

## 加速器束流动力学期刊论文导读 (2022 年 5 月)

受“京师物理”公众号启发,我们几个同好便萌生将加速器领域的代表性期刊 Physical Review Accelerators and Beams (PRAB) 里的论文进行导读。主要 (但不限于) 导读材料选自 PRAB 近期上线的期刊,与部分美国物理学会 (American Physical Society, APS) 旗下的其它期刊或过去 PRST-AB、Elsevier 的核物理与技术 Nuclear Instruments and Methods (NIM) 期刊等可能涉及加速器方面的论文。与超快电子衍射成像动力学相关的论文则不在此限。

预期论文导读将于每个月初收集后发布,在 [http://faculty.hust.edu.cn/jcytsai/zh\\_CN/article/2191806/content/1551.htm#article](http://faculty.hust.edu.cn/jcytsai/zh_CN/article/2191806/content/1551.htm#article) 可以找到过去的导读文档。限于成员水平,导读仍许多地方有待改进 (正)。任何关于导读内容的指正、建议、意见都欢迎提出、交流,我们期待从交流讨论中激发的可能研究课题。

本期 (2022 年 5 月) 导读成员负责结果统计如下表

成员姓名	导读列表	联系方式
蔡承颖	[1]、[2]、[3]、[4]、[5]	jcytsai@hust.edu.cn

## 目录

1	用于快速优化的自由电子激光振荡器简化模型 [PRAB 20-03] Simplified model for fast optimization of a free-electron laser oscillator	3
2	从低增益至高增益自由电子激光振荡器的简单模型 [IEEE JQE 26/NIMA 296] A simple model of the free-electron-laser oscillator from low into high gain	5
3	电路中坡印廷向量能流的可视化 [AJP 80] Visualizing Poynting vector energy flow in electric circuits	8
4	上海相干光源装置 X 射线自由电子激光振荡器系统设计与三维模拟 [NIMA 895] Systematic design and three-dimensional simulation of X-ray FEL oscillator for Shanghai Coherent Light Facility	10
5	未来加速器是光纤加速器? [NP 7] The future is fibre accelerators	14

## 1 用于快速优化的自由电子激光振荡器简化模型 [PRAB 20-03]

### Simplified model for fast optimization of a free-electron laser oscillator

#### 1.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Kai Li, Minghao Song, and Haixiao Deng (主要机构：上海应用物理所)
- 类型：理论、数值模拟
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.030702>

#### 1.2 摘要

这篇论文给出一种能够简化自由电子激光振荡器 (free electron laser oscillator, FEL) 计算的一维简化模型。与常见的宏粒子模型不同，这篇论文通过解析方法，利用低增益理论，计算光场单次通过波荡器的增益。单次通过增益、功率增长、激光时间脉冲分布与谐振腔失谐 (desynchronism) 等效应能够更快评估。这篇论文应用这个新的分析方法在两种情况，分别为红外自由电子激光振荡器与 X 射线自由电子激光振荡器。与 GENESIS 与 OPC 全数值模拟结果比较并验证理论模型的正确性。

#### 1.3 贡献或创新点

- 创新点：电子逐圈经过 FEL 波荡器时，一般假设没有预群聚，但是随着谐振腔中逐圈增强的光场，对电子束团的群聚强度慢慢改变。这篇论文通过对 Vlasov 方程在不考虑集体效应下的情况，给出纵向相空间分布随纵向传播的解析解

$$\rho(z'; \eta', \theta) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\eta'}}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{\eta'}^2} \left[ \frac{\eta' \operatorname{cn}(z'; C) - \sin \theta \operatorname{sn}(z'; C) \operatorname{dn}(z'; C)}{1 - \cos^2 \frac{\theta}{2} \operatorname{sn}^2(z'; C)} - \eta'_0 \right]^2 \right\}$$

