

X射线 自由电子激光 试验装置



高增益自由电子激光工作原理

自由电子激光

自由电子激光 (Free Electron Laser, FEL) 是一种以相对论性电子为介质、以相干电磁辐射为发光原理的大型高技术装置。1975年,基于低增益振荡器工作模式的第一台自由电子激光诞生于美国斯坦福大学,迄今为止,低增益自由电子激光仍然主要工作在红外波长范围。21世纪以来,基于高增益放大器原理的新型自由电子激光在技术上取得了重大突破,自由电子激光已经实现了超高亮度硬X射线的出光,

并已经应用于世界最前沿科学的研究。

自由电子激光具有极其优异的特性,其中包括:

- 极高的峰值亮度,比目前最好的第三代同步辐射光源高出10个数量级;
- 超短的脉冲长度,可以达到1 fs甚至更短;
- 极好的相干性;
- 波长覆盖范围广,而且连续可调。

科学用途

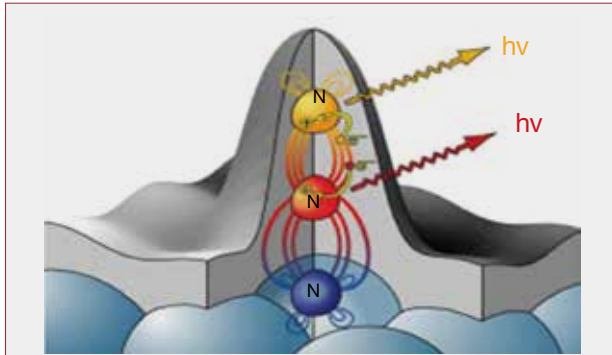
X射线自由电子激光是目前光子能量最高、规模最大的相干光源,具有超高亮度、超短脉冲时间结

构、时间空间相干性和工作波长可调谐性。

泵浦-探测超快化学

氢表面催化

超快化学反应动力学



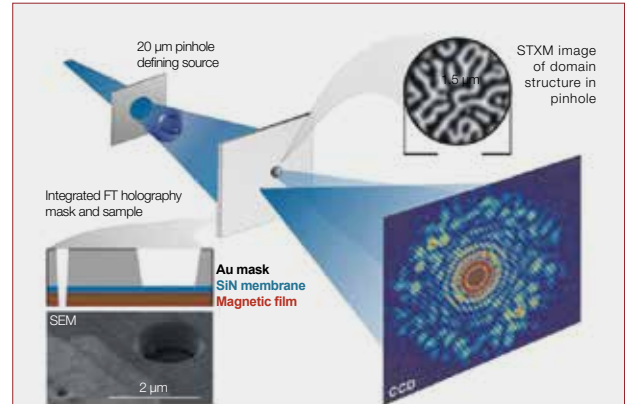
X射线光谱学示意图
(吸附在Ni表面的N₂分子被X射线照射之后的辐射如图所示。在本例中,该方法除了元素的敏感性,还提供了不同化学位置的特异性)

