

加速器束流动力学期刊论文导读 (2022 年 7 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 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 7 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]、[6]	jcytsai@hust.edu.cn

目录

1	带电粒子经过短周期深沟结构的辐射 [NIMA 1028] Radiation of a charged particle bunch moving along a deeply corrugated structure with a relatively small period	3
2	X 射线自由电子激光设计提议 [Optics Communications 50] Proposal for a free electron laser in the X-ray region	9
3	基于再生放大机制的全相干 X 射线自由电子激光 [PRL 96] Fully Coherent X-Ray Pulses from a Regenerative-Amplifier Free-Electron Laser	12
4	A Brief History of Electromagnetism 电磁学简史	16
5	一种自由电子激光振荡器的增益级联模式 [PRAB 20-11] Gain cascading scheme of a free-electron-laser oscillator	17
6	基于 GeV 量级能量回收直线加速器的自由电子激光振荡器模拟 [WEPC34] Simulation of an x-ray FEL oscillator for the multi-GeV ERL in Japan	21

1 带电粒子经过短周期深沟结构的辐射 [NIMA 1028]

Radiation of a charged particle bunch moving along a deeply corrugated structure with a relatively small period

1.1 基本信息

- 分类：电磁辐射
- 作者：Evgenii S. Simakov and Andrey V. Tyukhtin (Saint Petersburg State University)
- 类型：理论、数值模拟
- 链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900222000535?via%3Dihub>

1.2 摘要

这篇论文讨论当电子束团通过一个平面型、具有周期凹槽结构时产生的电磁辐射。讨论的辐射波长范围为比周期凹槽大得多的情况。这种情况下，周期凹槽结构可以由“等效边界条件法”(equivalent boundary condition, EBC) 分析。此外，假设凹槽深度与波长差不多。理论分析得到的解析解在渐进条件下可以进一步化简。分析发现，在凹槽结构表面传递的是表面波 (surface wave)，而不是 volume radiation。当凹槽深度不是太深时，其辐射频谱特性可以用来作为测量束长的应用。束团经过此周期结构的能量损失与辐射能谱也在这篇论文最后简单讨论。

1.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇论文利用“等效边界条件法”，结合 Hertz 位函数，求解电子束团经过理想导体金属周期结构的电磁辐射散射。通过将散射后的电磁辐射场分为两部分：forced potential $\Pi^{(i)}$ 与 free potential $\Pi^{(r)}$ ，先列写个别应该满足的波方程，再分别求解这两部分的位函数。
- 贡献：这篇论文在 Introduction 部分介绍了两种分析电磁辐射散射常见的两种边界条件法：在长波情况，有“平均边界条件法”(average boundary condition, ABC) 与“等效边界条件法”(equivalent boundary condition, EBC)。ABC 法适用于考虑金属结构为有限电导率的情况；EBC 法则只适用于理想导体。但是，ABC 法仅适用

于浅凹槽情况；EBC 法则没有此限制。

在金属分界面边界上，EBC 可以写为

$$E_{\omega z}|_{y=0} = \eta^m H_{\omega x}|_{y=0}, \quad E_{\omega x}|_{y=0} = 0$$

其中， $\eta^m = i \frac{d_2}{d} \frac{\text{tg}(k_0 d_3)}{1 - k_0 d l \text{tg}(k_0 d_3)}$ 。考虑的金属结构如下图所示。

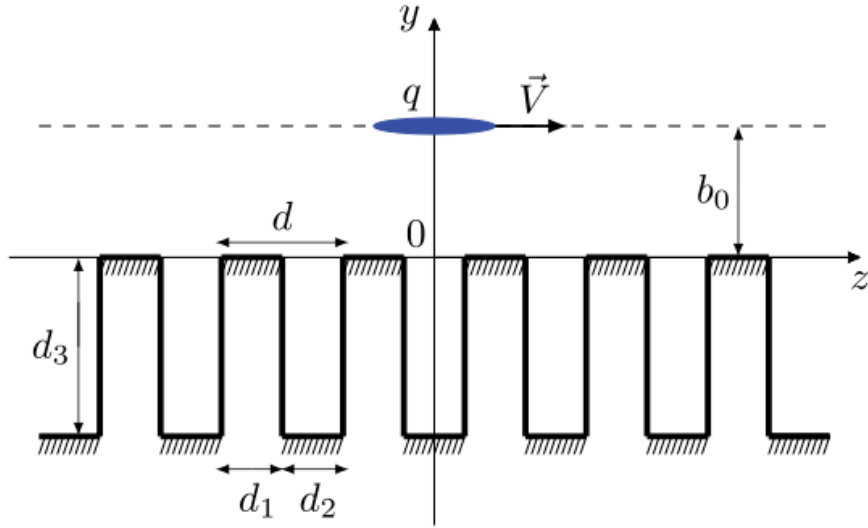


Fig. 1. The corrugated surface and a moving charge.