其中， $z', \eta'$  为归一化的纵向相空间坐标， $C^2 = \eta'^2/4 + \cos^2 \theta/2$ ， $\operatorname{cn}$ ,  $\operatorname{sn}$ ,  $\operatorname{dn}$  为 Jacobi 椭圆函数族。有了经过波荡器的相空间分布，就可以得到在该圈波荡器出口的能量转换  $\Delta\eta$  或  $\Delta P$ ，由此可以计算出逐圈增益  $g$ 。

- 贡献：这篇论文详细描述了对于自由电子激光振荡器的半解析分析过程，从初始 shot-noise 等效电场开始 (Section II.A)，单次经过波荡器时的光场增益 (Section II.B)，与谐振腔反射镜的效应，特别是对于 X 射线情况，利用 Bragg 背散射效应时的 (简化情况) 反射系数表示式 (Section II.C)。

## 1.4 其它

相比于利用宏粒子模型的数值模拟可能需要耗时几周，这篇论文提出的方法一般在数分钟至小时计算时间尺度，因此具有实用性。

## 2 从低增益至高增益自由电子激光振荡器的简单模型 [IEEE JQE 26/NIMA 296]

### A simple model of the free-electron-laser oscillator from low into high gain

#### 2.1 基本信息

- 分类：自由电子激光
- 作者：B.W.J. McNeil (Netherland's Center for Laser Research, University of Twente, 荷兰)
- 类型：理论、模拟
- 链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0168900290912376?via%3Dihub>

#### 2.2 摘要

这篇论文给出一种基于康普顿自由电子激光振荡器 (free electron laser oscillator, FELO) 的简单模型，适用于自低增益至高增益的情况。这篇论文利用一维 Maxwell-单摆方程组，得到辐射场与电子的动力学方程，基于查表法，开发了非常便于数值计算方式。另外，还讨论了一系列不同增益  $G$  情况下，FELO 的最大效率。

#### 2.3 贡献或创新点

- 创新点：为了节省在电子束团逐圈与波荡器交互作用的计算时间，这篇论文一次算齐在可能的一系列初始光场振幅情况下的单次通过波荡器出口处的光场，之后利用查表法，对每圈波荡器入口处的光场强度，由插值可以估算该次波荡器出口增益。对于不同的单次通过增益，给出如下图的“数据库”
- 贡献：这篇论文从熟悉的一维 Maxwell-单摆方程组开始，略去了计算细节，原则上能够给出单次通过波荡器的电子与光场的解析解<sup>1</sup>。接着，定义小信号增益 (SSG, small-signal gain) 为

$$\text{SSG} = \frac{(A_G^2 - A_0^2)}{A_0^2}$$

---

<sup>1</sup>比如，对于给定的初始条件，可以通过 Laplace 法解出光场随波荡器坐标  $\tau$  的解。可以参考 Bonifacio 经典论文，在该论文的 Refs. [2]。