磁成像

临界涨落动力学

超快非平衡态动力学

超快弛豫动力学

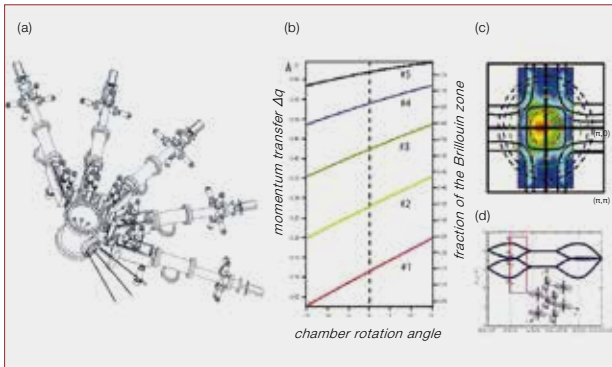


X射线傅里叶变换全息实验示意图

量子材料

强关联电子体系

拓扑量子材料

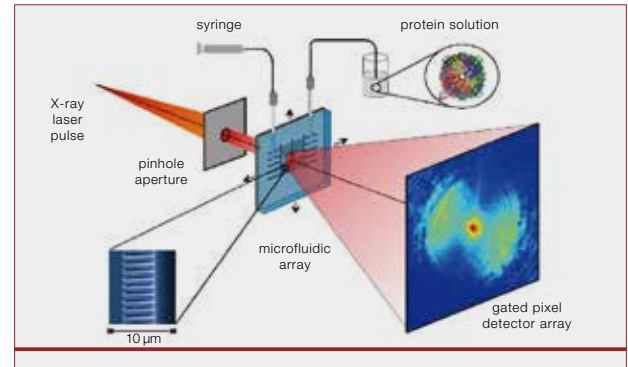


(a) 动量分辨的非弹性散射实验框架图; (b) Mn的L边带不同点的摄谱仪所获得的动量转移; (c) La_{1-x}Sr_xMnO₄的费米面和旋转样品的摄谱仪所涵盖的区域; (d) La_{1-x}Sr_xMnO₄轨道排序

高分辨超快相干成像

无辐射损伤限制的生物细胞成像

单粒子成像



未来的自由电子激光相干衍射成像实验图
(高强度的相干X射线脉冲照射微流体样品细胞。可门控的像素探测阵列(PILATUS)可记录每个X射线飞秒脉冲相干衍射的数据。不同的样品系统可通过移动具有独立通道的微流体样品阵列来研究)

大型自由电子激光装置设施集群

美国 SLAC

同步辐射光源 SSRL

自由电子激光装置 LCLS

LCLS-II (建设中)

瑞士 PSI

同步辐射光源 SLS

自由电子激光装置 SwissFEL(建设中)

德国 DESY

同步辐射光源 PETRA-III

自由电子激光装置 FLASH

自由电子激光装置 FLASH-II

自由电子激光装置 European XFEL(建设中)

意大利 Trieste

同步辐射光源 Elettra
自由电子激光装置 FERMI

中国 SINAP

同步辐射光源 SSRF
自由电子激光装置 SXFEL
(建设中)

日本 SPring-8

同步辐射光源 SPring-8
自由电子激光装置 SCSS
自由电子激光装置 SACLA

韩国 PAL

同步辐射光源 PLS
自由电子激光装置 PAL-XFEL
(建设中)

世界大型自由电子激光装置

高增益FEL装置	装置地点	电子能量 (GeV)	长度 (m)	波长 (nm)	重复频率(Hz)	直线加速器类型	FEL类型*	当前状态	出光时间
FLASH	德国	1.0	350	4-45	50 000	L波段超导	SASE	运行	2004
SCSS	日本	0.3	50	50	60	C波段常温	SASE	运行	2006
SPARC	意大利	0.5	70	100-300	10	S波段常温	Seeded	运行	2007
SDUV	中国	0.2	65	150-350	10	S波段常温	Seeded	运行	2009
LCLS	美国	14.3	2 000	0.1-1.5	120	S波段常温	SASE, SS	运行	2009
SACLA	日本	8.0	700	0.06-0.8	60	C波段常温	SASE, SS	运行	2011
FERMI	意大利	1.2	350	4-40	50	S波段常温	Seeded	运行	2011
XFEL	德国	17.5	3 500	0.06-6	30 000	L波段超导	SASE	在建	2017
PAL-XFEL	韩国	10.0	1 100	0.1-4	100	S波段常温	SASE, SS	在建	2016
DCLS	中国	0.3	150	50-150	50	S波段常温	Seeded	在建	2016
SXFEL	中国	0.84	300	9	10	S、C波段常温	Seeded	在建	2016
SwissFEL	瑞士	5.8	700	0.1-5	100	C波段常温	SASE,SS	在建	2017
LCLS-II	美国	4	3 800	6-0.25	~1 000 000	L波段超导	SASE,SS	在建	2021

