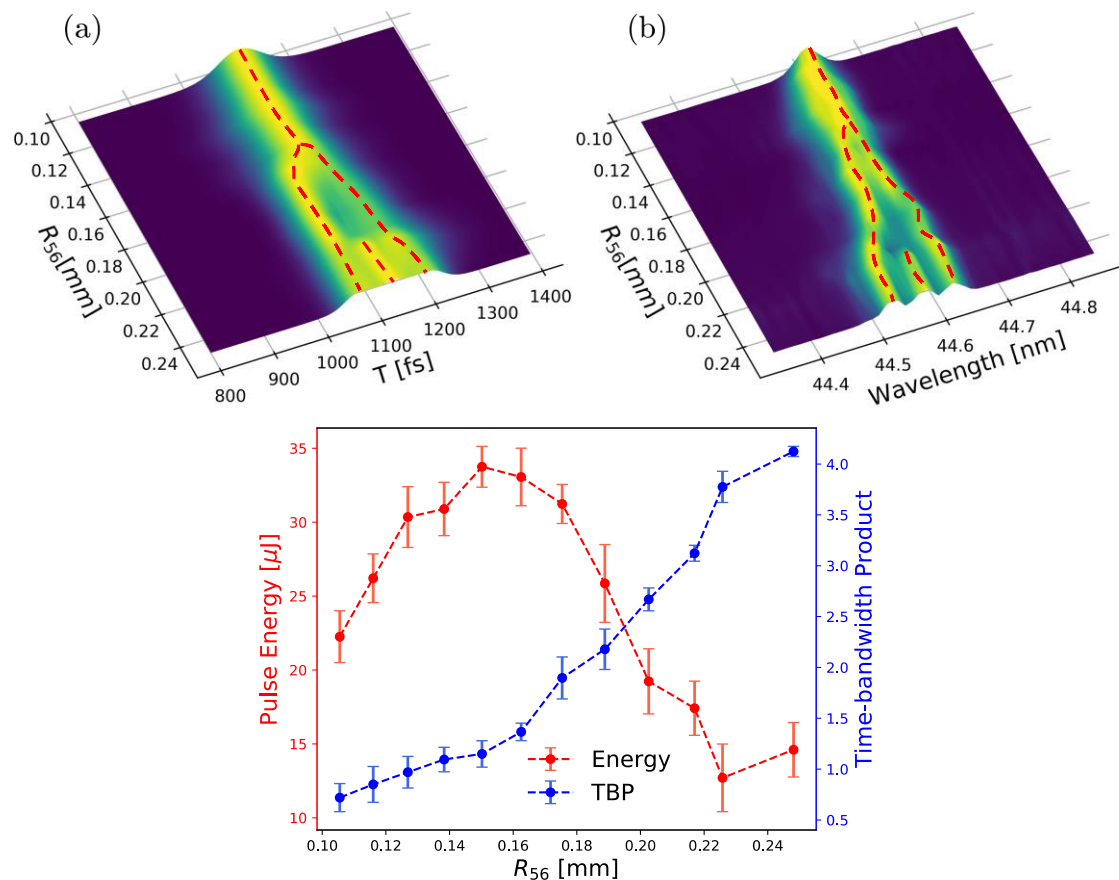
- ✓ 实时单脉冲重构：同时获得两级FEL脉冲形状，脉冲能量，激光-电子束相对时间抖动等
- ✓ 受机器抖动影响小
- ✓ FEL调试辅助：增益测量、进行抖动及各种相关性分析

基于TDS的种子型FEL单脉冲重构

Case1:

FEL参数优化:

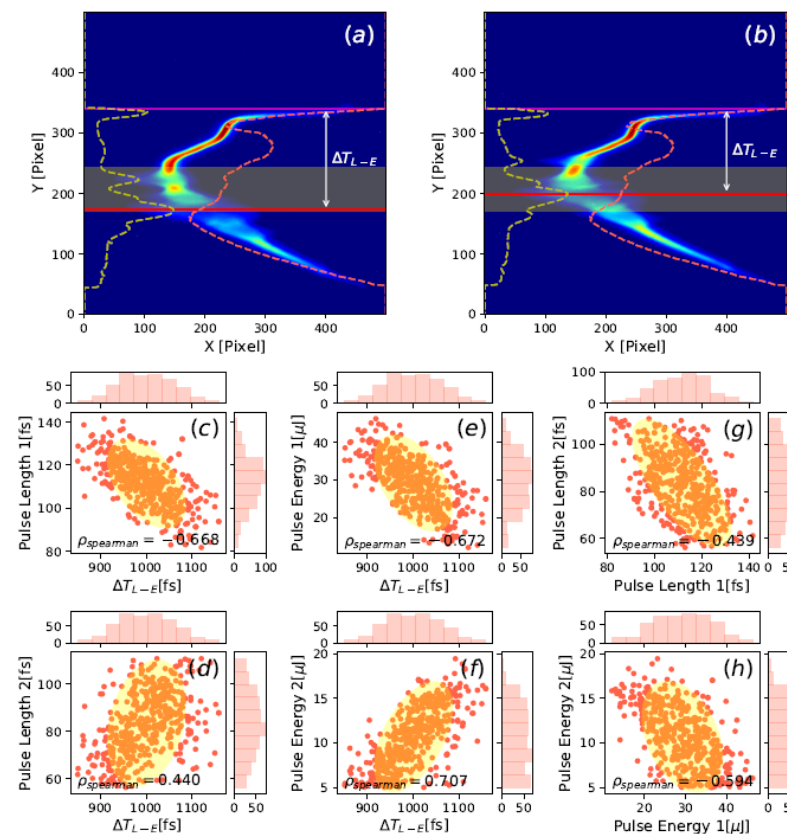
- ✓ 直接观测到FEL脉冲分裂的过程
- ✓ 直接测量FEL的时间相干性 (TBP)



Case2:

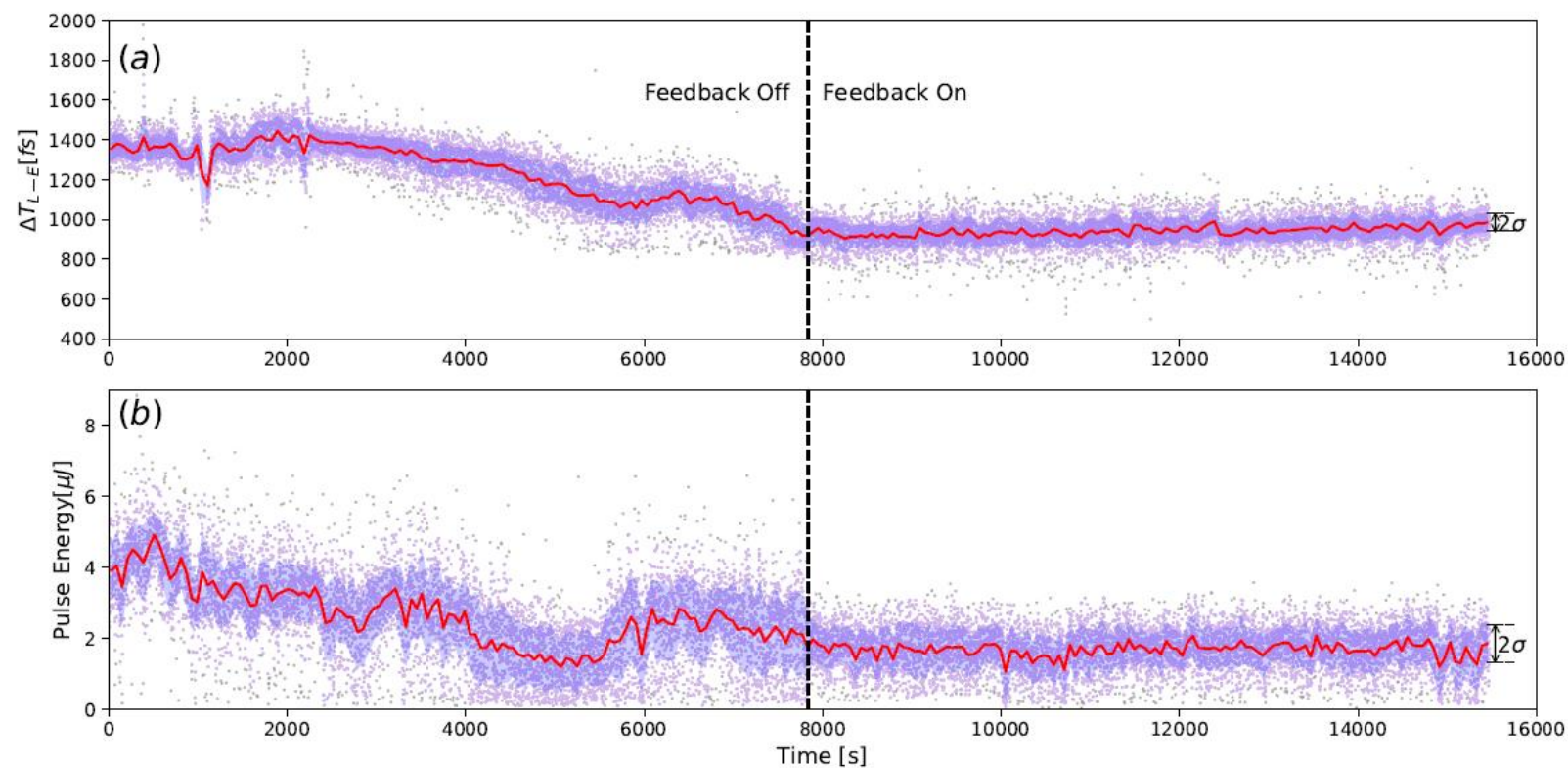
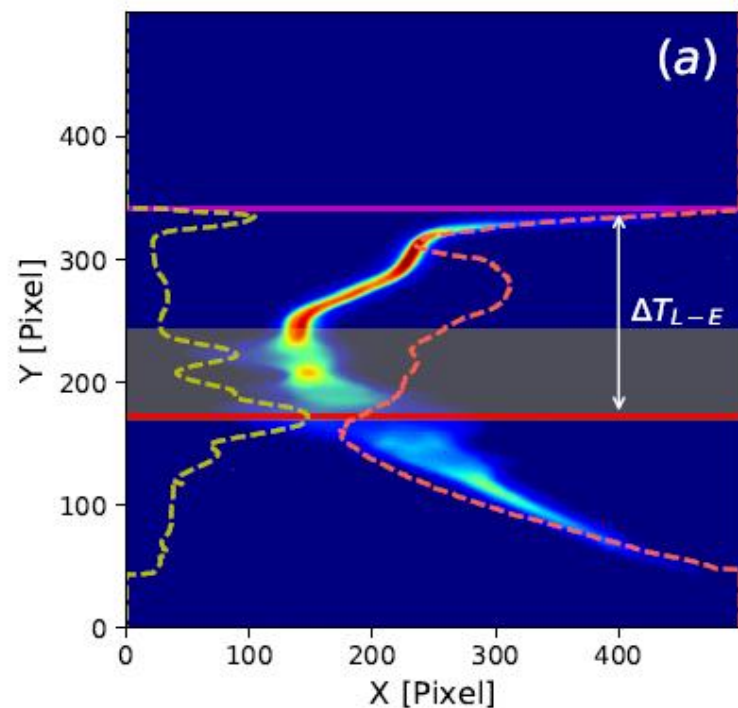
两级辐射相关性分析:

- ✓ 获得两级辐射性能与时间抖动的关系性
- ✓ 获得两级辐射性能的相关性



基于TDS的种子型FEL单脉冲重构

种子激光-电子束到达时间反馈系统:



内容

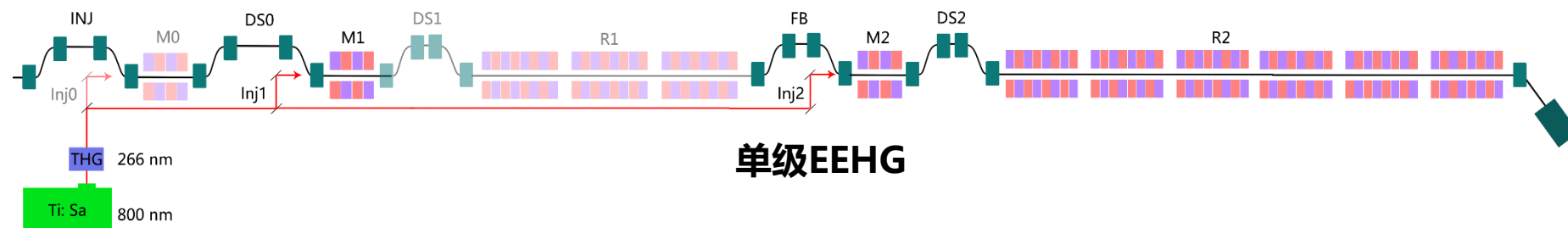
- SXFEL简介
- **SXFEL已开展的部分先进FEL实验**
 - FEL脉冲重构
 - **EEHG&EEHC**
 - HLSS
- SXFEL未来计划开展的先进FEL实验
- 小结