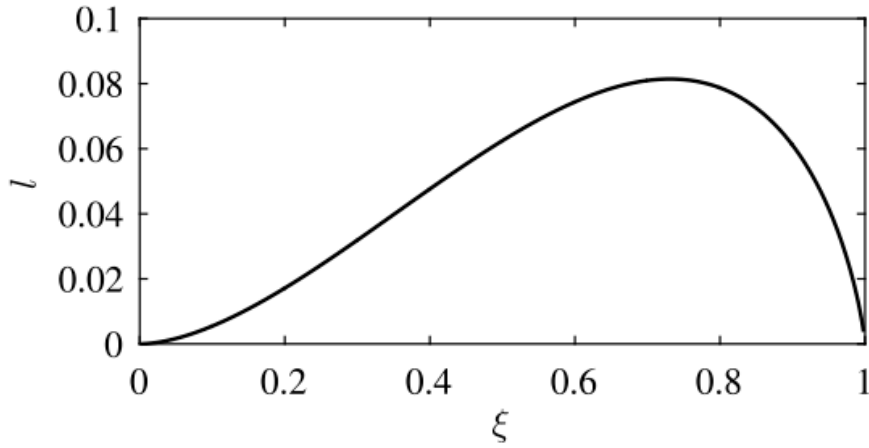


Fig. 2. Dependence $l(\xi)$.

接着，在求解电磁辐射前，这篇论文利用 Hertz 位函数，其满足如下形式的麦克斯韦波方程

$$(\Delta + k_0^2) \Pi_\omega = -\frac{4\pi i}{ck_0} \mathbf{j}_\omega$$

其中, $\rho = q\delta(x)\delta(y - b_0)\kappa(z - Vt)$, $\mathbf{j} = \rho\mathbf{V}$ 。此外, Hertz 位函数可以拆解成两部分: forced 与 free, 及其傅立叶变换

$$\Pi = \Pi^{(i)} + \Pi^{(r)} = \int_{-\infty}^{+\infty} (\Pi_{\omega}^{(i)} + \Pi_{\omega}^{(r)}) \exp(-i\omega t) d\omega$$

电场与磁场可以表示为

$$\mathbf{E}_{\omega} = \nabla \text{div} \Pi_{\omega} + k_0^2 \Pi_{\omega}, \quad \mathbf{H}_{\omega} = -ik_0 \text{rot} \Pi_{\omega}$$

注意, $\nabla \text{div} \Pi_{\omega} = \nabla(\nabla \cdot \Pi_{\omega})$ 、 $\text{rot} \Pi_{\omega} = \nabla \times \Pi_{\omega}$ 。

基于 Hertz 位函数的波方程可以求解, 对于 forced 位函数, 有

$$\begin{aligned} \Pi_{\omega x}^{(i)} &= \Pi_{\omega y}^{(i)} = 0 \\ \Pi_{\omega z}^{(i)} &= -\frac{q\tilde{\kappa}}{ck_0} \exp\left(i\frac{k_0 z}{\beta}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} dk_x \frac{\exp(ik_x x + ik_{y0}|y - b_0|)}{k_{y0}} \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} k_{y0} &= i\sqrt{k_x^2 + k_0^2 \frac{1 - \beta^2}{\beta^2}}, \quad \text{Im } k_{y0} > 0 \\ \tilde{\kappa} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} d\zeta \kappa(\zeta) \exp\left(-i\frac{k_0}{\beta}\zeta\right), \quad \zeta = z - Vt \end{aligned}$$

我们更感兴趣的是 free 位函数 $\Pi_{\omega}^{(r)} = \Pi_{\omega x}^{(r)}\mathbf{e}_x + \Pi_{\omega z}^{(r)}\mathbf{e}_z$, 有

$$\begin{Bmatrix} \Pi_{\omega x}^{(r)} \\ \Pi_{\omega z}^{(r)} \end{Bmatrix} = -\frac{q\tilde{\kappa}}{ck_0} \exp\left(i\frac{k_0 z}{\beta}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} dk_x \begin{Bmatrix} R_x \\ R_z \end{Bmatrix} \frac{\exp[ik_x x + ik_{y0}(y + b_0)]}{k_{y0}}$$

其中,

$$\begin{aligned} R_x &= -\frac{2\beta^{-1}k_0 k_x \eta_0^m}{k_0 \sqrt{k_x^2 + k_0^2 \frac{1 - \beta^2}{\beta^2}} + (k_x^2 - k_0^2)\eta_0^m} \\ R_z &= -\frac{k_0 \sqrt{k_x^2 + k_0^2 \frac{1 - \beta^2}{\beta^2}} - (k_x^2 - k_0^2)\eta_0^m}{k_0 \sqrt{k_x^2 + k_0^2 \frac{1 - \beta^2}{\beta^2}} + (k_x^2 - k_0^2)\eta_0^m} \end{aligned}$$

其中, $\eta_0^m = \text{Im } \eta^m$ 。

关于进一步在渐进情况下化简以上 free 位函数的积分, 需要用到复变函数围道积分, 此处不论。其中, 发现只有沿着金属凹槽附近的解能够在远处携带能量, 称为表面波 (surface wave), 其余为 volume radiation, 在远处不携带能量。