*SASE: Self Amplified Spontaneous Emission, 自放大自发辐射; HGHG: High Gain Harmonic Generation, 高增益谐波产生; Seeded: 种子型; SS: Self-seeding, 自种子

装置概况

X射线自由电子激光试验装置(X-ray Free Electron Laser Test Facility, 简称SXFEL)是由中国科学院和教育部共同向国家申请建造的国家重大科技基础设施,项目法人单位为中国科学院上海应用物理研究所,共建单位为北京大学。项目主要建设由光阴极注入器、主加速器、两级级联波荡器系统三大部分组成的软X射线自由电子激光装置主体,新建加速器隧道、速调管长廊、中央控制室等建筑及公用工程配套设施6919.5平方米,并研制一个射频超导加速单元。其中,软X射线自由电子激光装置由中国科学院上海应用物理研究所负责建设,建设地点为上海市张江高科技园区;射频超导加速单元

由北京大学负责研制,建设地点为北京市海淀区。建设期3年。

SXFEL性能指标

	试验装置	用户装置(未来升级)
电子能量	0.84 GeV	1.6 GeV
最短激光波长	8.8 nm	2 nm
峰值功率	大于100 MW	大于100 MW
重复频率	10 Hz	50 Hz
脉冲长度	~100 fs	~100 fs

注:用户装置参数为初步设计值

建设意义

SXFEL 将为我国建设 X 射线自由电子激光用户

装置做预先研究,实验验证级联高增益谐波放大模



建设中的 SXFEL

式的可行性，检验并掌握相关关键技术，进行人才和技术储备，确定 X 射线自由电子激光发展的技术路线，为我国建设 X 射线自由电子激光用户装置建设提供支撑。经过适当升级本装置将可在最短时间内作为

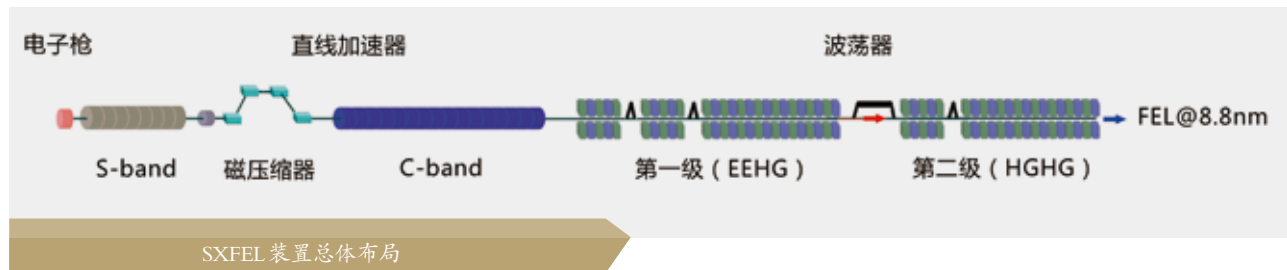
软 X 射线自由电子激光用户装置提供给我国科学界使用，在物理、生物、化学、材料、能源、环境和医学等领域都有非常重要的应用。

项目进展

2014 年 12 月 30 日，X 射线自由电子激光试验装置在中国科学院上海应用物理研究所张江园区开工奠基。2015 年 1 月 30 日，建安工程完成全部试桩施工，2015 年 6 月 15 日，完成全部桩基工程施工和检测，2015 年 10 月 4 日，项目结构施工全部完成。10 月 22 日，结构工程通过上海市建设工程优质结构验收，进入装饰装修工程与管道设备安装工程施工阶段。截止 2015 年 12 月，土建工程除装饰装修工程外已全部完成，公用设施的绝大部分设备和管线已安装