已被国际上FEL装置所采用并验证的全相干FEL机制

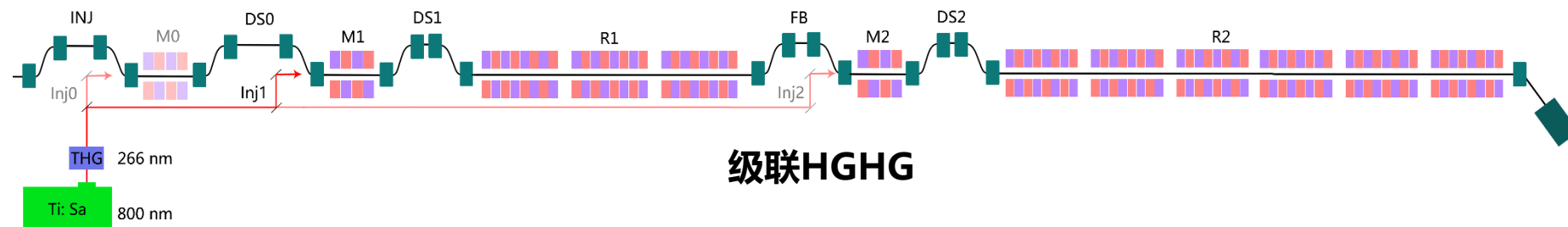
	理论谐波数	出光放大时间	提出单位
HGHG	~10次	2000	BNL, 美国
HGHG级联	60~80次	2013	BNL, 美国
EEHG	~100次	2011	SLAC, 美国
EEHG谐波级联	> 500次	2020	SARI, 中国

基于SXFEL-TF可开展的先进FEL原理实验

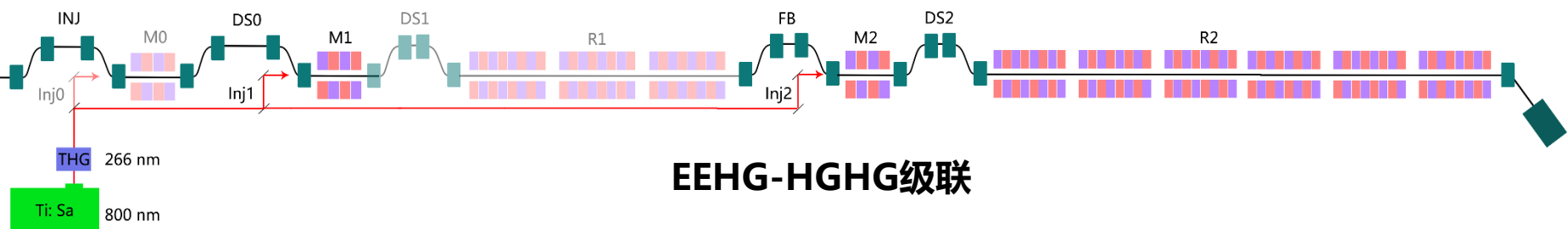
2018



2019

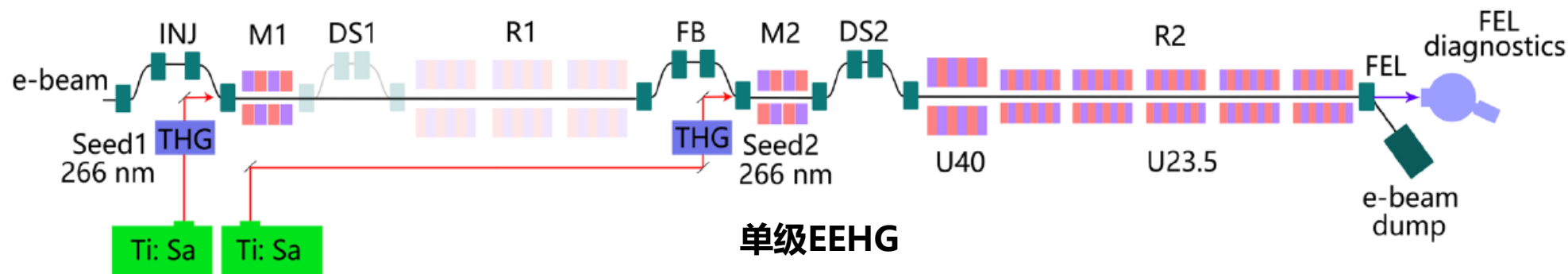


2020

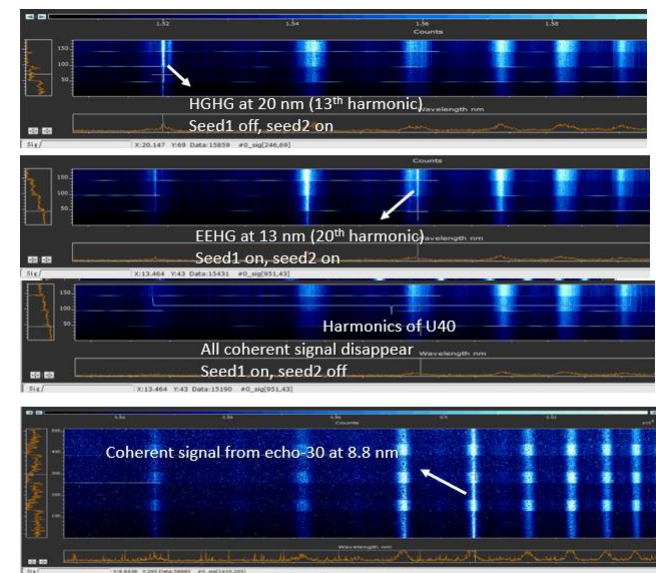
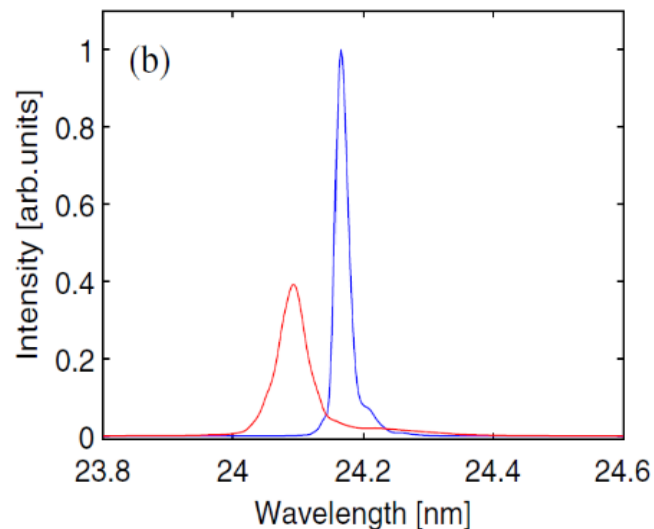
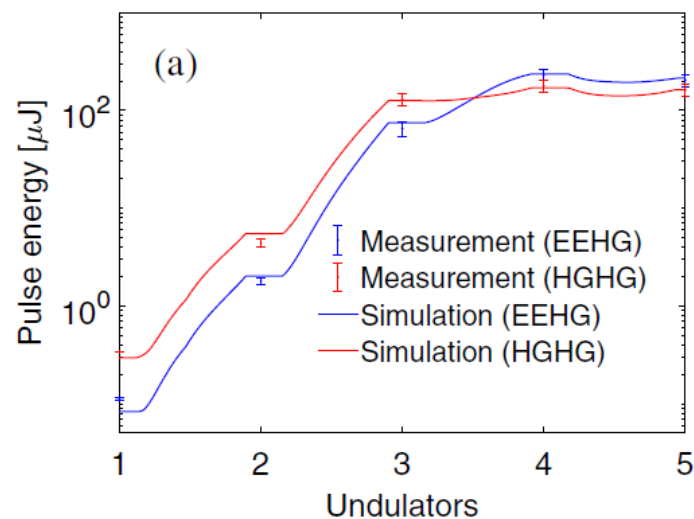


单级EEHG实验@SXFEL-TF

首个EUV波段EEHG出光放大: Echo-11 @ 24 nm



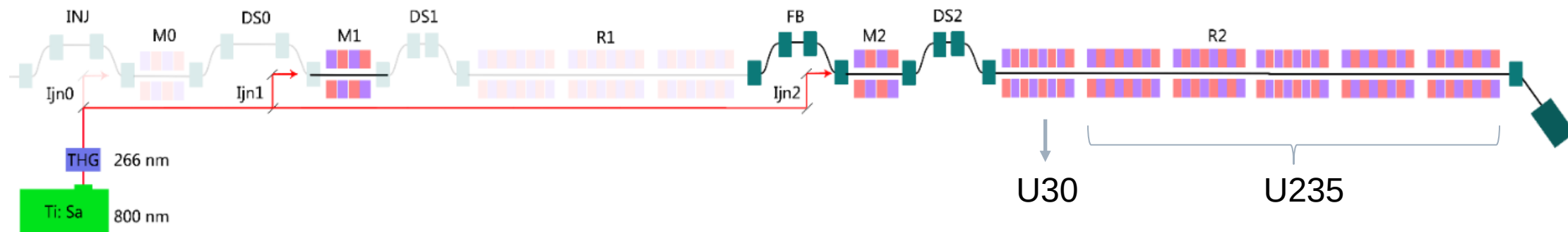
EEHG光谱性能有明显优势



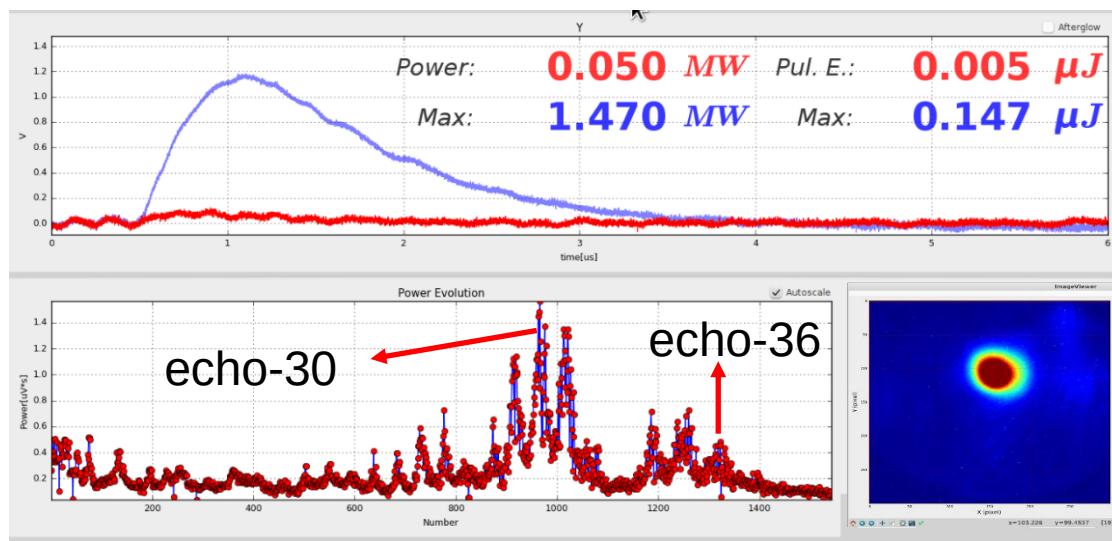
C. Feng, et al., Sci. Bull. 61, 1202 (2016)

C. Feng, et al., PHYS. REV. ACCEL. BEAMS 22, 050703 (2019)

单级EEHG实验@SXFEL-TF



Lasing of EEHG-30@8.8 nm

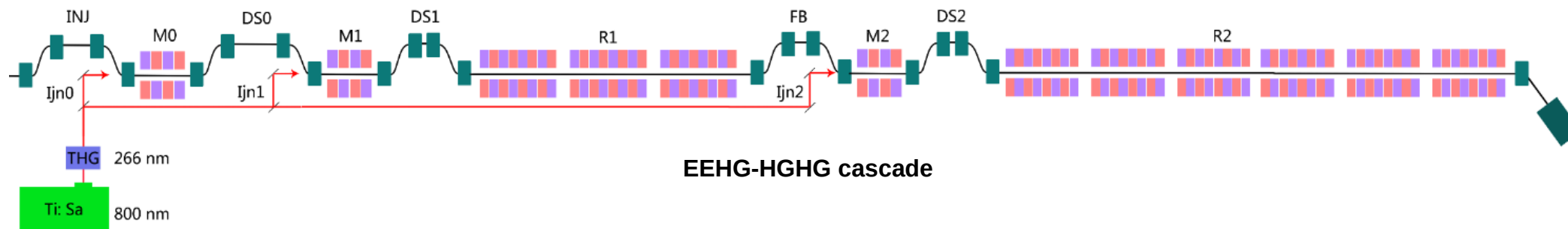


	EEHG	HGHG
优点	- 谐波次数高 - 光谱特性好	- 容易优化 - 在较低次谐波群聚更强
缺点	- 高次谐波优化困难且易受各种条件影响 - 辐射功率偏低	- 谐波次数低 - 光谱性能较差