在时域中, 不同电子速度与不同束团长度参数情况下, 有下图 Fig. 6 与 Fig. 7 的结果。注意, 可以通过对此辐射场在不同场振幅峰值处的量测反推电子束团长度。

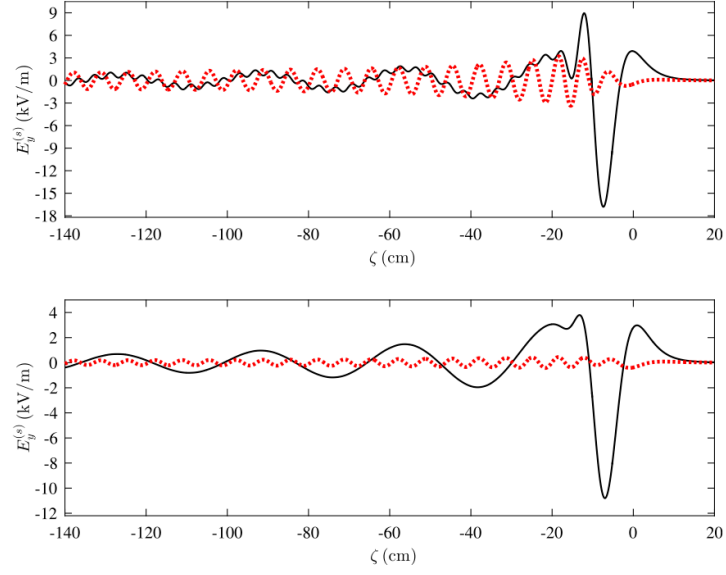


Fig. 6. The component of the surface wave $E_y^{(s)}$ depending on coordinate $\zeta = z - Vt$ for the Gaussian bunch with $q = 1$ nC. The bunch velocity is $\beta = 0.99$ (solid black curves) and $\beta = 0.8$ (dotted red curves). The bunch length is $2\sigma = 3$ cm (top plot) and $2\sigma = 5$ cm (bottom plot). Parameters: $d = 0.05$ cm, $d_2 = 0.04$ cm, $d_3 = 1$ cm, $b_0 = 3$ cm, $x = 10$ cm, $y = 0$.

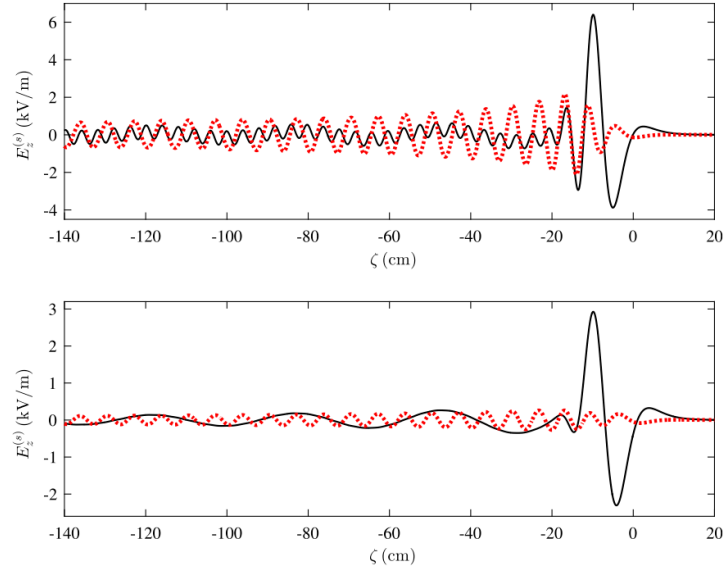


Fig. 7. The same as in Fig. 6 for component $E_z^{(s)}$.

这篇论文 Section 5.2 讨论这种电磁辐射的能量与能谱分布。考虑在 $\pm x_0$ 区间内，沿 z 单位长度辐射场的能量可以写成

$$\frac{dW^{(s)}}{dz_0} = \frac{1}{V} \frac{dW^{(s)}}{dt} = \frac{2}{c\beta} \int_{-\infty}^{+\infty} dz \int_0^{+\infty} dy S_x \Big|_{x=x_0>0}$$

其中，

$$S_x = \frac{c}{4\pi} (E_y^{(s)} H_z^{(s)} - E_z^{(s)} H_y^{(s)})$$

注意，此处采 CGS 单位制。

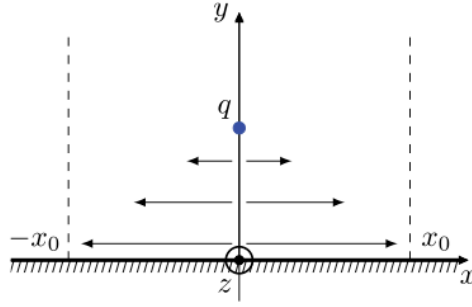


Fig. 9. The energy flow of the surface waves.