就位；主加速器、波荡器及诊断光束线已完成工程设计，工程涉及的关键技术已完成样机研制和集成测试，绝大部分设备已完成设备招标进入批量加工制造阶段。工程团队正按计划、经费，高质有序地推动工程进展。

2015 年，X 射线自由电子激光试验装置召开了工程科学技术委员会第一次会议，FEL 总体组和工程管理部组织完成了 X 射线自由电子激光试验装置工程国际评审。国内外专家一致认为，SXFEL 有效地吸收了

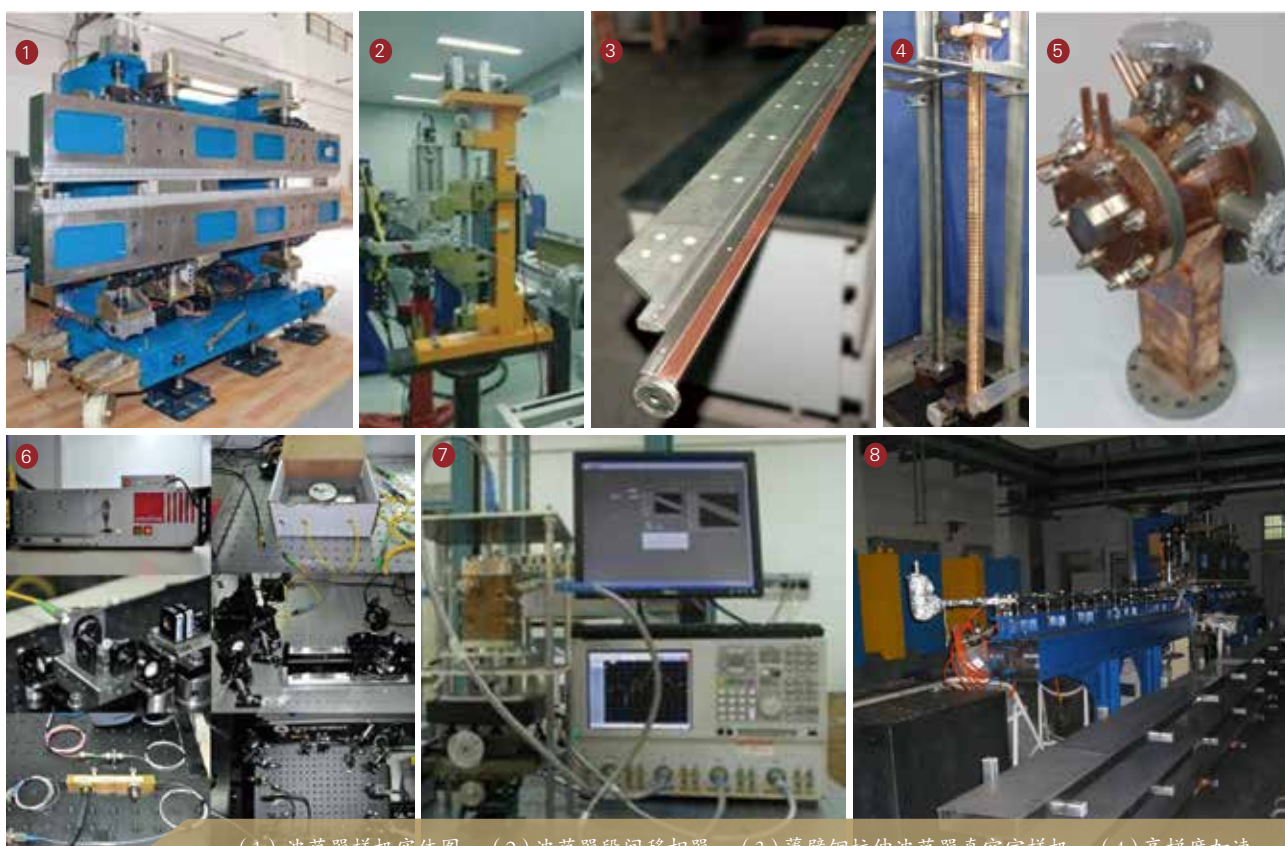


国际上 XFEL 的发展经验，经过不断优化，技术方案先进可行；结合 SDUV-FEL 和大连相干光源开展了比较充分的关键技术预制研究，项目团队已掌握了主要的关键技术，目前工程按计划进行，总体进展良好。预计 2016 年建安工程完成竣工验收，公用设施完成安装和系统调试，装置的主要设备完成加工和安装，并开始调试。



左：SXFEL 加速器隧道；右：SXFEL 技术走廊

关键技术研发和关键设备样机研制



(1) 波荡器样机实体图；(2) 波荡器段间移相器；(3) 薄壁铜拉伸波荡器真空室样机；(4) 高梯度加速结构；(5) 光阴极微波电子枪；(6) 同步辐射样机；(7) CBPM 样机及其测试平台；(8) 波荡器集成单元

自由电子激光新原理研究

设计目标：外种子全相干 X 射线自由电子激光的原理性实验研究

● 回声谐波放大型 (Echo-Enabled Harmonic Generation, EEHG) 自由电子激光可以单级产生比高增

益高次谐波放大型 (High-Gain Harmonic Generation, HGHG) 高得多的有效谐波转换次数，这对于将外种子型自由电子激光推向短波长有很大的意义。