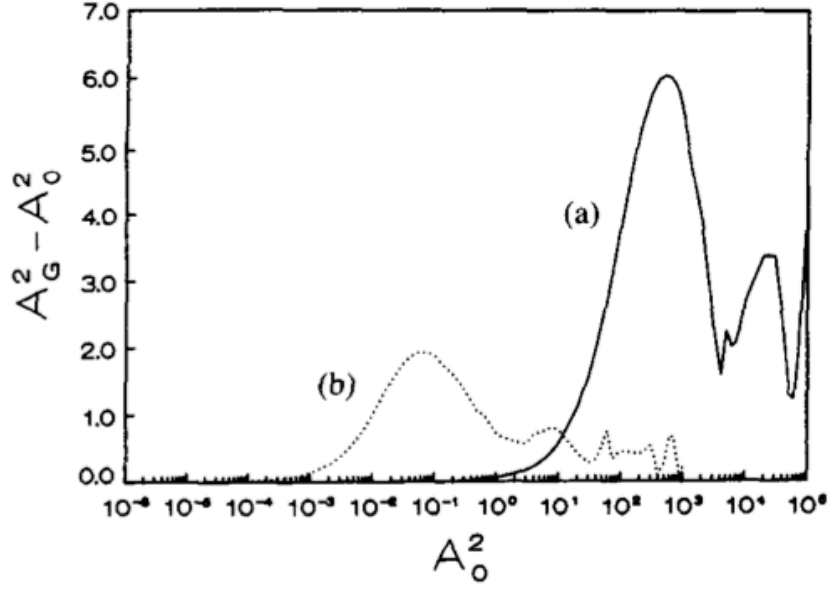


Fig. 3. Difference of output and input scaled intensities ( $A_G^2 - A_0^2$ ) as function of  $A_0^2$  for single-pass amplifier configuration for gain parameters (a)  $G = 0.6$  (low gain) and (b)  $G = 4.0$  (high gain).

与能量转换效率

$$\eta = \rho (A_G^2 - A_0^2)$$

其中,  $\rho = \left[ \frac{K}{4\omega_w} \left( \frac{en_e}{\epsilon_0 m \gamma_r^3} \right)^{1/2} \right]^{2/3}$ 。注意到, 这篇论文里的 energy detuning  $\delta$  隐含在初始条件  $d\theta(\tau=0)/d\tau$  中, 虽然在上面 Maxwell-单摆方程组中没有明显写出来。

这篇论文在 Section II 花了些篇幅讨论单次经过波荡器时, 从低增益过渡到高增益过程, 该论文 Figs. 1 与 2 给出了典型的低增益曲线 (Madey 定理) 与从低增益过渡到高增益时, 增益与 detune 乘积的演变过程。

在 Section II 末尾处描述了如何利用查表法计算每圈电子经过波荡器时, 光场的动力学过程, 值得琢磨。

对于不同增益情况下, 谐振腔反射镜的反射系数  $R$  的设计、选取, 并不总是  $R \leq 1$  越大越好。仅有在当低增益情况下,  $R \rightarrow 1$  越好。对于高增益情况,  $R$  一般不能太大。否则, 谐振腔能量转换效率还没增加之前, 电子束就在波荡器中达饱和。

## 2.4 其它

这篇论文的介绍部分有关于低增益 ( $G < 1$ ) 与高增益 ( $G > 1$ ) 自由电子激光振荡器的区别, 指的琢磨。另外, 这篇论文考虑的是忽略空间电荷效应下的康普顿自由电子

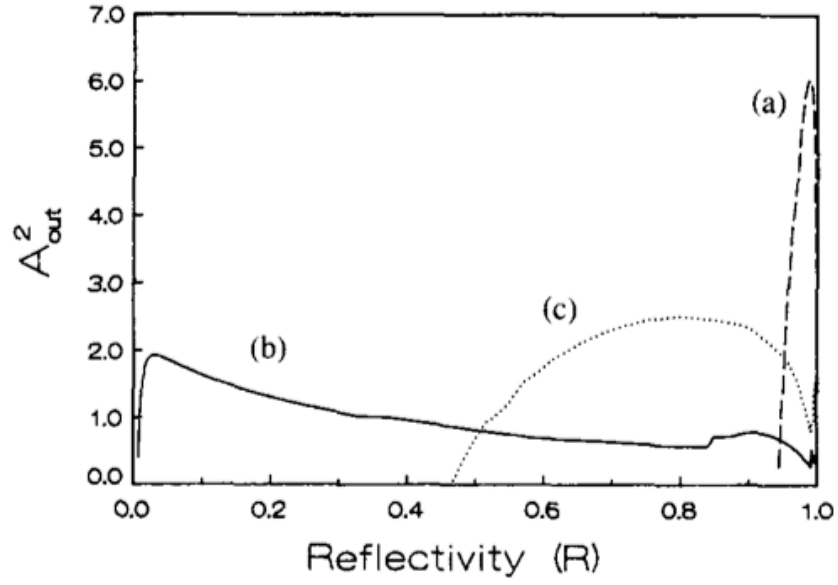


Fig. 5. Steady-state scaled output intensities  $A_{\text{out}}^2$  from FEL oscillator as function of output mirror reflectivity  $R$  for (a)  $G = 0.6$ , (b)  $G = 4.0$ , and (c)  $G = 1.5$ .