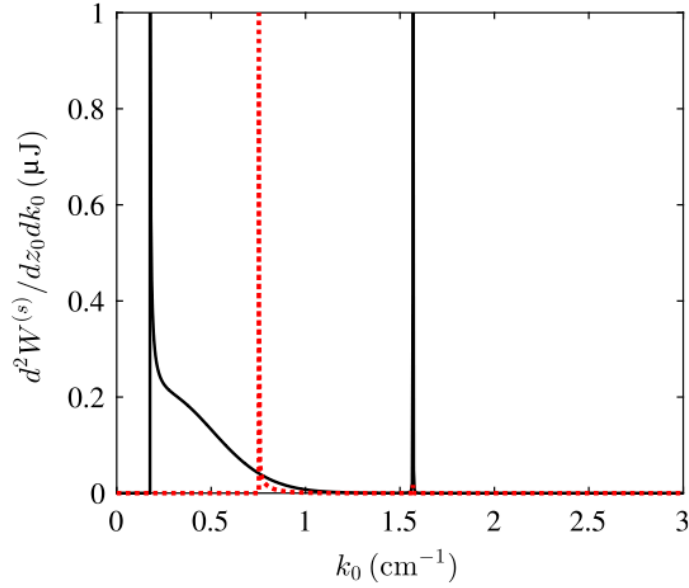


Fig. 10. The spectral density of the energy $d^2W^{(s)}/dz_0 dk_0$ depending on wavenumber $k_0 = \omega/c + i\delta$ ($\delta \rightarrow +0$) for the Gaussian bunch with $q = 1$ nC and $2\sigma = 3$ cm. The bunch velocity is $\beta = 0.99$ (solid black curve) and $\beta = 0.8$ (dotted red curve). Parameters: $d_3 = 1$ cm, $d = 0.05$ cm, $d_2 = 0.04$ cm, $b_0 = 3$ cm.

1.4 其它

这篇论文区分了这里的电磁辐射与 Smith-Purcell 辐射的区别。Smith-Purcell 辐射为金属周期结构中，不同周期的衍射辐射的叠加。此处的长波辐射为表面波，由于结构的各向异性导致。两者发生的共振条件不同。在非相对论情况下，长波辐射与 Smith-Purcell 类似。

2 X 射线自由电子激光设计提议 [Optics Communications 50]

Proposal for a free electron laser in the X-ray region

2.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：R. Colella (Purdue University) and A. Luccio (BNL)
- 类型：概念设计
- 链接：[https://doi.org/10.1016/0030-4018\(84\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(84)90009-9)

2.2 摘要

这篇论文是早期自由电子激光 (free electron laser, FEL) 概念被提出且实验上演示不久后，在 X 射线频段首次提出基于晶体作为低损耗反射镜的振荡器概念¹。这篇论文探讨实现 $2 \sim 3 \text{ \AA}$ 的可能性，给出初步设计参数，包含加速器部分与基于晶体作为低损耗反射镜的设计。

2.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇论文考虑在 X 射线波段自由电子激光振荡器操作模式的可行性。关键在于如何在 X 射线波段设计一高反射率的光学谐振腔。下图 Fig. 1 给出两种可能的构型。

对第一种情况，利用单晶硅 (single crystal silicon)，当入射角接近 90 度时，通过对 X 射线动力学衍射分析，适当选取晶体切割面 [如：(422)] 与入射面，可以得到接近 0.91 的反射率。在当时，一般对 X 射线动力学衍射的研究多数考虑掠射情况，这篇论文提到作者利用自主开发的数值模拟程序计算接近 90 度角度附近的 X 射线衍射。

在图 Fig. 1 中的两种构形中，镜面为球面，尽管实际上制备方式为平面硅板折弯形成，与完美的球面存在差异，但是这篇论文里提到，这种差异导致的结果应可以忽略不计。

¹当时，自放大自发辐射 (self-amplified spontaneous emission, SASE) 概念也被提出。后来，SASE 的发展占据主导地位，而 XFEL 振荡器的发展则相对滞后，一直到 2008 年之后才又得到较多关注。