● 中科院上海应用物理所在 EEHG 研究方面有独

特的优势，上海深紫外自由电子激光实验装置（SDUV-FEL）在国际上首次实现了EEHG的受激放大，SXFEL 将有机会把这一优势扩大到更高次谐波和X射线领域。

自由电子激光实验研究基础

中科院上海应用物理所园区的上海深紫外自由电子激光实验装置（SDUV-FEL），是国际上少有的自由电子激光综合实验平台，能够开展自放大自发辐射（SASE）、高增益高次谐波放大（HGHG）、回声型谐波放大型（EEHG）、级联HGHG等多种原理的自

● 在现有场地、经费框架内，EEHG-HGHG 级联的新原理方面取得世界领先的实验成果。

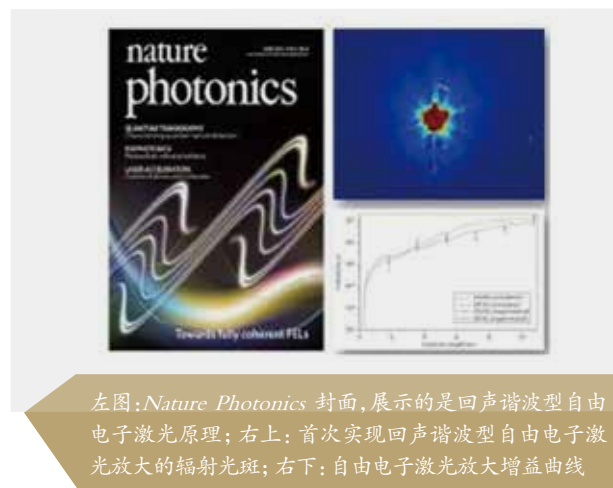
● 作为试验装置，SXFEL 当前设计可以通过微调布局，涵盖多种自由电子激光原理性研究。

由电子激光实验研究。自2009年以来，中科院上海应用物理所自由电子激光团队基于SDUV-FEL，完成了多项自由电子激光实验，取得了一系列国际领先和先进的成果，对建设中的X射线自由电子激光试验装置具有十分重要的实际意义。

回声谐波放大型（EEHG）自由电子激光的首次受激放大

回声谐波放大型（EEHG）自由电子激光由美国SLAC实验室G. Stupakov提出，其突出优势在于利用很小的能量调制就能产生高次谐波微聚束，因此一经提出便得到了国际自由电子激光界的高度关注，开展了一系列的理论研究、方案设计和实验研究。2010年，上海应用物理所和SLAC实验室分别进行了EEHG调制机制的实验研究。2011年，中科院上海应用物理所在世界上首次实现回声谐波型自由电子激光受激放大，实验成果发表在*Nature Photonics* 2012年第1期，并被选为封面文章。