激光振荡器。

### 3 电路中坡印廷向量能流的可视化 [AJP 80]

#### Visualizing Poynting vector energy flow in electric circuits

##### 3.1 基本信息

- 分类：电磁辐射
- 作者：Noah A. Morris and Daniel F. Styer (主要机构：Oberlin College)
- 类型：教学
- 链接：<https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.3679838?journalCode=ajp>

##### 3.2 摘要

这篇论文讨论一个模拟在包含电池与负载电阻的简单电路中，坡印廷向量 (Poynting vector) 能流从电池到负载的过程，强调能流不是发生在导线里，而是在导线附近周围的空间中。模拟程序 `CircuitSurveyor` 能够帮助想象这个有些违反直觉的物理过程。

##### 3.3 贡献或创新点

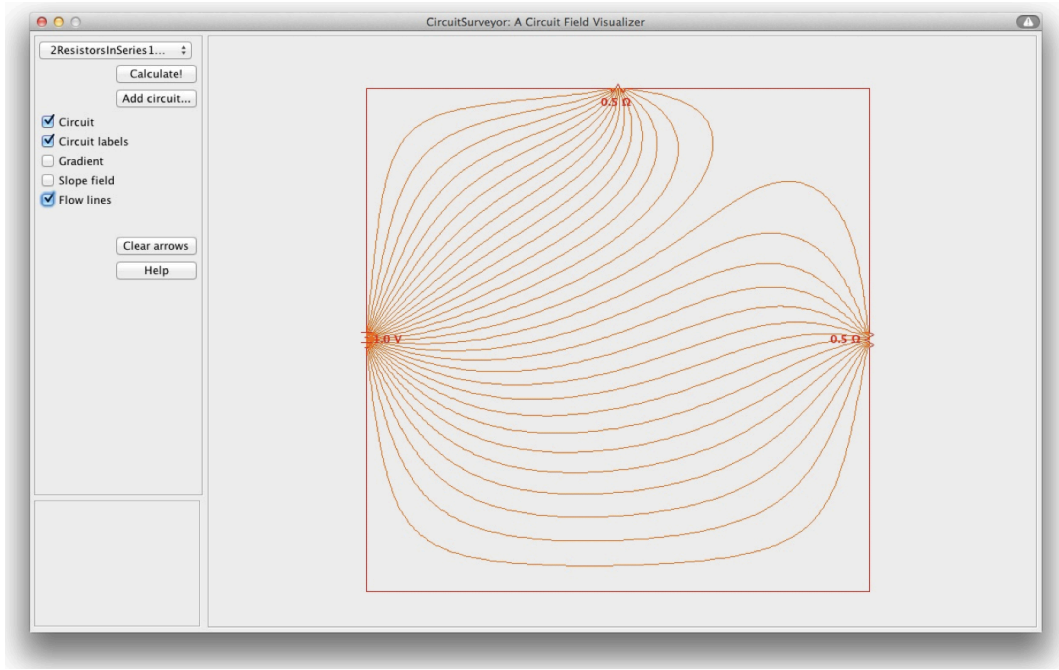
- 创新点：这篇论文通过可视化方法，将抽象的坡印廷向量能流  $\mathbf{S}$  的概念变得真实，一定程度上帮助理解坡印廷向量。
- 贡献：坡印廷向量定义为

$$\mathbf{S}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

以电路为分析对象，恒定电流产生电场、磁场，其对应的坡印廷向量从提供能量的源头—电池—向负载方向传输。但是，这个能量传输方向并不全是沿着导线，能量流也不是在导线里面，而是通过自由空间传输。这个概念对于初学时变电磁场的同学而言可能较难接受，或违反直觉。