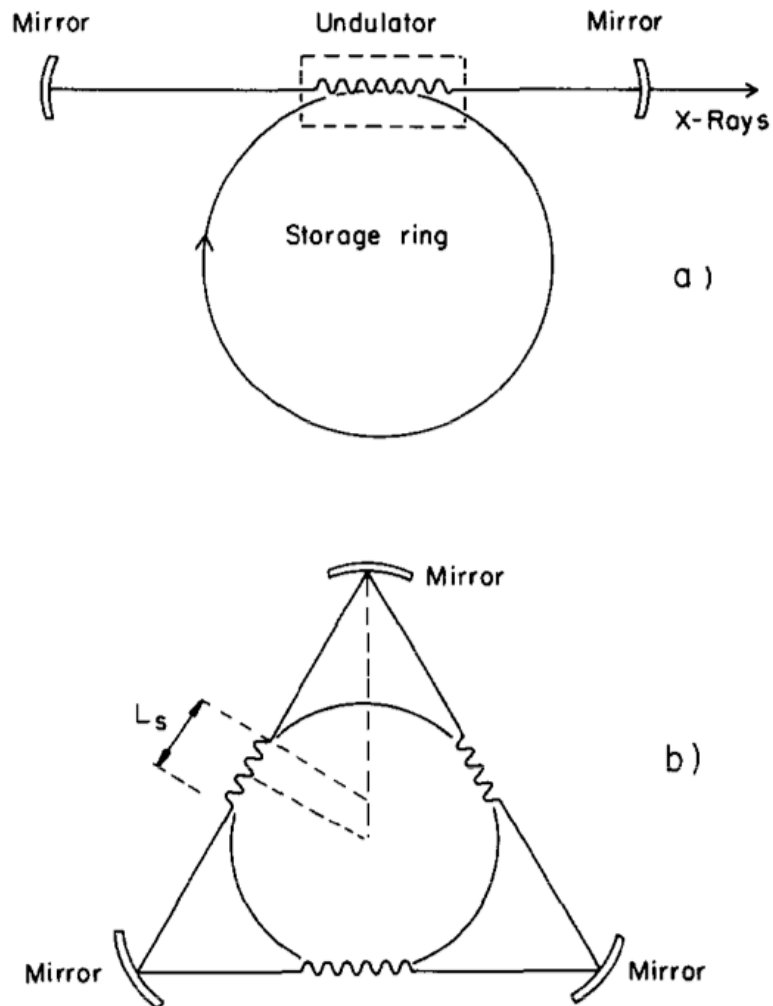


Fig. 1. Schematic diagrams of Free Electron Lasers built around storage rings. Part (a): in the optical cavity the photons are traveling back and forth. Part (b): this is a ring laser. The photons are traveling in one direction only.

图 Fig. 1 中的第二种构形与第一种构形的差别为，X 射线入射角不同。此外，对辐射场而言，此种构形中，辐射场在谐振腔中来回反弹过程，每一面反射镜造成的损耗可能较小。在此种构形中，入射角约为 60 度，恰好在 60 度时，其反射率可以高达 94%，虽然偏离这个角度之后衰减很快²。

- 贡献：当入射角在 90 度附近时，不同波长的 X 射线其动力学衍射导致的反射率计算结果如下图 Fig. 2。注意，其中 $1^\circ = 60 \text{ minute}$ 。

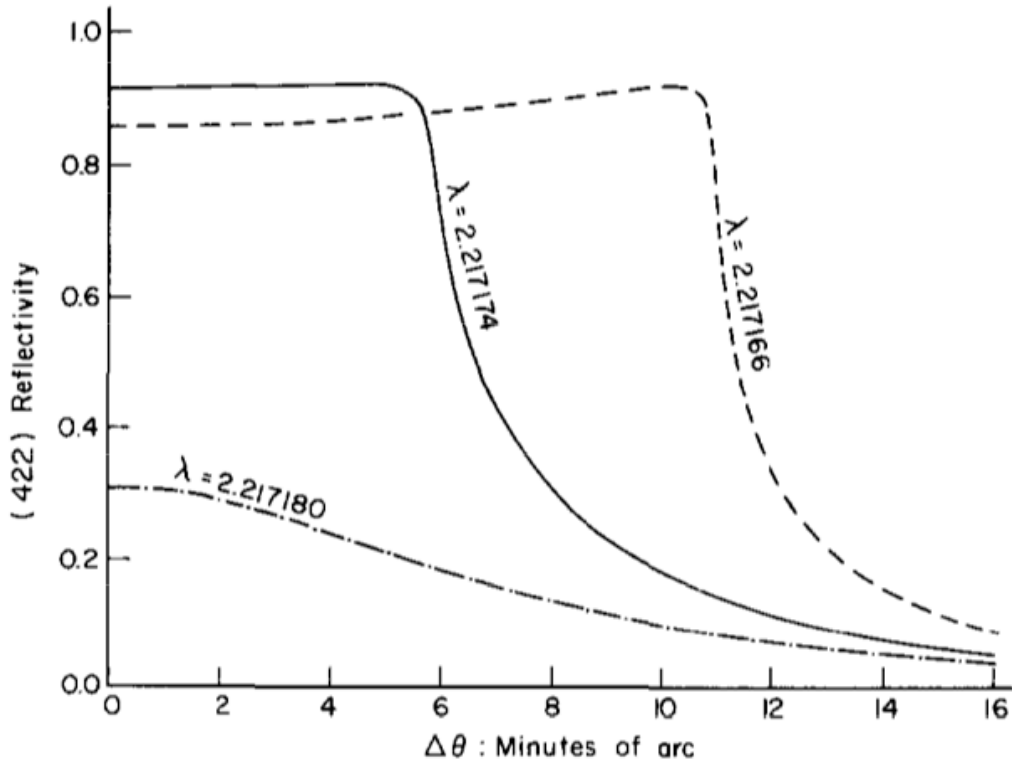


Fig. 2. Reflectivity profiles of silicon (422) at $\theta \approx 90^\circ$ for different wavelengths. The quantity plotted on the abscissae axis, $\Delta\theta$, is the deviation of the angle of incidence from 90° . Note that $\Delta\theta$ in this figure has a different meaning from the same quantity referred to and defined in the text.