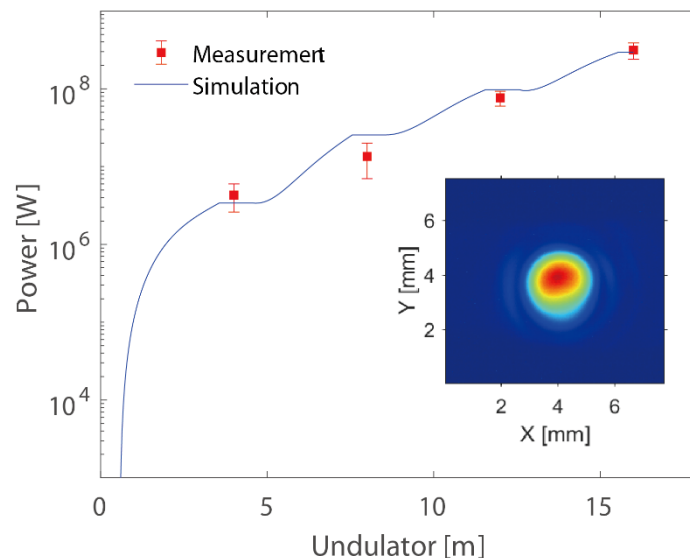
small ← Gap → large

EEHG-HGHG级联实验@SXFEL-TF

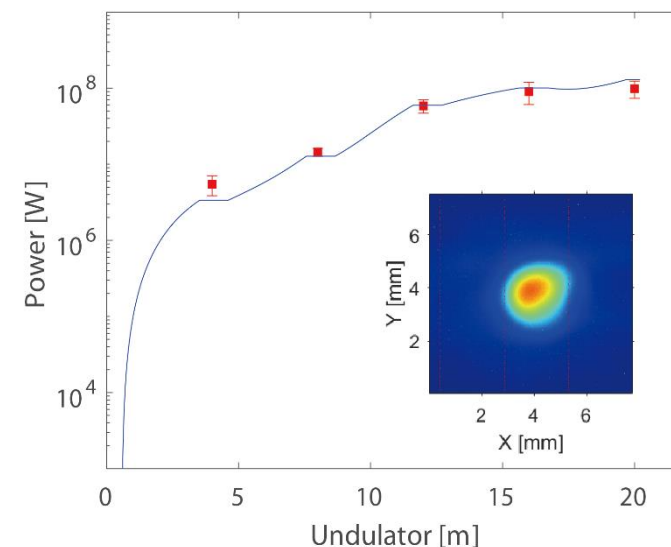
国际上首个EEHG-HGHG级联实验：EEHG-HGHG @ 8.8 nm



第一级EEHG



第二级HGHG



混合级联的优势：

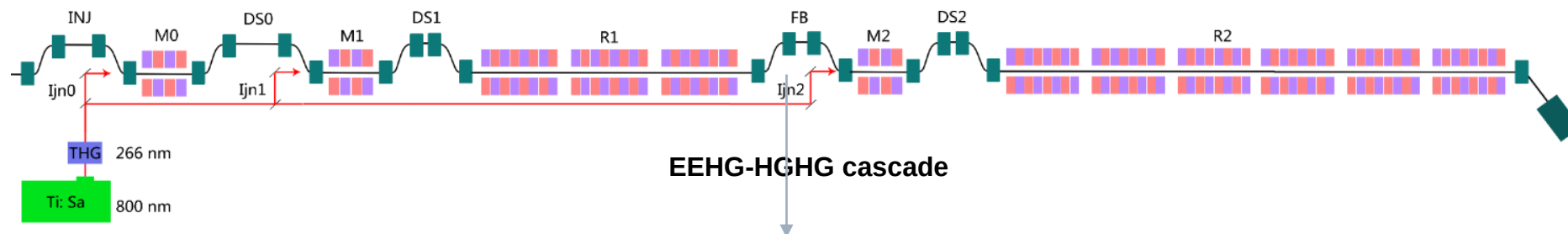
- ✓ 更好的频谱特性
- ✓ 第一级谐波转换效率更高
- ✓ 第二级bunching更好

混合级联的劣势：

- ✗ 结构复杂、优化困难

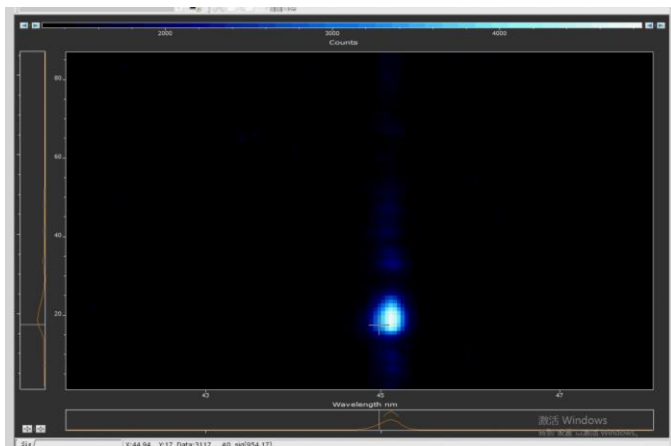
EEHG-HGHG级联实验@SXFEL-TF

国际上首个EEHG-HGHG级联实验：EEHG-HGHG @ 8.8 nm

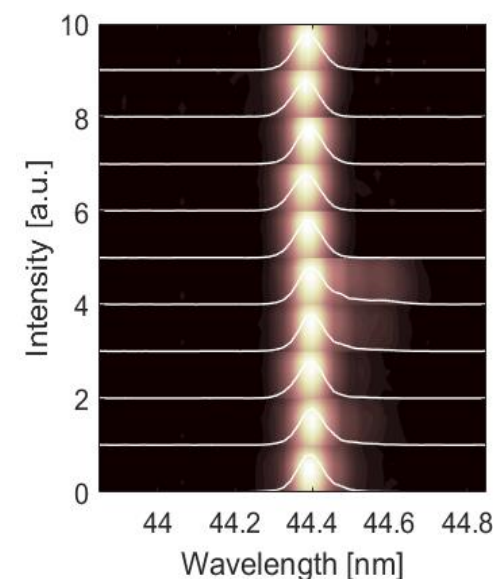
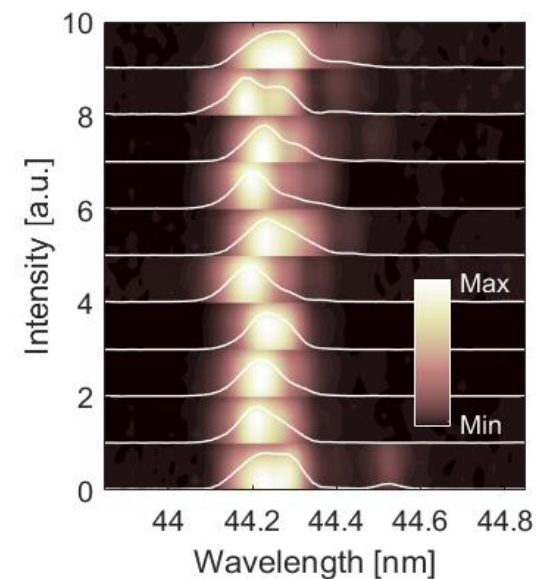
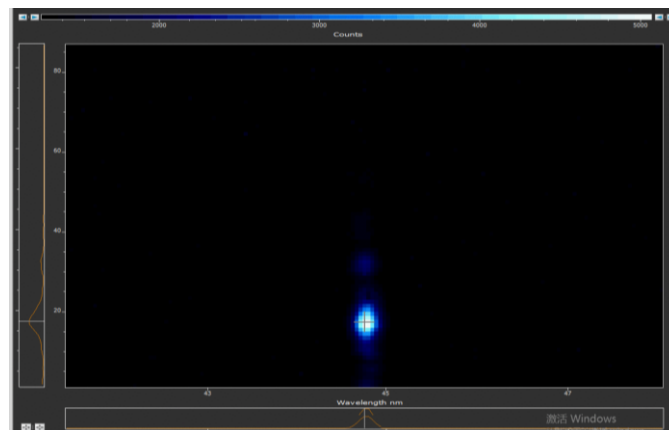