这篇论文作者设计了一个 Java 程序，给定几种简化的电路模型，计算在恒定电流情况下，二维空间中各点的电场  $\mathbf{E}$ 、磁场  $\mathbf{B}$ 、能流密度  $\mathbf{S}$  等，并以可视化方式呈现。如下图。





### 3.4 其它

这篇论文计算电磁场的方式不是按照典型的有限差分法，而是采 Kirchhoff 法，先将电路架构边缘的电流值算出。然后，利用 relaxation 法，将二维电流平面中的电位算出。磁场的计算则是假设这个二维电路为三维电路的一个“切片”，因此就像一个无限长柱形螺线管 (solenoid)，磁场有  $\mu_0 \frac{1}{d} i$ 。实际情况下，三维场与二维场仍稍有区别，在这篇论文的 Section II 结尾有些讨论。

## 4 上海相干光源装置 X 射线自由电子激光振荡器系统设计与三维模拟 [NIMA 895]

### Systematic design and three-dimensional simulation of X-ray FEL oscillator for Shanghai Coherent Light Facility

#### 4.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Kai Li, Haixiao Deng (上海应用物理研究所, SINAP)
- 类型：理论、模拟
- 链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900218304364>

#### 4.2 摘要

上海相干光源装置 (Shanghai Coherent Light Facility, SCLF) 是最近提出的、面向用户的近连续模式 (quasi-CW) 硬 X 射线自由电子激光装置。由于高重频、高品质电子束, SCLF 考虑自由电子激光振荡器 (XFEL oscillator, XFELO) 运行模式。这篇论文讨论关于 XFELO 的整体设计, 包含波荡器、X 射线谐振腔与电子束参数优化等。

此外, 这篇论文还开发了一个三维 X 射线晶体 Bragg 衍射计算程序, 称 BRIGHT, 可以与 GENESIS、OPC 很好地结合, 进行 XFELO 相关的数值模拟。这篇论文从理论分析与数值模拟分析讨论基于 SCLF 设计参数的 XFELO 效能。

#### 4.3 贡献或创新点

- 贡献：过去, 大多数 X 射线 FEL 运行基于 SASE 模式, 其纵向相干性很差。最近, 利用自种子模式, 相干性可以得到约 50 倍的增进, 但是辐射脉冲间的能量起伏差异或抖动 (pulse-to-pulse energy jitter/fluctuation) 却仍达到 50%。

一种增进纵向相干性的方案基于 FEL 振荡器 (XFELO) 操作模式。基于 FELO 概念在相对较长的波长段已经有实验证实, 但是在 X 射线目前还没有实验验证, 由于缺乏在 X 射线波段的高反射率镜子。近年, 基于晶体 Bragg 衍射机制的反射镜

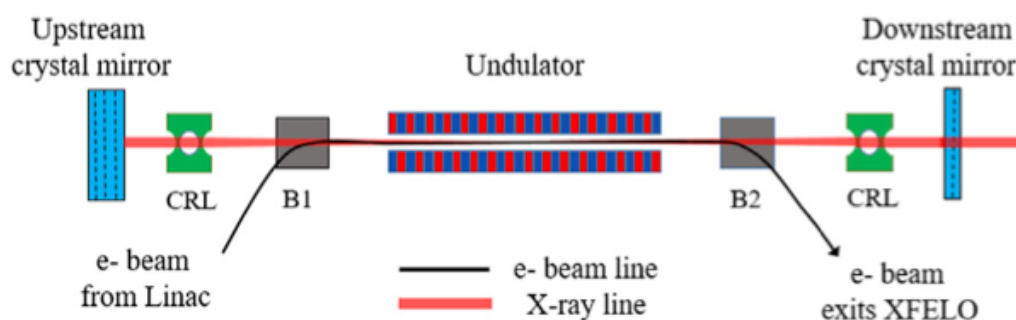
成功设计使得 XFEL 重新获得重视。

基于 SCLF 超导直线加速器 XFEL 设计的一些参数如下表：

**Table 1**  
Main parameters of the SCLF.

Parameter	Value
Beam energy	8 GeV
Relative energy spread	0.01%
Repetition rate	1 MHz
Peak current (low mode)	10, 20, 30 A
Bunch charge (low mode)	20 pC
Normalized emittance (low mode)	0.2 mm mrad
Peak current (high mode)	0.5, 1, 1.5 kA
Bunch charge (high mode)	100 pC
Normalized emittance (high mode)	0.4 mm mrad
Undulator period length	26 mm
Undulator module length	5 m
XFEL photon energy	14.3 keV