²一般称为 rocking curve 非常 sharp。

3 基于再生放大机制的全相干 X 射线自由电子激光 [PRL 96]

Fully Coherent X-Ray Pulses from a Regenerative-Amplifier Free-Electron Laser

3.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Zhirong Huang and Ronald D. Ruth (SLAC)
- 类型：理论、数值计算
- 链接：<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.96.144801>

3.2 摘要

这篇论文提出并分析一种基于再生放大机制的全相干、硬 X 射线自由电子激光方案。这个方案利用窄带 Bragg 晶体形成的反射镜形成 X 射线反馈，且波荡器长度较短 $\sim 20\text{ m}^3$ 。前方束团产生自放大自发 (self-amplified spontaneous emission, SASE) 辐射后，经过反射镜的滤波效应，当回到波荡器入口时，与后方束团继续接着交互作用。这些交互作用除了放大辐射场强度外，到了一定阶段会展宽频谱，一部分不在 Bragg 晶体反射谱内的场就穿透了。分析发现，基于这种方案产生的辐射场，亮度比起自放大自发辐射的 SASE FEL 高了二至三个数量级。

3.3 贡献或创新点

- 创新点：基于再生放大机制的自由电子激光 (RAFEL) 不是全新的概念。1999 年首次在红外线波段被提出，并且后来在实验上获得验证。此外，在紫外光波段随后也被提出。这篇论文聚焦在硬 X 射线波段，利用窄带 Bragg 晶体形成的反射镜形成 X 射线反馈。示意图如下图 Fig. 1。

再生放大机制自由电子激光 (RAFEL) 与自由电子激光振荡器 (FELO) 虽然硬件上看不出明显差异，然而它们的物理机制稍有不同。FELO 为低增益过程，利用低损耗的光学谐振腔。RAFEL 则为高增益过程，在硬 X 射线，对光学谐振腔的设计要求可以较 XFELO 为缓和。

³比单次通过模式的波荡器 $\sim 100\text{ m}$ 短，也比振荡器模式的波荡器 $\sim 50\text{ m}$ 短。

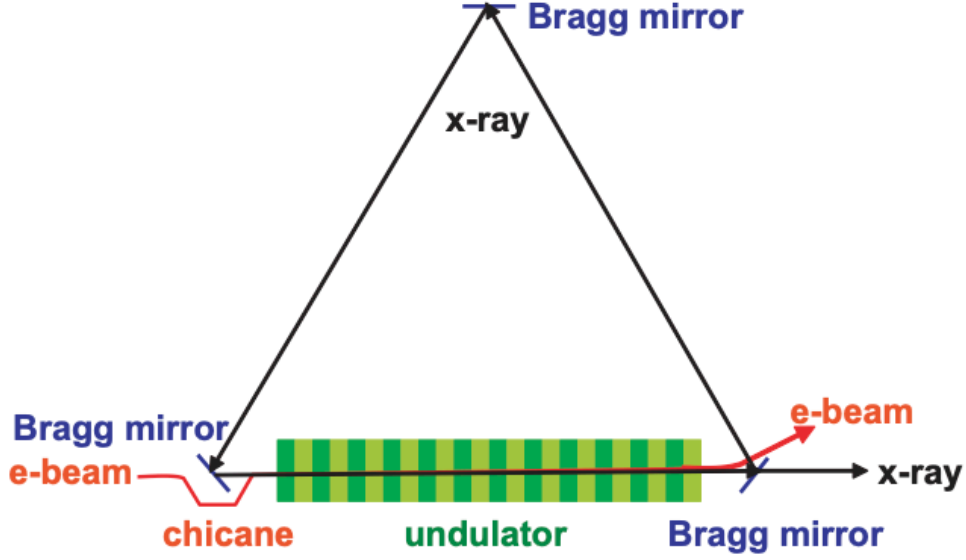


FIG. 1 (color online). Schematic of an x-ray RFEL using three Bragg crystals.

- 贡献：这篇论文主要部分分析了 RFEL 的基本物理过程，利用一维、简化分析，给出 RFEL 的有效 (指数) 增益与输出效能。

逐圈而言，电子束除了放大已经在谐振腔里的辐射场 $E_n(t)g(t)$ ，还产生自发辐射场 $\delta E_n(t)$ ，有

$$E_n^a(t) \approx E_n(t)g(t) + \delta E_n(t)$$

其中, $g(t)$ 为电子束作为增益介质的增益函数, 可简化地描述为 $g(t) \approx g_0 \exp(-t^2/2\sigma_\tau^2)$ 。

逐圈辐射场的演化可以写为

$$E_{n+1}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{2\pi} e^{-i\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} dt' E_n^a(t') e^{i\omega t'} f(\omega - \omega_r)$$

其中, f 表征 Bragg 晶体反射镜的滤波效应 $f(u) = r \exp(-u^2/4\sigma_m^2)$ 。上式先对频率积分, 有

$$E_{n+1}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} dt' \frac{r\sigma_m}{\sqrt{\pi}} e^{-i\omega_r(t-t')} e^{-\sigma_m^2(t-t')^2} g(t') E_n(t')$$