第一级运行在不同模式下，第一级输出光谱对比

1st stage HGHG

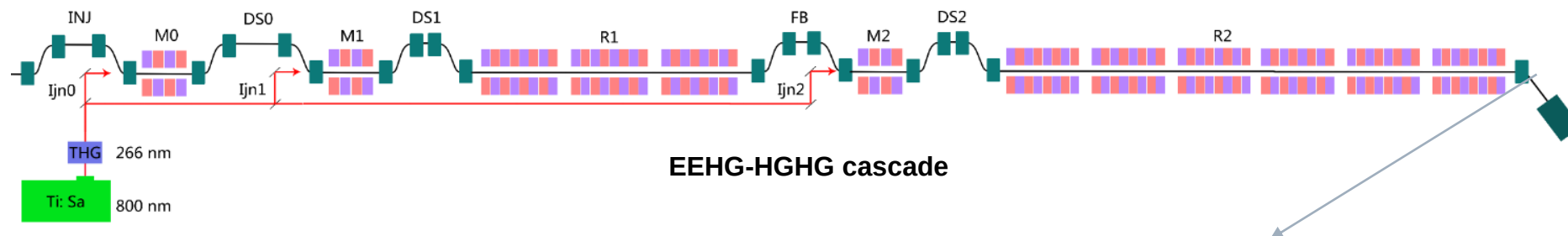


1st stage EEHG

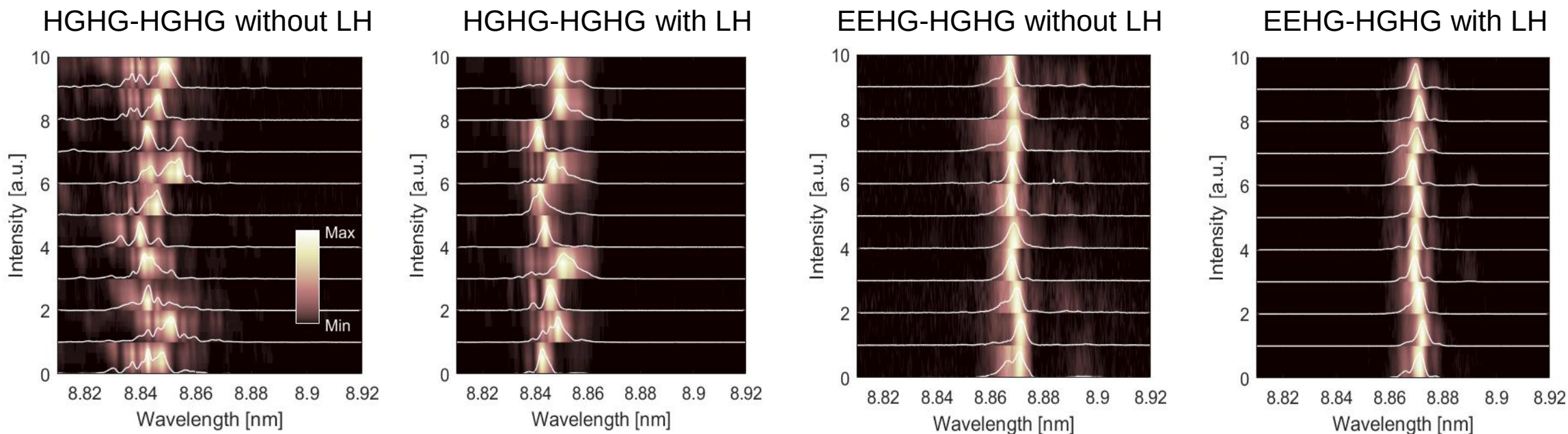


EEHG-HGHG级联实验@SXFEL-TF

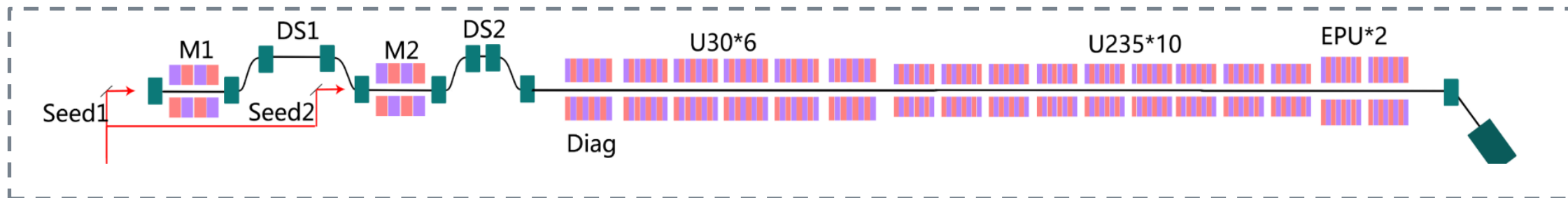
国际上首个EEHG-HGHG级联实验：EEHG-HGHG @ 8.8 nm



第一级运行在不同模式下，第二级输出光谱对比（采用光束线高分辨谱仪，分辨率>10000）

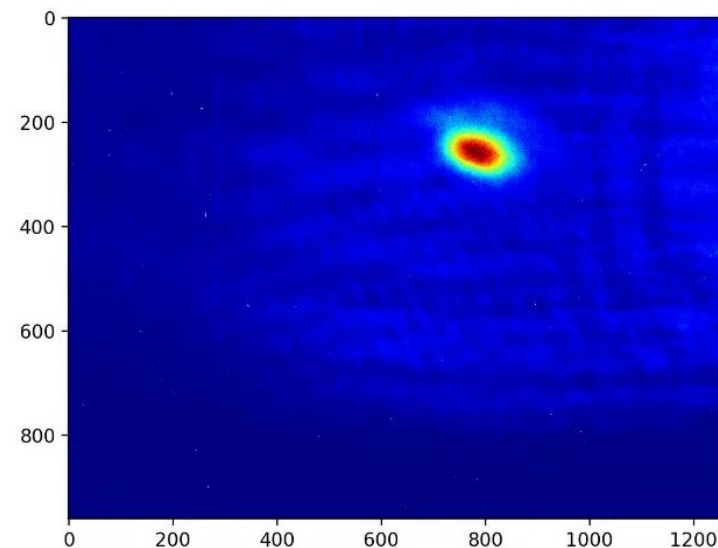
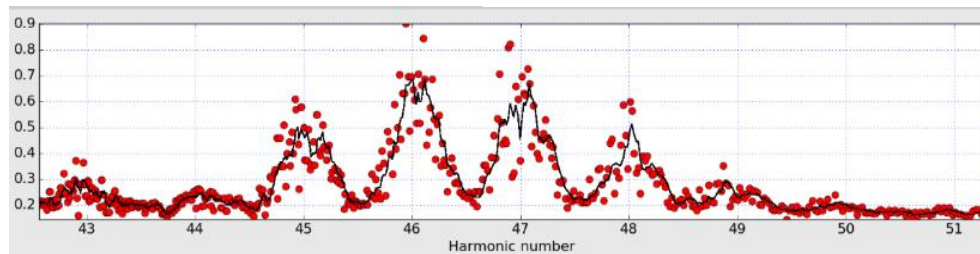
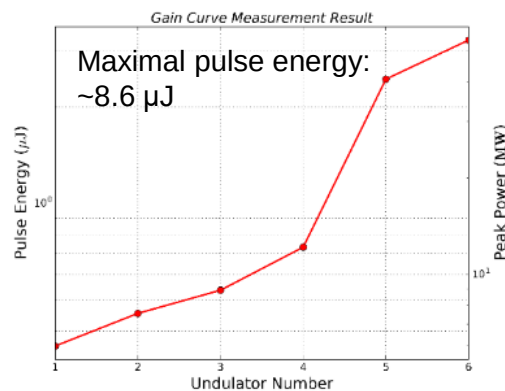
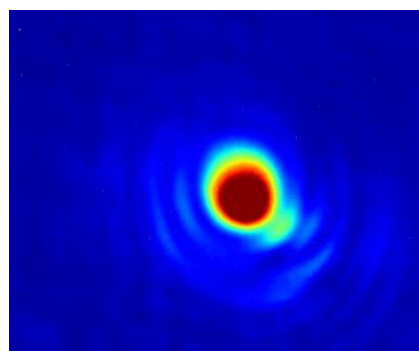


更高次谐波EEHG实验@SXFEL-UF



➤ EEHG-47th 出光放大@5.6 nm (2022年5月)

➤ 观察到EEHG-61st 辐射信号@4.36 nm (2022年5月)



EEHG+谐波辐射实验@3nm正在进行

内容

- SXFEL简介
- SXFEL已开展的部分先进FEL实验
 - FEL脉冲重构
 - EEHG&EEHC
 - HLSS
- SXFEL未来计划开展的先进FEL实验
- 小结

谐波自种子FEL实验 (HLSS) @SXFEL-UF

谐波自种子模式 (harmonic lasing self-seeding)

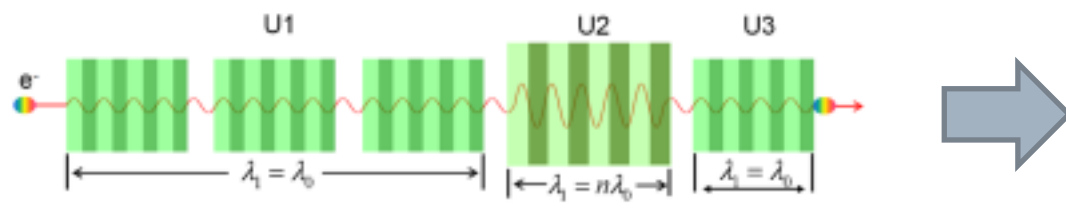


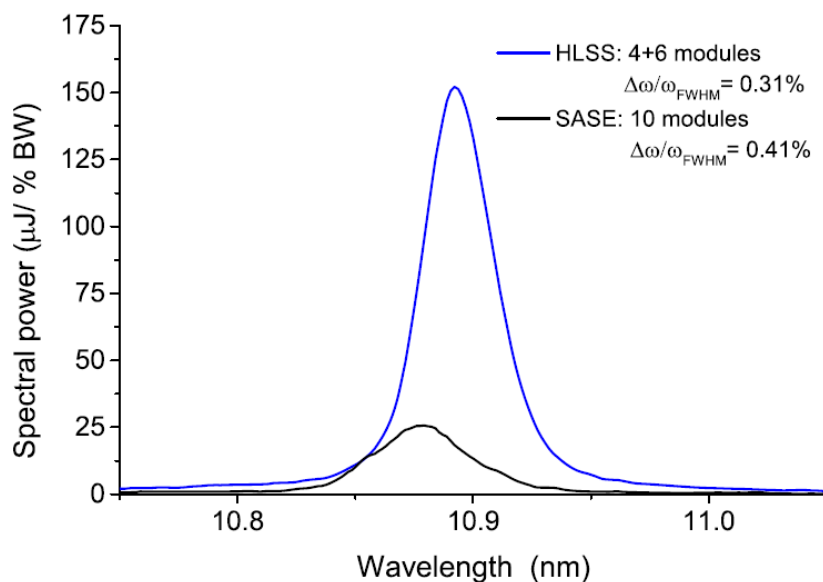
FIG. 2. Schematic layout of a pSASE FEL.

Dao Xiang, et al., *PRSTAB* 16, 010703 (2013)

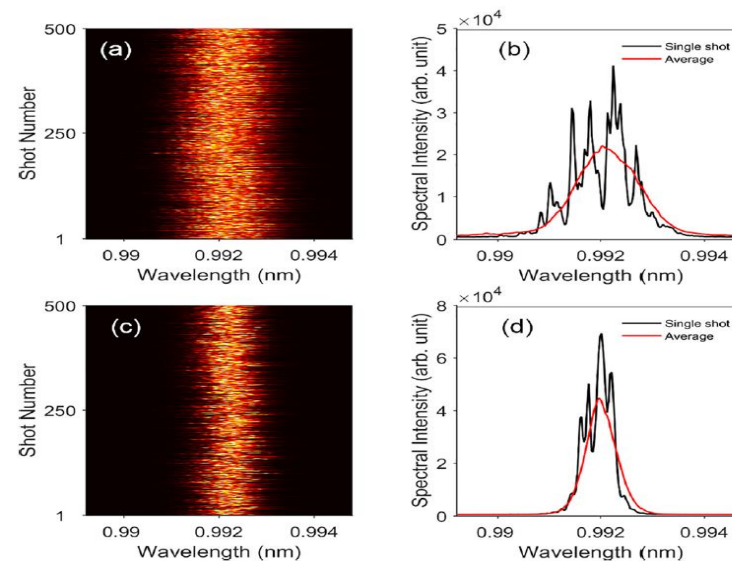


E. A. Schneidmiller, et al., *PRAB* 20, 020705 (2017)

FLASH 2017实验结果

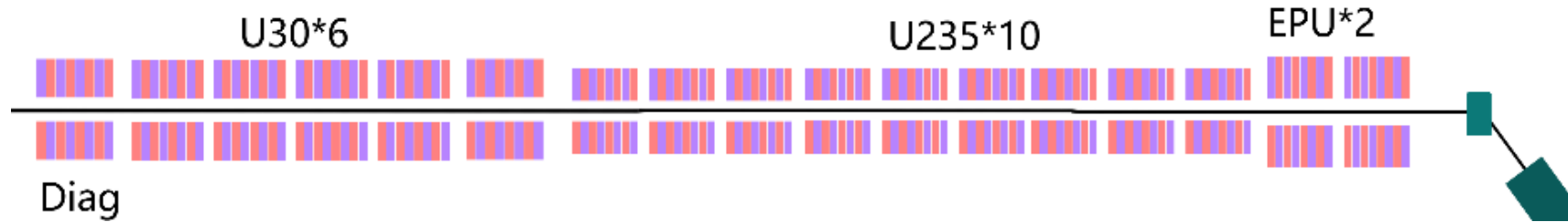


PAL-XFEL 2018实验结果



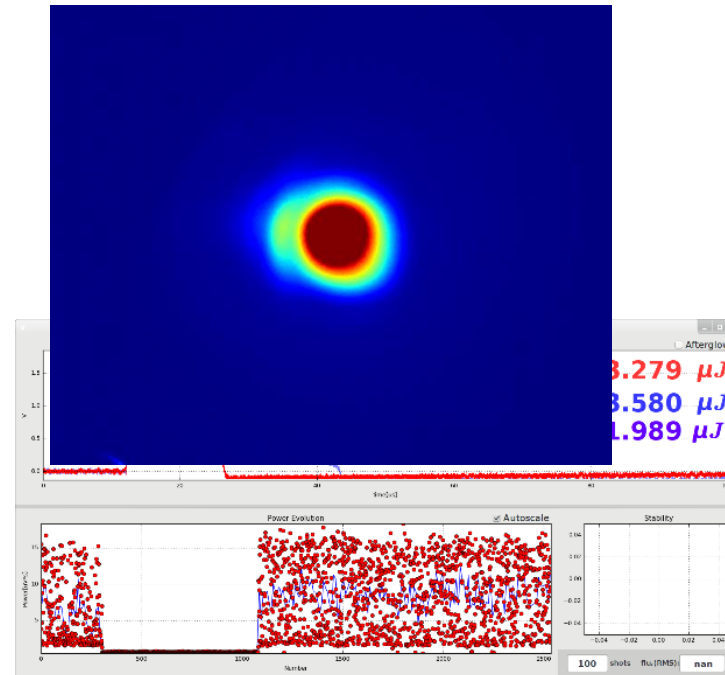
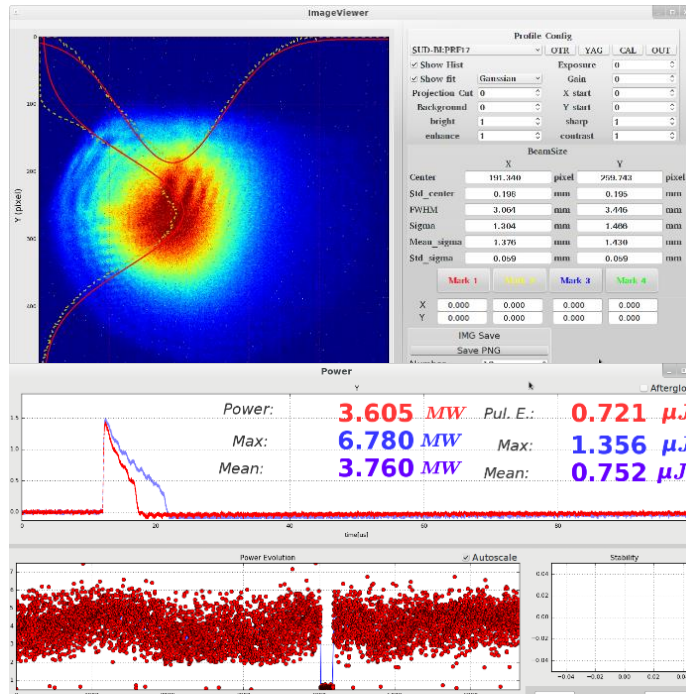
Inhyuk Nam, *APL*, 112, 213506 (2018)