示意图如下图，其中，谐振腔长度 (cavity length) 约为 150 m 或 cavity round-trip length 300 m。为了使谐振腔能够达到光学稳定，需要一组 X 射线组合折射透镜 (compound refractive lenses, CRL)，即，图中绿色部分。



**Fig. 1.** Schematic view of the XFEL for the SCLF.

XFEL 设计包含两个面向：

- 横向：电子束横向分布由波荡器中的 FODO 磁聚焦结构决定，光场横向分布与反射镜设计有关。这些会影响电子束的单次经过增益。
- 纵向：波荡器长度决定放大增益，晶体反射率决定、优化输出脉冲能量。

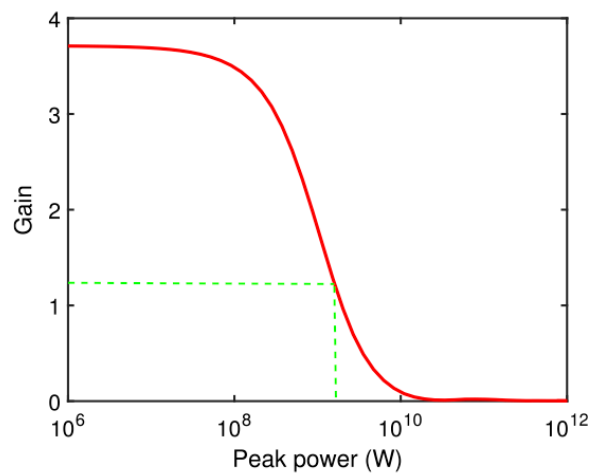
对于每个分段波荡器间，穿插 FODO 结构。四极铁参数设定目标使电子束横向尺寸与光场匹配。这篇论文选择横向最小与最大尺寸范围约为  $15\ \mu\text{m}$  至  $25\ \mu\text{m}$ 。

光学谐振腔设计要求光学稳定，通过在谐振腔内加一组 X 射线组合折射透镜，并调整适当距离。分析利用 ABCD 矩阵。

波荡器长度的设计要求不能太短，否则无法弥补光场在反射镜往返时的损耗。但是，也不能太长，否则振荡器能输出的辐射脉冲能量太低。分析知道，最大输出的辐射脉冲能量与谐振腔内波荡器周期数呈反比。

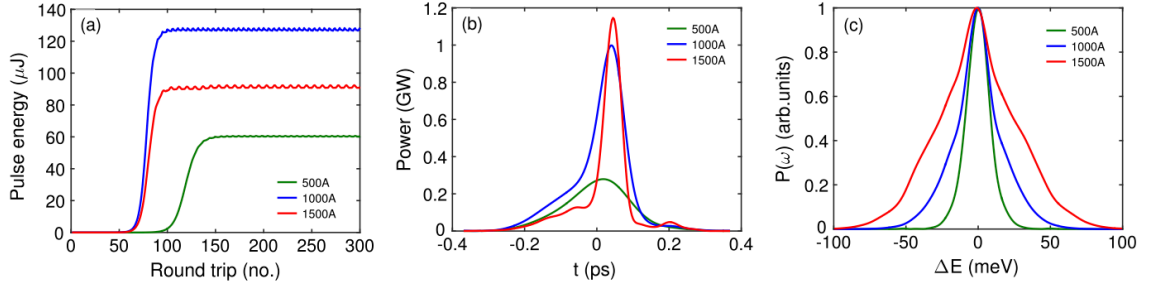
X 射线反射镜的设计根据晶体 Bragg 衍射原理，反射响应函数与晶体厚度、入射角、激发长度 (excitation length) 有关。细节参考该论文 §2.4。