当 $n \gg 1$ 时, 忽略自发辐射项, 假设放大的辐射场有如下形式

$$E_n(t) = \Lambda^{n-1} A(t) e^{-i\omega_r t}$$

其中, Λ 表征 round-trip *field gain*。则可以得到基模的辐射场演化积分方程, 有

$$\Lambda_0 \exp\left(-\frac{t^2}{4\sigma_{x0}^2}\right) = \frac{2g_0 r \sigma_m \sigma_{xa}}{\sqrt{1+4\sigma_m^2 \sigma_{xa}^2}} \exp\left(-\frac{\sigma_m^2 t^2}{1+4\sigma_m^2 \sigma_{xa}^2}\right)$$

其中, $\sigma_{xa} = \sigma_{x0} \sigma_\tau / \sqrt{2\sigma_{x0}^2 + \sigma_\tau^2}$ 。解 σ_{x0} , 可以得到演化过程的自洽解。

Round-trip *power gain* 有

$$G_{\text{eff}} \equiv |\Lambda_0|^2 = G_0 R \frac{4\sigma_m^2 \sigma_{xa}^2}{1+4\sigma_m^2 \sigma_{xa}^2} = G_0 R \frac{\sqrt{1+8\sigma_m^2 \sigma_\tau^2} - 1}{\sqrt{1+8\sigma_m^2 \sigma_\tau^2} + 1}$$

与 $\sigma_m \sigma_\tau$ 息息相关, 其中, σ_τ 为单束团长度, σ_m 为 Bragg 反射谱宽。基于 RAFEL 的效率可以估算, 有

$$\eta = \frac{\int P_n^a(t) dt - \int P_{n+1}(t) dt}{\int P_n^a(t) dt} = 1 - R \sqrt{\frac{4\sigma_m^2 \sigma_{xa}^2}{1+4\sigma_m^2 \sigma_{xa}^2}}$$

这篇论文第二部分以 LCLS 为参数, 给出一个初步 RAFEL 的设计参数。具体参数可以参考该论文 Table I。下图 Figs. 3 与 4、5 分别为其逐圈辐射场增长过程与第 10 圈输出辐射场的脉冲时间分布。

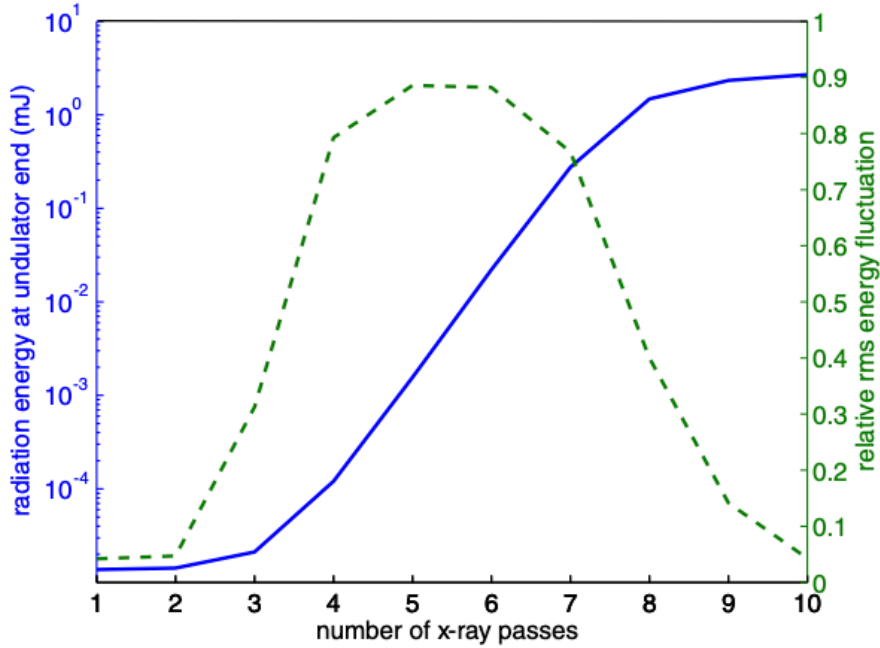


FIG. 3 (color online). Average radiated energy (blue solid line) and relative rms energy fluctuation (green dashed line) at the undulator end.

在 Figs. 4, 蓝色曲线为透射场, 毛毛刺刺的部分不在 Bragg 晶体反射频谱范围, 可以通过在下游再加一个单色仪过滤, 而有 Fig. 5 的脉冲时间分布。

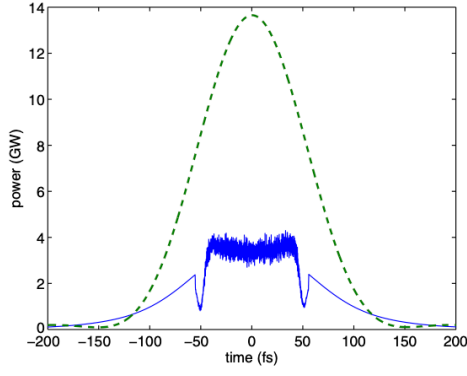


FIG. 4 (color online). Temporal profile of the reflected (green dashed line) and transmitted (blue solid line) FEL power at the end of 10th pass.