谐波自种子FEL实验 (HLSS) @SXFEL-UF

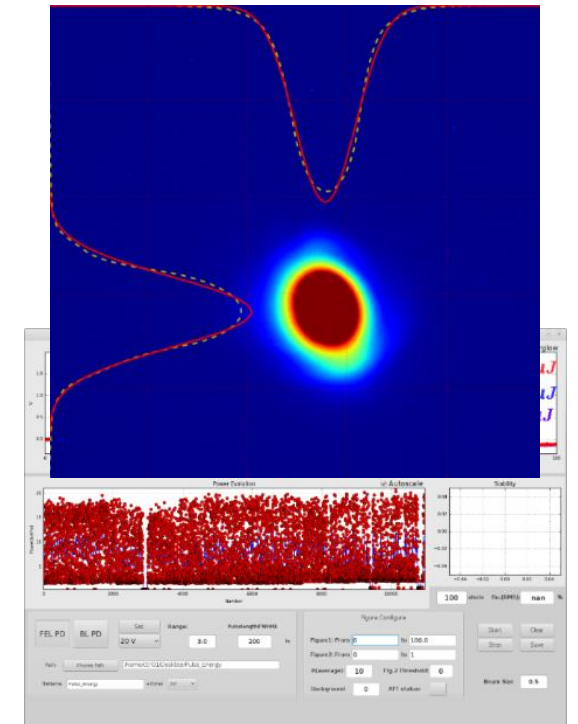


➤ 3月27日：实现HLSS-3nm出光放大（6节U30共振于6nm，6节U235共振于3nm）

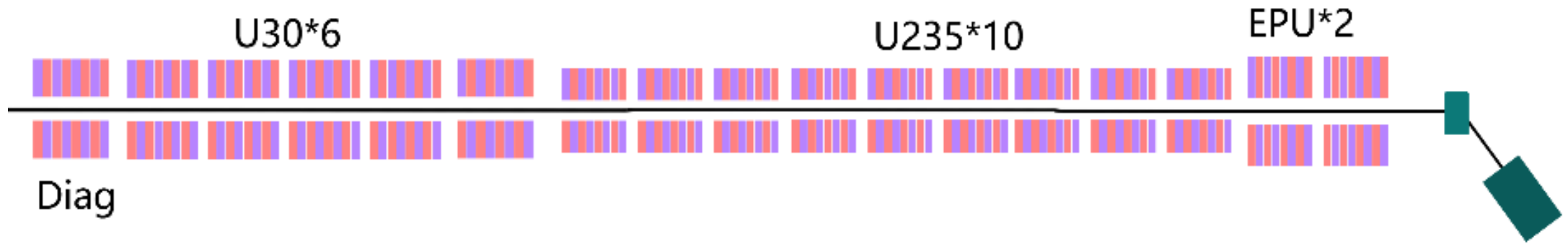
HLSS: 6节U30共振于6nm（reverse taper）+6节U235共振于3nm



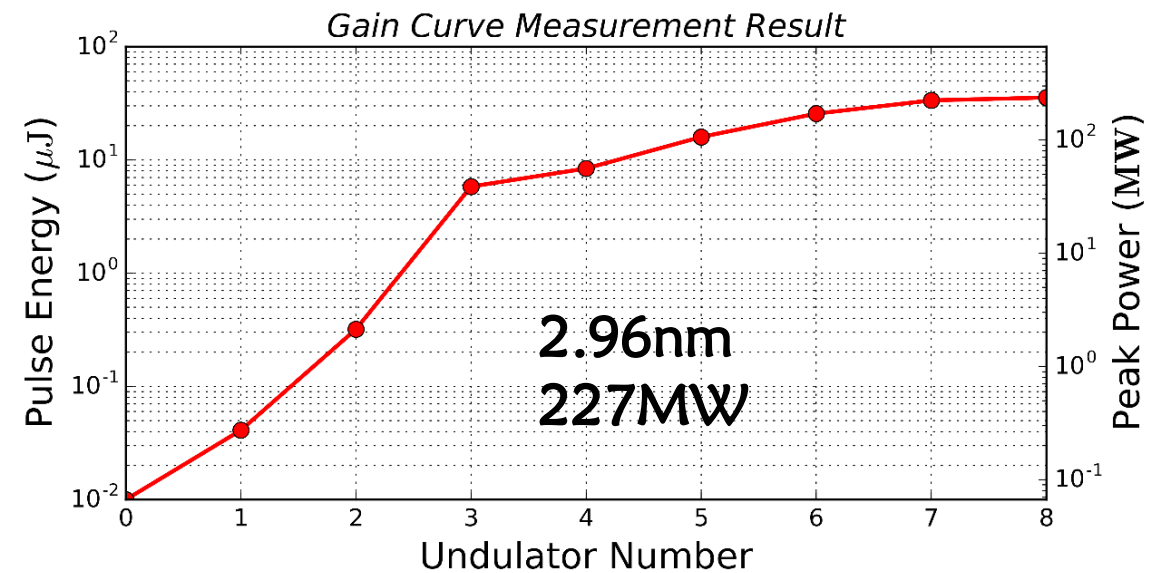
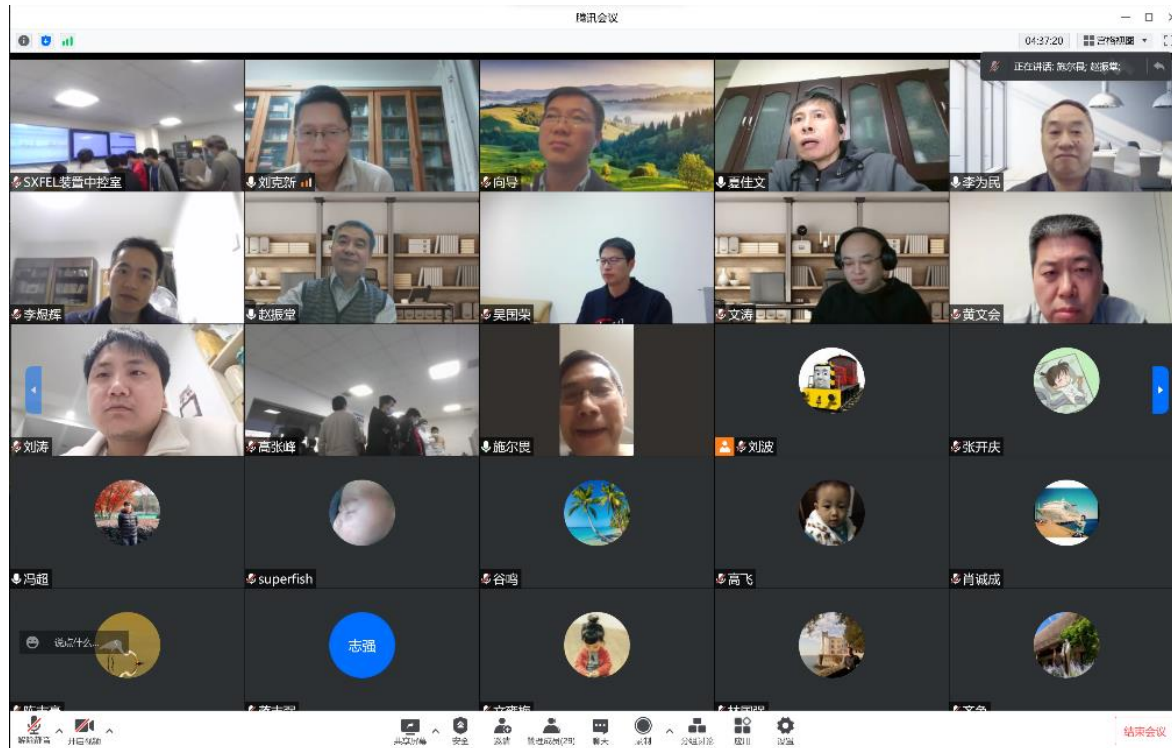
SASE: 6节U30+10节U235共振于3nm



谐波自种子FEL实验 (HLSS) @SXFEL-UF



2022.3.30 HLSS模式工艺测试



测试结果表明, 上海软X射线自由电子激光用户装置
HLSS模式下的自由电子激光性能优于设计指标。

内容

- SXFEL简介
- SXFEL已开展的部分先进FEL实验
 - FEL脉冲重构
 - EEHG&EEHC
 - HLSS
- **SXFEL未来计划开展的先进FEL实验**
- 小结

SXFEL用户装置

2020年完成建设和设备安装



SXFEL用户装置

➤ switchyard



➤ FEL-II: Seeded FEL line



➤ FEL-I: SASE FEL line



➤ beam dump



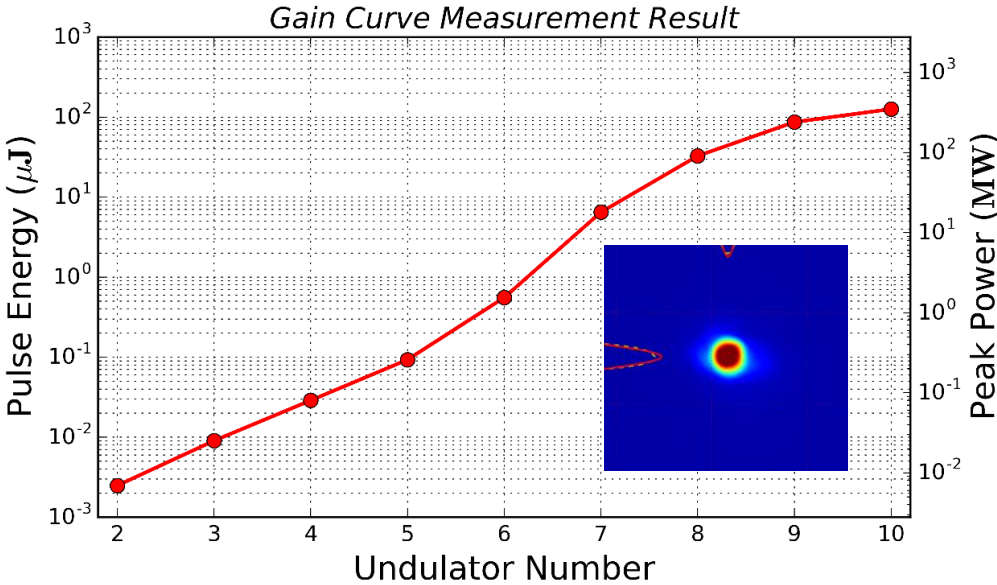
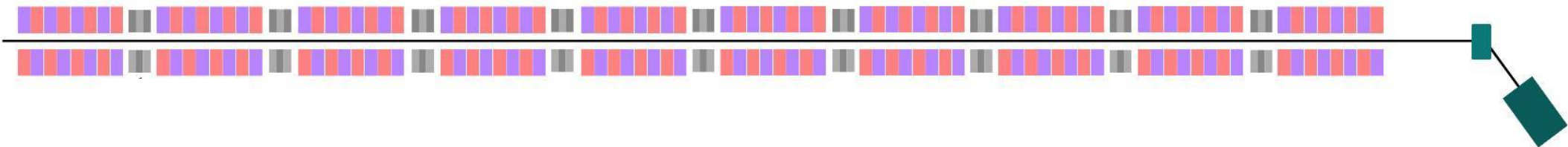
SXFEL用户装置

X-ray beamline and end-stations

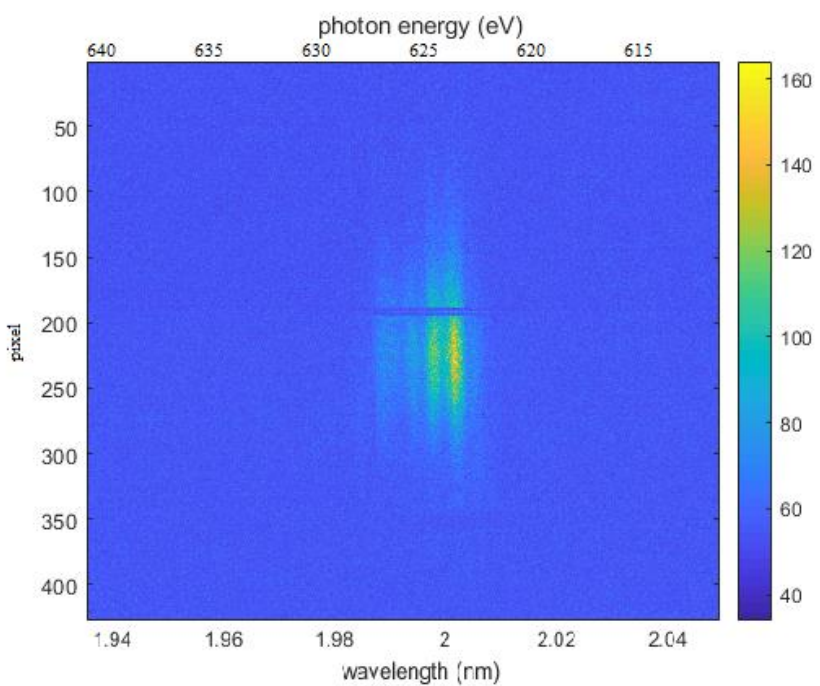


2021年实现饱和出光，最短波长至2nm

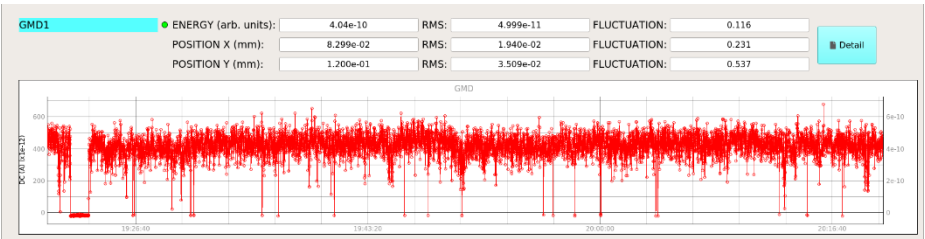
2nm SASE lasing, pulse energy > 200 μJ (May, 2021)