此外，在振荡器设计中，单次经过增益与谐振腔内的光场强度有关，如下图。当谐振腔内的光场强度太大时，对电子束调制过强，引起电子束纵向同步振荡 (synchrotron motion)，增益将下降。当谐振腔内的光场强度大到足以引起电子束纵向同步振荡时，且与振荡器总损耗相等时，称振荡器达平衡。

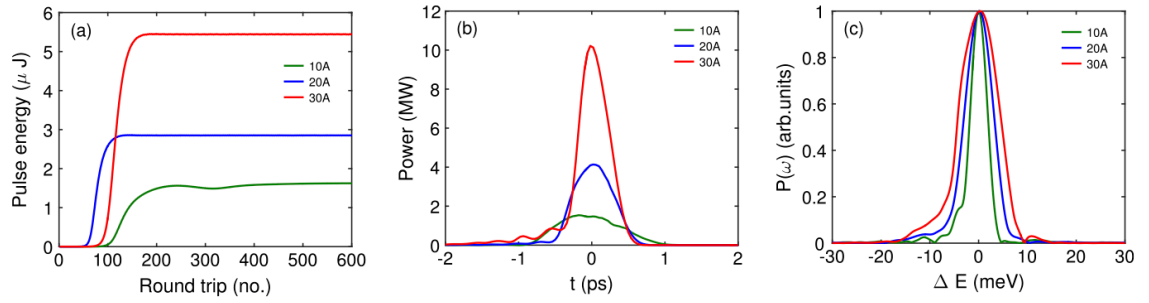


**Fig. 6.** Variation of gain at different radiation power values. The green line shows a typical XFEL round trip loss of  $\sim 57\%$  (including 20% output coupling), and the saturation peak power inside the cavity is  $\sim 1.5\ \text{GW}$ ; thus, the output power is  $0.3\ \text{GW}$ . (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

这篇论文给出两种 XFEL 设计：高电流模式与低电流模式，模拟结果如下图。高电流模式需要在谐振腔中安装三段波荡器，每段  $5\ \text{m}$ 。低电流模式则视操作电流而定，需要六至十段，每段  $5\ \text{m}$ 。



**Fig. 12.** Results for high peak current mode XFEL: increase in output energy (a), output power profile (b), and spectrum (c) for different electron beam peak currents.



**Fig. 13.** Results of the low peak current mode XFEL: increase in output energy (a), output power profile (b), and spectrum (c) for different electron beam peak currents.

图 1: 图中不同电流表征不同束长, 假设束团总电荷量固定。对高电流模式而言, 电流太高则束长太短, 束团频谱太宽, 影响辐射场频谱, 最终影响输出能量。高电流模式的峰值输出功率与电流呈正比, 但是输出能量则存在最优解。

## 5 未来加速器是光纤加速器？ [NP 7]

### The future is fibre accelerators

#### 5.1 基本信息

- 分类：下一代加速器
- 作者：Gerard Mourou, Bill Brocklesby, Toshiki Tajima and Jens Limpert (主要机构：Ecole Polytechnique, 巴黎综合理工学院, 法国)
- 类型：评述
- 链接：<https://www.nature.com/articles/nphoton.2013.75/>

#### 5.2 摘要

由一巨大阵列组成的光纤激光能不能驱动作为下一代粒子加速器？目前 International Coherent Amplification Network (ICAN) 项目正在推进此课题。

#### 5.3 贡献或创新点

强激光技术的几个里程碑：

- 1985 年，chirped pulse amplification (CPA)，超短激光脉冲强度达  $10^{18} \text{ W cm}^{-2}$ 。能够驱使电子达相对论速度。
- 随后，超短激光脉冲强度继续推进到  $10^{22} \text{ W cm}^{-2}$ 。能够驱使质子或离子达相对论速度。
- HERCULES laser at University of Michigan、ELI (the Extreme Light Infrastructure project)