EEHG原理的成功验证为未来全相干X射线自由电子激光开拓了崭新的技术路线。目前，EEHG原理已经成为

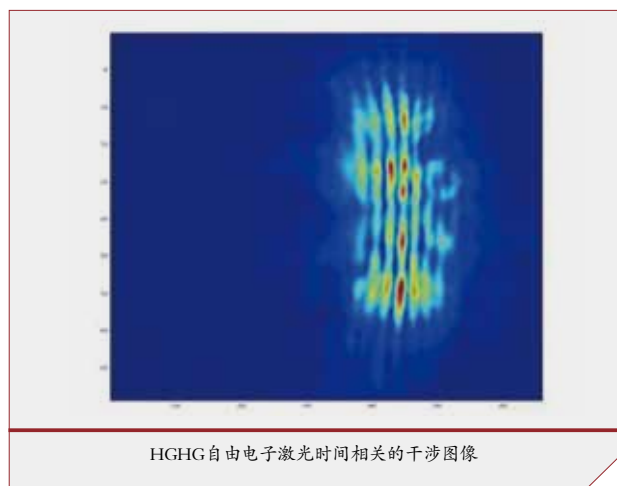


左图：*Nature Photonics* 封面，展示的是回声谐波型自由电子激光原理；右上：首次实现回声谐波型自由电子激光放大的辐射光斑；右下：自由电子激光放大增益曲线

建设中的SXFEL的基本方案之一，争取早日为中国科学界提供基于全相干软X射线光源的大型科学研究平台。

HGHG自由电子激光的连续调谐

理论上，自由电子激光具有波长连续可调谐的优势，但是全相干的HGHG自由电子激光则由于种子激光与电子束流相互作用的复杂性，实现自由调谐十分困难。2012年，中科院上海应用物理所自由电子激光团队结合了激光器光学参量放大、可变间隙波荡器以及HGHG高次谐波选择等自由电子激光技术，经过精心调试，首次实现了大范围连续调谐自由电子激光辐射波长，并进行相干性测量确



HGHG自由电子激光时间相关的干涉图像

认其空间和时间的全相干特性。相关研究成果发表在 *Physics Review* 上。

这一技术的实现对于 HGHG 自由电子激光实验

相位汇聚型 (PEHG) 自由电子激光

针对实验用户的全相干需求，科学家们先后提出了 HGHG 和 EEHG 等外种子自由电子激光机制。但是，外种子自由电子激光的谐波转换效率依然受到直线加速器所产生电子束能散的限制，较难向很短的波长发展。中科院上海应用物理所研究人员于2013年提出了相位汇聚高次谐波放大 (PEHG) 自由电子激光运行模式 (*Physical Review Letters*)，能够有效地克服电子束能散的限制，从而大大提高谐波转换次数。PEHG 为未来全相干 X 射线自由电子激光装置的建设提供了一种非常有吸引力的方案。PEHG 不仅可以提高外种子自由电子激光的谐波转换效率，在粒子加速器领域中有着更为广阔的应用前景。