SASE spectrum from online spectrometer

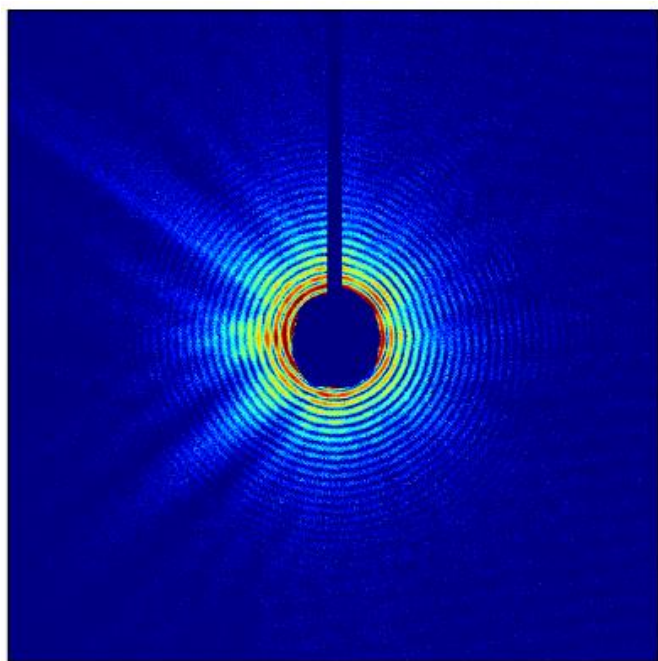


stability

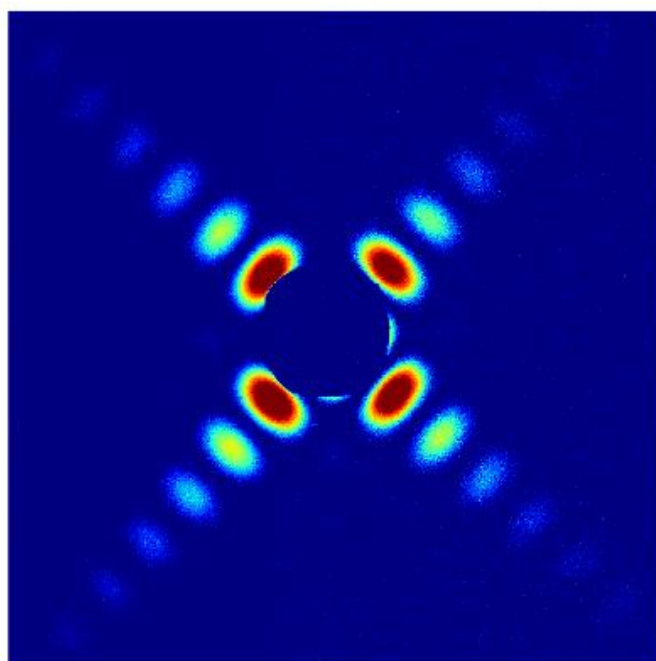


获得首批实验数据

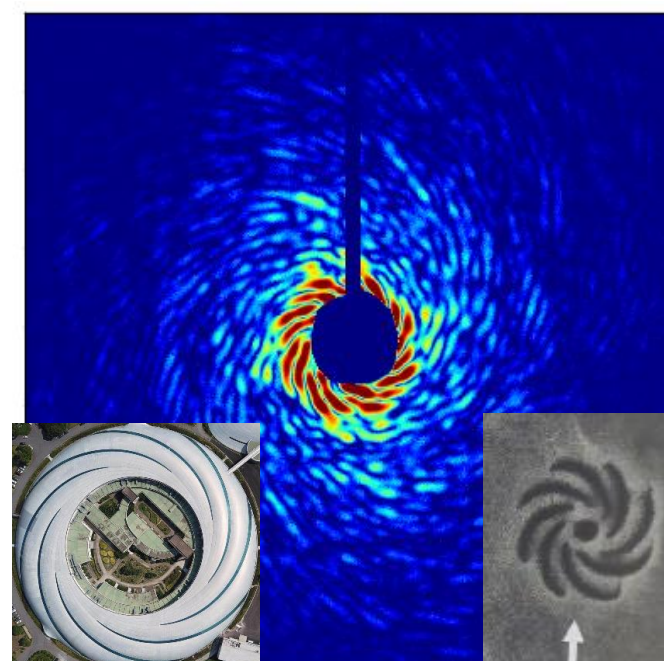
First single-shot coherent diffraction imaging experiments
at SXFEL with SASE@ 2.4 nm (6.21-25)



Round



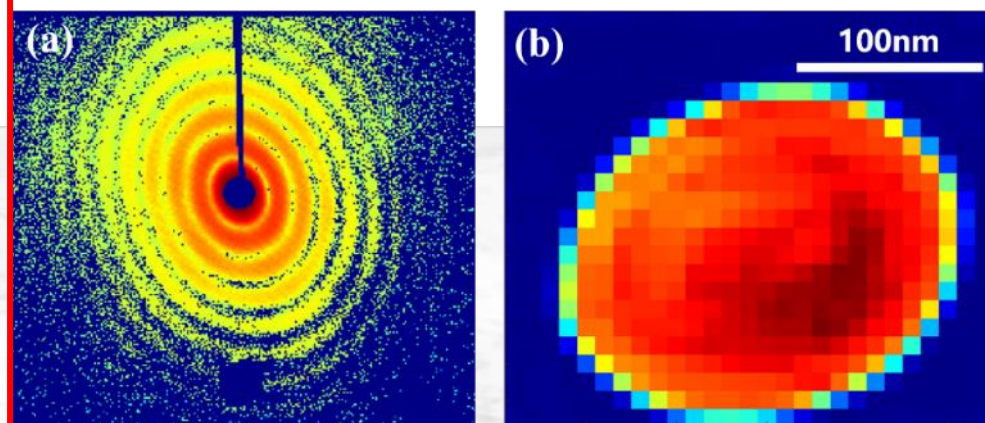
Square



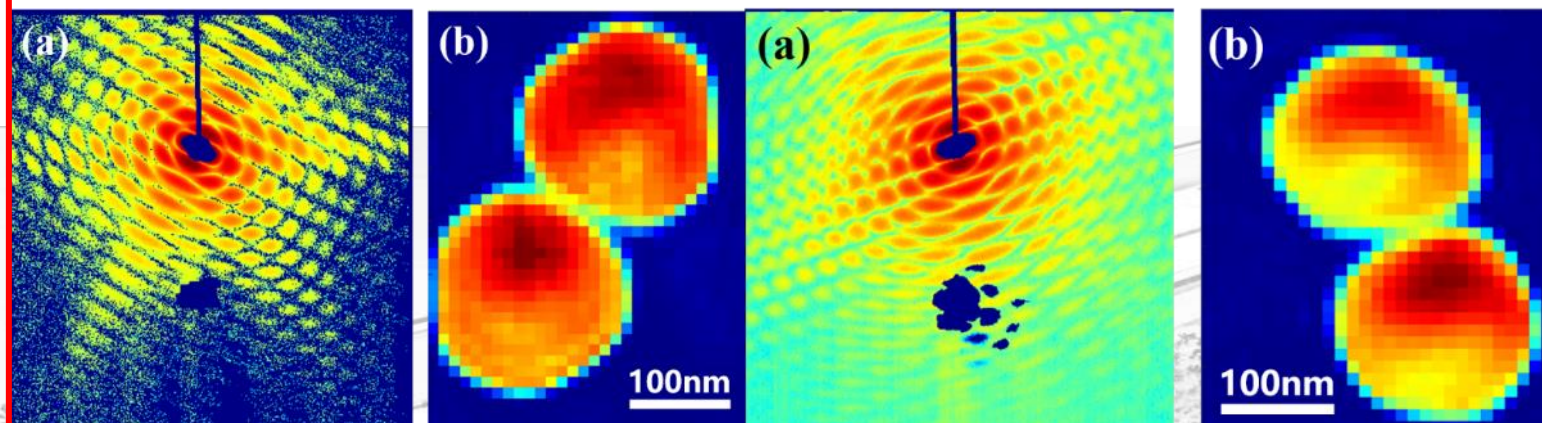
Nautiloidea

ShanghaiTech University team

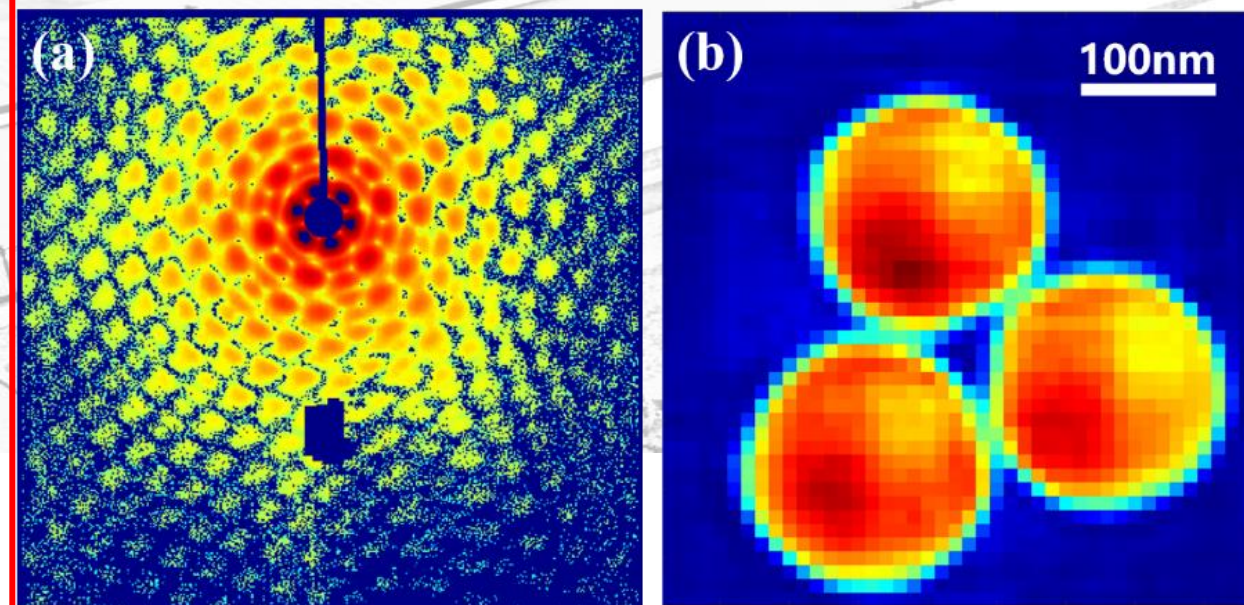
1. 单个200nm金球衍射图样及重构图像：分辨率~22.4nm



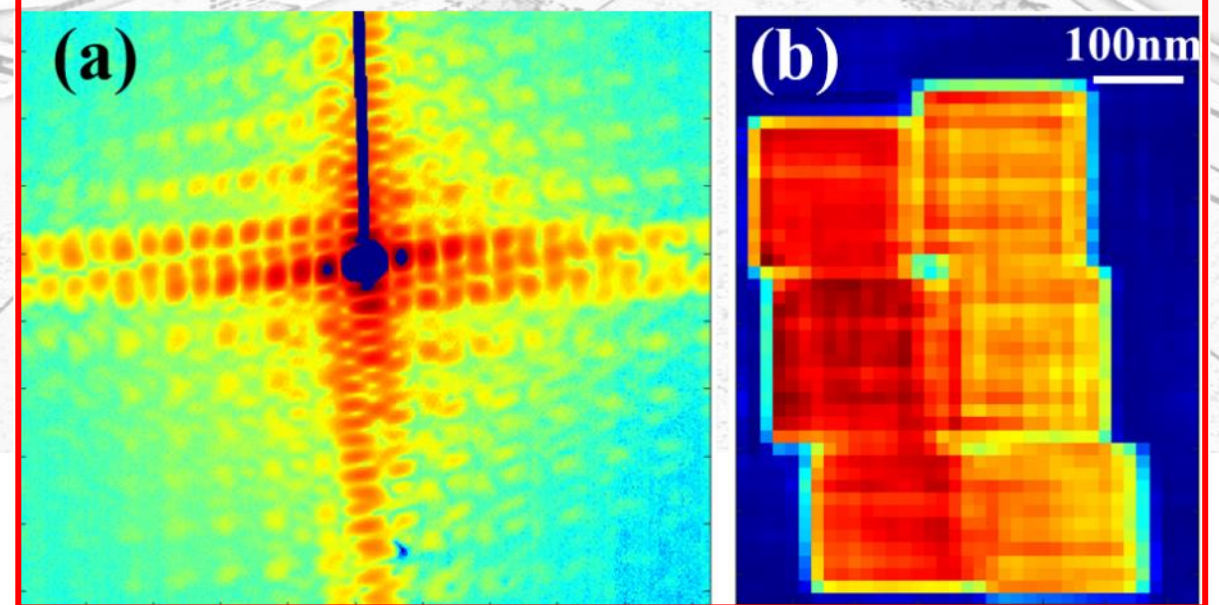
2. 两个200nm金球衍射图样及重构图像：分辨率分别为~24.5nm和~18.5nm