这些工作表征基于激光的加速器能够提供更紧凑、更经济的高能粒子加速器。加速器社群对激光的终极目标为：高峰值功率、高平均功率 (高重频或连续波模式)、高能量效率的激光。

至 2004 年<sup>2</sup>，已经能够做到连续波模式光纤激光产生平均功率至 kW 与能量效率 30%。其它好处包含：

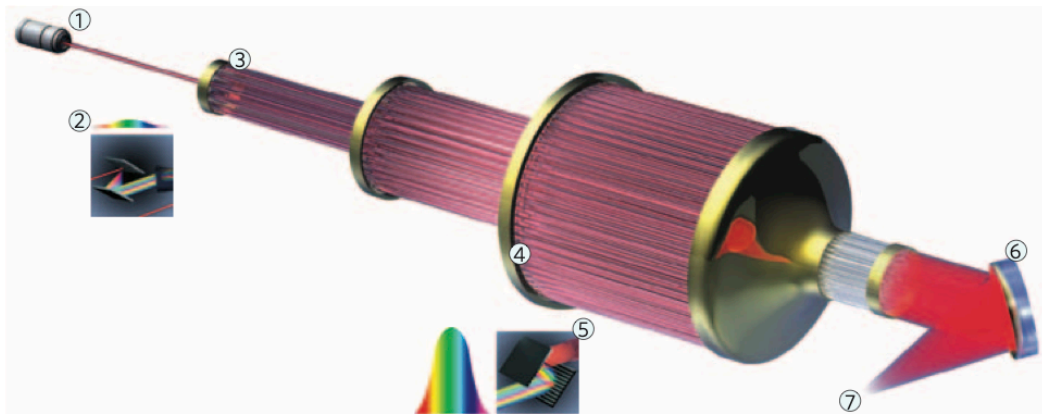
---

<sup>2</sup>用来泵浦光纤激光地半导体激光二极管成本低、效率高，但是光场品质较差。光纤激光能够很好地转换光场品质。

- 在光纤中产生的热不是问题，因为表面积<sup>3</sup>较大，热可以很快散到表面，单位长度的热较小。
- 光纤中填充的 silica 具有较好的特性。
- 比起折射率改变，光导主宰光纤激光传播行为。
- 目前工业上可以做到：平均功率 10 kW、单模 CW 模式、衍射极限。

目前挑战：要求高峰值功率时，当光纤激光强度足够高时，折射率开始出现非线性效应，导致超短光脉冲拉伸、变形。目前大概可以产生 250 fs，峰值功率大约 GW 量级。目标：10 ~ 100 GW。

怎么做到？目前 International Coherent Amplification Network (ICAN) 项目正在推进此课题。项目基于相干放大网络原理，如下图。



**Figure 1** | Principle of a coherent amplifier network. An initial pulse from a seed laser (1) is stretched (2), and split into many fibre channels (3). Each channel is amplified in several stages, with the final stages producing pulses of ~1 mJ at a high repetition rate (4). All the channels are combined coherently, compressed (5) and focused (6) to produce a pulse with an energy of >10 J at a repetition rate of ~10 kHz (7).

## 5.4 其它

光纤激光覆盖波长范围很广，参考[https://www.iberoptics.com/en/cw-fiber-amplifiers\\_440](https://www.iberoptics.com/en/cw-fiber-amplifiers_440)。

关于国际相干放大网络项目，可参考之前官方网页介绍 <https://cordis.europa.eu/project/id/284437> 或中文介绍 <https://www.researching.cn/ArticlePdf/m00002/2017/54/1/010002.pdf>。

<sup>3</sup>更准确说，是表面积与体积比值。对光纤结构，减小半径则表面积与体积比值增加。