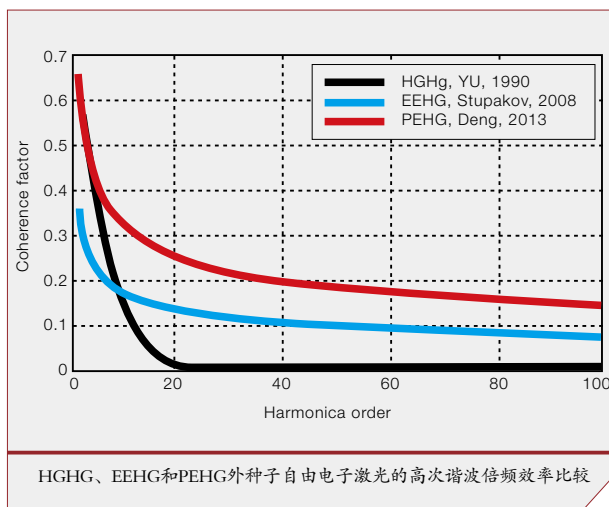
目前研究人员正在准备在 SDUV-FEL 进行相关

自由电子激光中电子束团非线性的被动补偿

自由电子激光装置中的电子束团非线性来源于微波加速，不可避免，非线性会造成自由电子激光增益降低和带宽增加，因此，非线性补偿是一个非常重要的关键技术。2012年，上海应用物理所自由电子激光团队研究发现，通过匹配金属沟槽结构参数，能补偿电子束团纵向相空间的非线性。经过两年的努力，研究人员利用金属沟槽结构，成功地补偿了SDUV-FEL 电子束团的非线性，同时完成了自由电子激光辐射光谱改善和电子束团能散降低的测量。这是国际上首次将金属沟槽结构运行在自由电子激光装置中，该项研究成果发表在 *Physical Review Letters* 上。

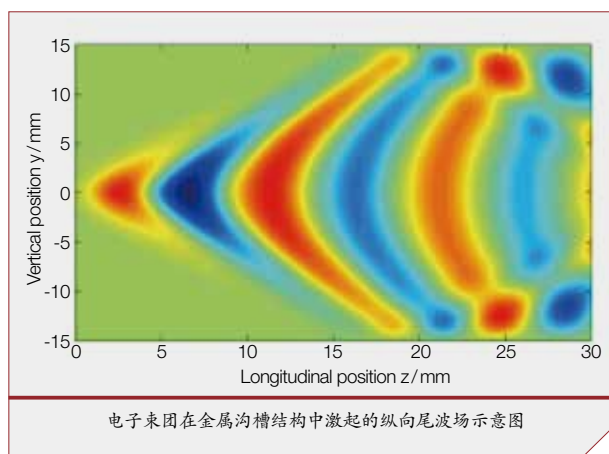
金属沟槽结构在 SDUV-FEL 的成功实验运行，对当前及未来自由电子激光等大科学装置的发展具有重要的实际意义并且产生深远的影响。目前，国际