3. 三个200nm金球衍射图样及重构图像：分辨率~26.5nm



4. 多个170nm金立方衍射图样及重构图像：分辨率~26.1nm



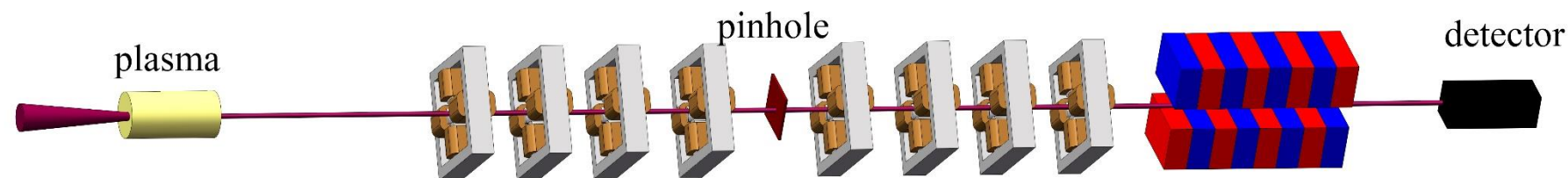
SXFEL-UF与国际同类型装置对比



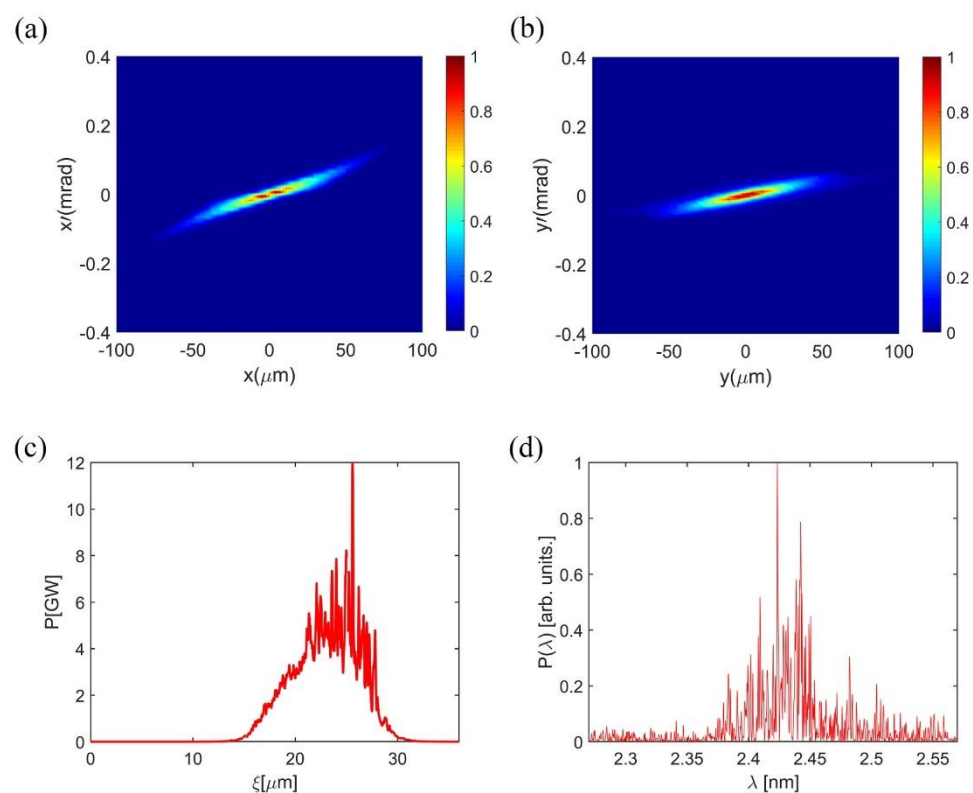
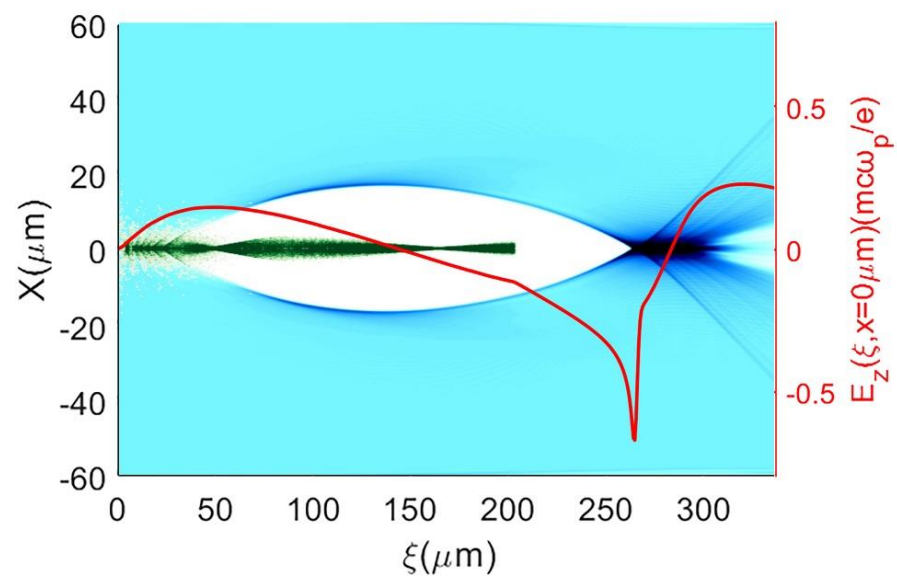
	FLASH（德国DESY）	FERMI-FEL（意大利Elettra）	SXFEL（中国）
运行模式	SASE	Seeding	SASE/seeding
电子束能量	1.25 GeV	1.35 GeV	1.5 GeV
峰值流强	1-2.5 kA	~0.8 kA	0.7-1 kA
最短波长	4 nm	4 nm	2/3 nm
最短波荡器周期	27.3 mm	30 mm（EPU）	16 mm/23.5 mm

“水窗”波段：2.3-4.4 nm

等离子体尾场束流加速和操控 (SASE线)

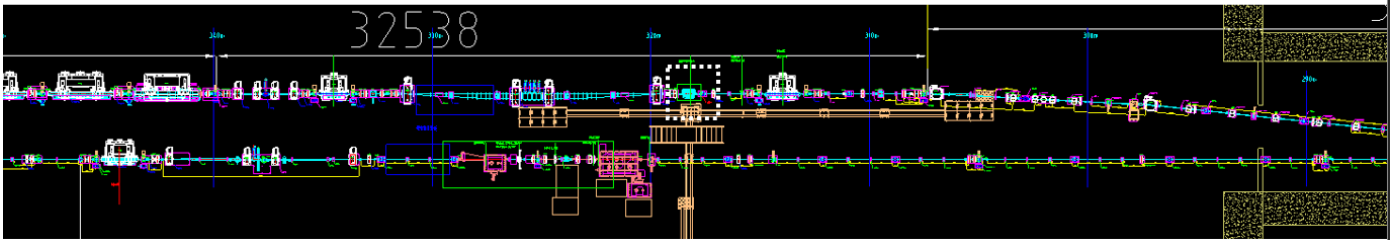


模拟结果：可进行电子束的加速和纵向相空间操控以实现FEL的性能操控



介质管尾场操控 (seeding线)

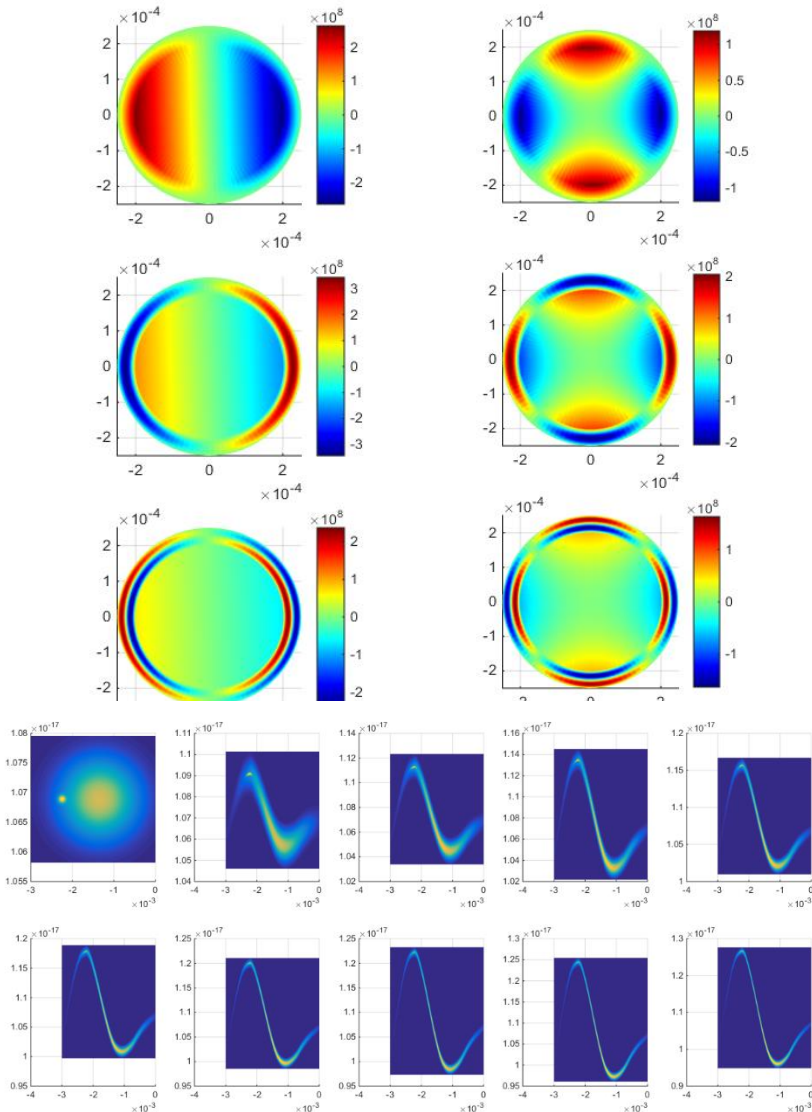
安装位置：EEHG第一个大chicane之前



已安装就绪

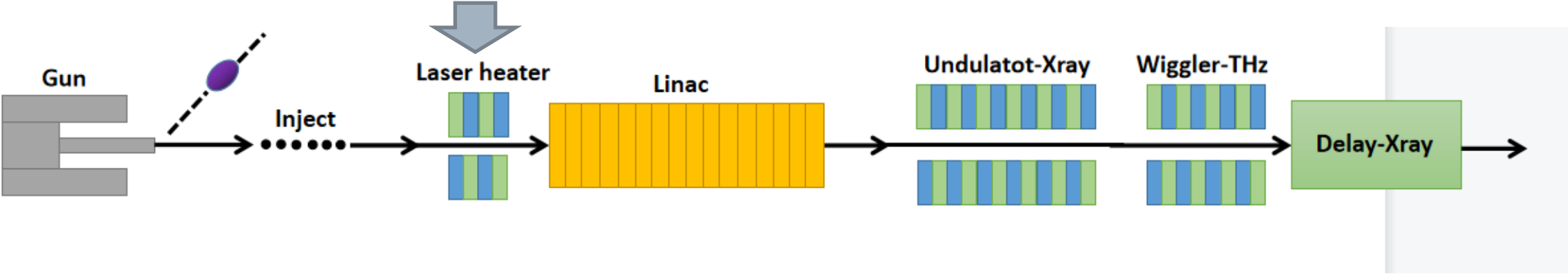


模拟结果：可进行电子束的多维度操控以实现FEL的性能操控

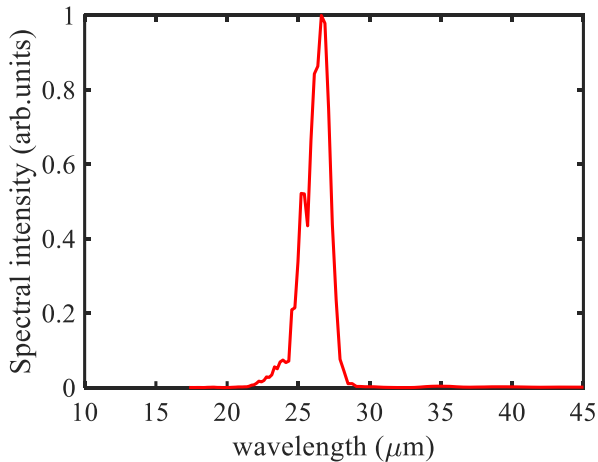
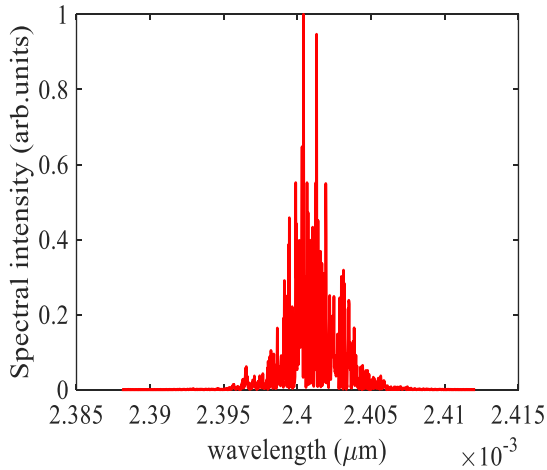
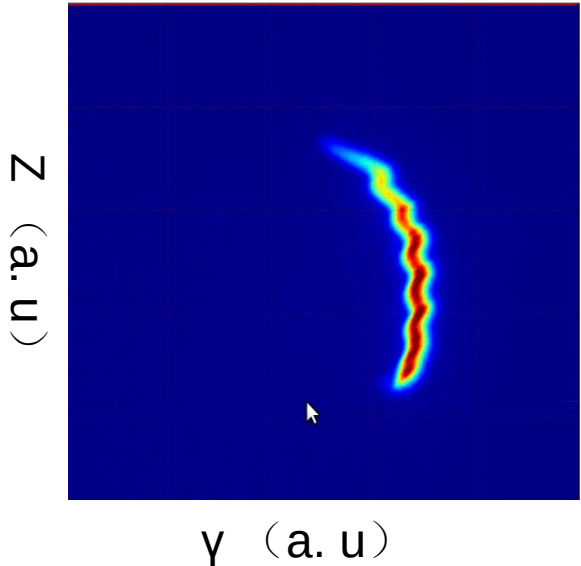
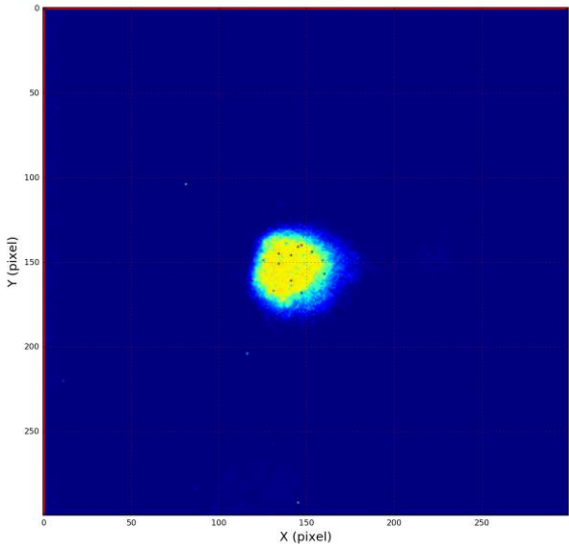


高强度相干THz辐射产生 (1-20 THz)

拍频激光

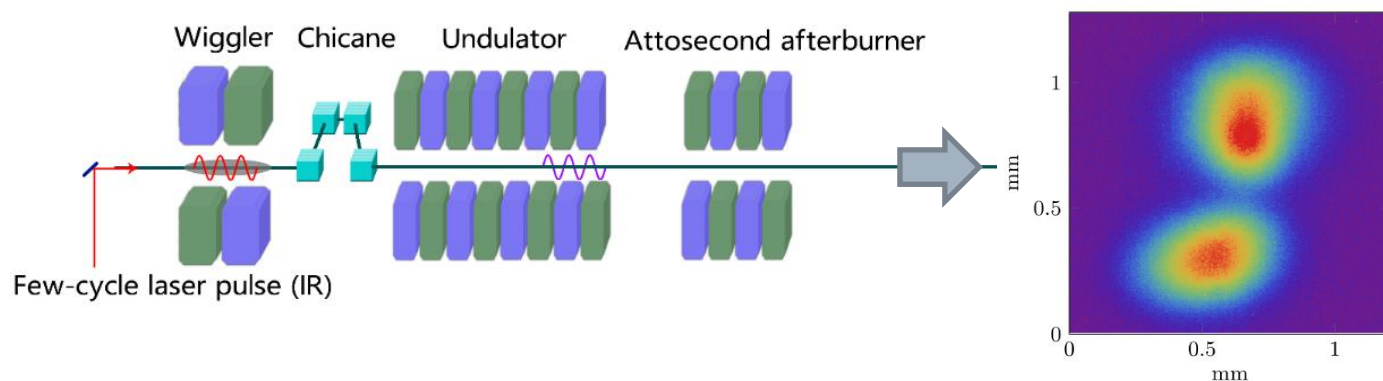


拍频效果

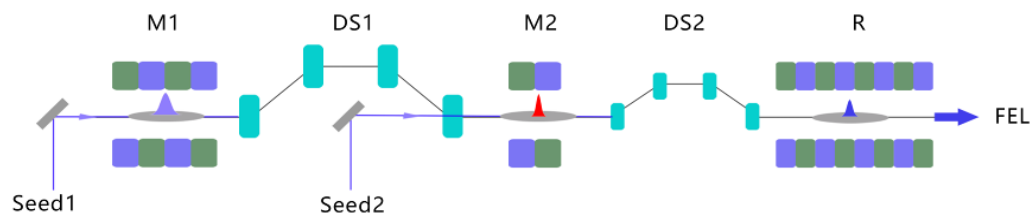


超快脉冲产生：拟采用的方案

SASE线：ESASE+Attosecond afterburner

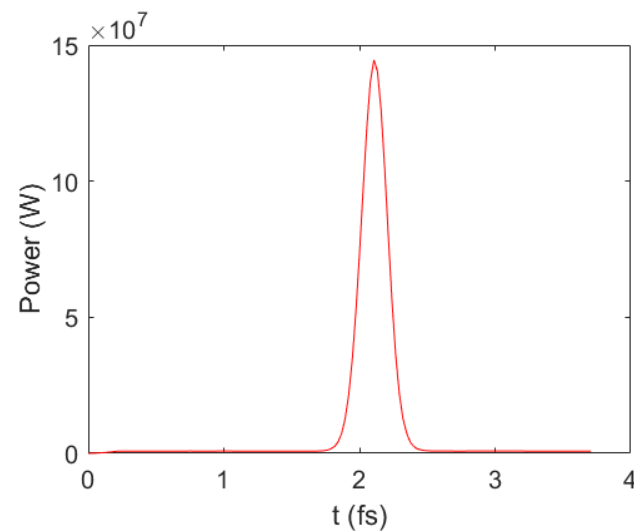
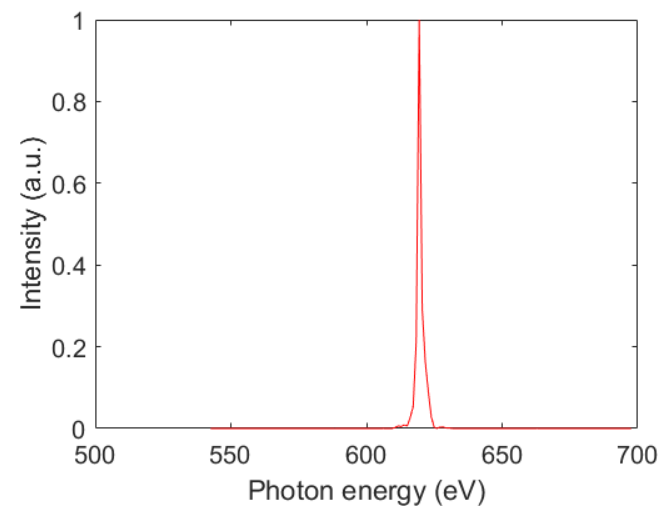


Seeding线：基于EEHG

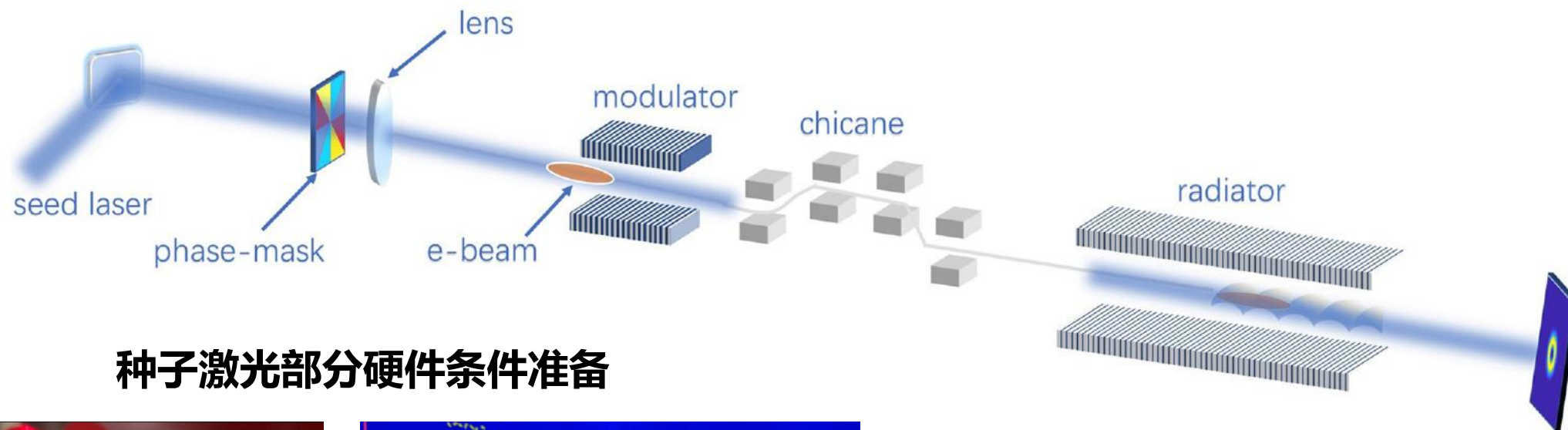


均需要采用红外few-cycle激光

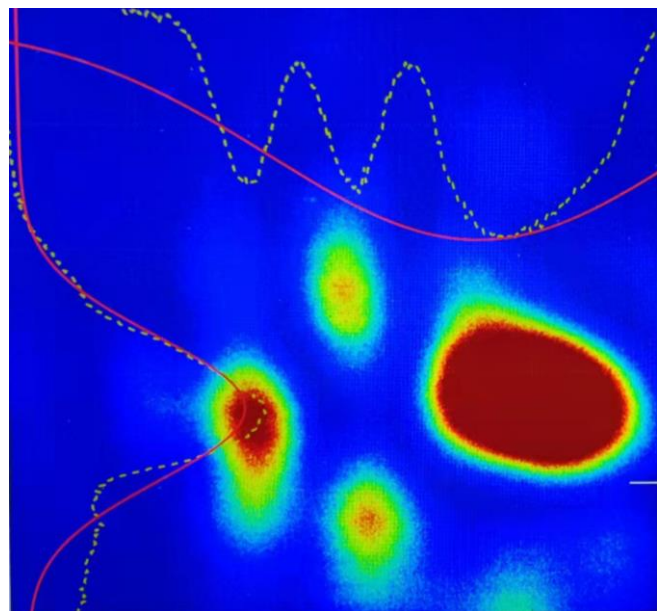
模拟结果：最短百阿秒量级的超快辐射，峰值功率~100MW



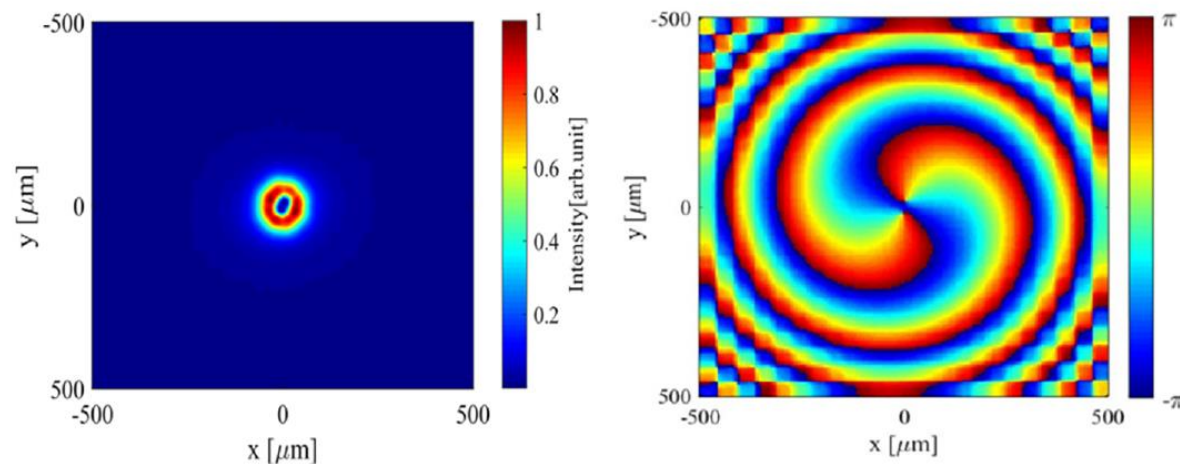
X射线涡旋光产生 (seeding线)



种子激光部分硬件条件准备



模拟结果：峰值功率~100MW量级的EUV-X射线波段涡旋光



小结

- 基于SXFEL试验装置开展了EEHG和级联等先进FEL实验，掌握了实验方法，发展了新的技术；
- SXFEL用户装置已完成了物理方案的优化，基于新的物理方案有可能可以开展更多的全相干、超快、多色FEL相关的物理实验，进一步拓展装置的性能，形成装置自身特色。

Thanks for your attention!