用户具有重大的实际价值，已经在开工建设的大连极紫外相干光源 (DCLS) 和SXFEL的技术方案中得到应用。



HGHG、EEHG和PEHG外种子自由电子激光的高次谐波倍频效率比较

出光演示实验，并期望将 PEHG 原理应用到软 X 射线自由电子激光用户装置，力争实现从概念原理提出到实验验证，均由我国科学家独立完成。



电子束团在金属沟槽结构中激起的纵向尾波场示意图

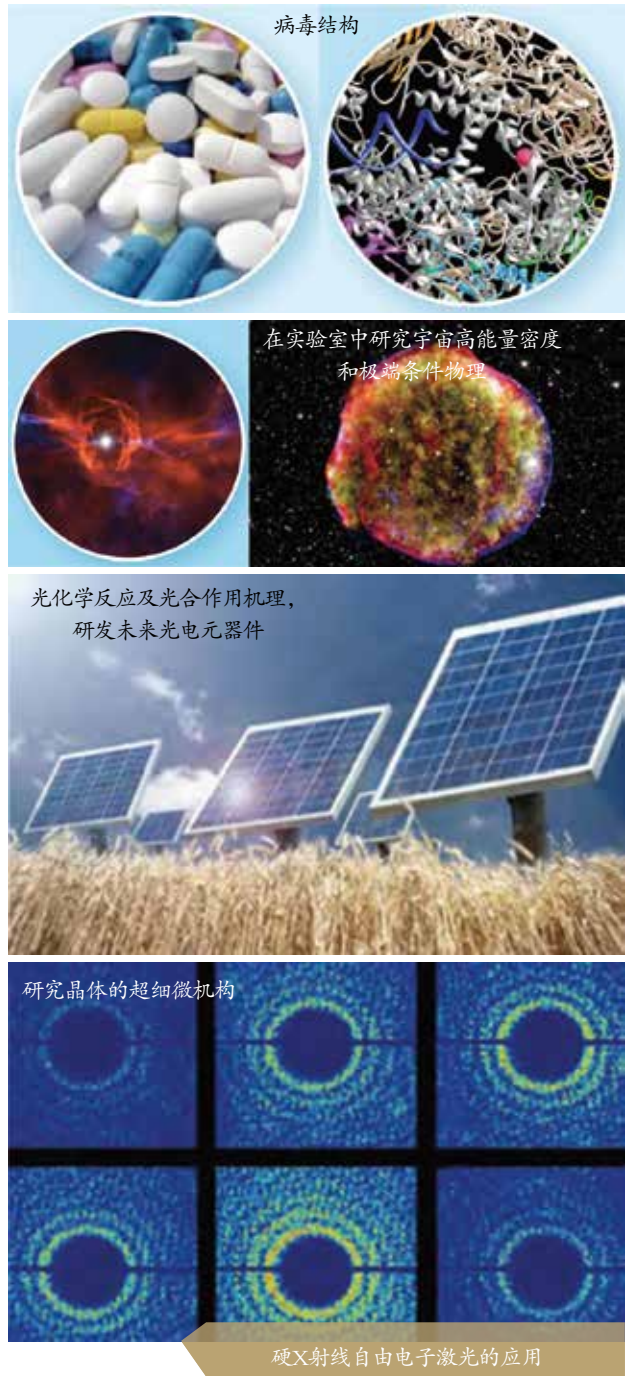
上，美国 SLAC 实验室已经准备将金属沟槽结构应用到其 X 射线 FEL 用户装置中；在国内，金属沟槽结构有望在建设中的大连相干光源、上海 SXFEL 以及上海交通大学超快电子透镜等装置中得到应用。

发展规划

目前国际上已有多个硬X射线自由电子激光用户装置运行或在建，这些装置全部结合第三代同步辐射光源而建，以形成三代+四代的集成布局。按照目前的技术水平，上海光源园区完全能够建设一台硬X射线自由电子激光用户装置，总长控制在550m以内，通过采用国际上较为先进成熟的超低发射度光阴极电子枪、高梯度加速技术和低温真空短周期波荡器技术以得到中心波长为1埃的相干硬X射线自由电子激光。在X射线自由电子激光试验装置（SXFEL）的基础上适当升级，可以在最短时间内建成提供硬X射线和软X射线自由电子激光的用户装置，为科学界提供高亮度、超快和相干的第四代光源。基于超导直线加速器技术的高重复频率X射线自由电子激光是另一个重要的发展方向，上海应用物理所正在开展相关的关键技术研究。

大事记

- 2011年2月1日，SXFEL项目建议书获国家发展改革委批复（发改高技〔2011〕184号）；
- 2013年11月，项目可行性研究报告获国家发展改革委批复，建设期3年；
- 2014年4月，初步设计方案获中科院和教育部共同批复；
- 2014年9月，初步设计概算获国家发展改革委核定；
- 2014年12月30日，开工报告获中科院批复，工程开工奠基；
- 2015年10月4日，项目结构施工全部完成。



PUBLIC INFRASTRUCTURE





公益基础设施

- 中国遥感卫星地面站
- 遥感飞机与航空遥感系统
- 子午工程
- BPL/BPM长短波授时系统
- “实验1”科学考察船
- “科学”号海洋科学综合考察船
- 中国西南野生生物种质资源库