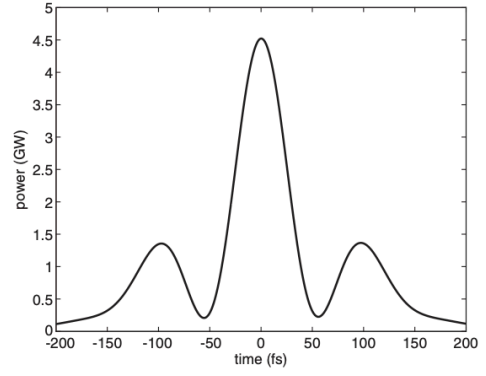


FIG. 5. Temporal profile of the final transmitted FEL power after passing a monochromator with a FWHM bandwidth = $2\Delta\omega_m/\omega_r = 8 \times 10^{-6}$ to filter out the SASE radiation.

3.4 其它

这里介绍的 RAFEL 机制不限于 Fig. 1 的谐振腔构形，也可以采 90° 背散射构形。但是，接近垂直入射的背散射构形还需要考虑 multiple-wave diffraction，此处不论。

4 A Brief History of Electromagnetism

电磁学简史

4.1 基本信息

- 分类：其它
- 作者：Charles Byrne (University of Massachusetts)
- 类型：其它
- 链接：http://sites.iiserpune.ac.in/~bhasbapat/phy201_files/EMHIST.pdf

4.2 摘要

在 19 世纪及之前，人们主要在摸索电、磁现象。在 19 世纪及之后，主要重心在理解电、磁与技术创新之间的关联。一般认为在 14 至 19 世纪间，“电”一词还没有正式出现过。在 18 世纪末，没有人想得到在未来的一百年里，人们开始使用电，包含电灯、电气设备、通讯设备等。这份笔记是作者根据几个子标题简述电磁学发展简史。

5 一种自由电子激光振荡器的增益级联模式 [PRAB 20-11]

Gain cascading scheme of a free-electron-laser oscillator

5.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Kai Li and Haixiao Deng (上海应用物理研究所)
- 类型：数值模拟
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.110703>

5.2 摘要

低增益自由电子激光振荡器 (free electron laser oscillator, FELO) 能够产生自太赫兹、紫外光至 X 射线波段的全相干辐射。这篇论文提出一种单次经过的增益级联模式，通过在振荡器中安置多段波荡器。比起寻常的单个波荡器振荡器构形，这个方案能够产生更短的辐射脉冲、更高峰值功率，甚至更高辐射脉冲能量。作为例子，这篇论文给出红外波段与硬 X 射线波段增益级联振荡器模式。

5.3 贡献或创新点

寻常的 FELO 通常由一组反射镜与单个波荡器组成，电子束团不断经过⁴振荡器产生自发辐射，由反射镜组成的谐振腔逐渐放大且频率滤波这些自发辐射。放大的辐射场一部分补偿反射镜损耗⁵，同时增强对电子束的调制。在辐射场持续放大与电子束不断受到调制之后，电子束无法一直给辐射场能量而不吸收，于是系统达到饱和。此时有 $(1 + g)r = 1$ ，其中， g 为 (强度) 增益， r 为总 (强度) 反射损耗系数。振荡器的设计需要在“单次经过增益”(single-pass gain) 与“提高输出峰值功率”间取舍。

- 创新点：这篇论文提出一种创新方案，在谐振腔中安置多段波荡器 (增益级联模式)，而不是单个较长的波荡器。在较短的、多段波荡器之间，可能替换新鲜的电子束或是在使用同一电子束情况下引入时间偏移，使下游波荡器能够持续有效地与辐射场交互作用。示意图如下图 Fig. 1 所示。分析发现，基于这种增益级联模

⁴可以是直线加速器不断产生新鲜的电子束，或是储存环模式的同一电子束，或是能量循环加速器中少数几次使用的电子束。

⁵分被动损耗与主动损耗；前者生成热 (称 passive cavity loss)，后者为输出耦合 (称 active output coupling)。

式，在谐振腔中存在较高的辐射功率时，电子束与多段波荡器的组合能够更好地维持增益，参考下图 Fig. 2。

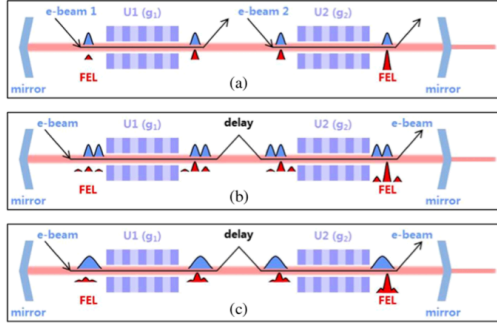


FIG. 1. Schemes for gain cascading in single-pass of FEL oscillators. (a) The original idea conceptually to replace the degenerated electron bunch with a fresh one. (b) A more practical method of using bunch trains and refresh it through the delay between the two stages of undulators. (c) The bunch trains are replaced by a single long electron beam.

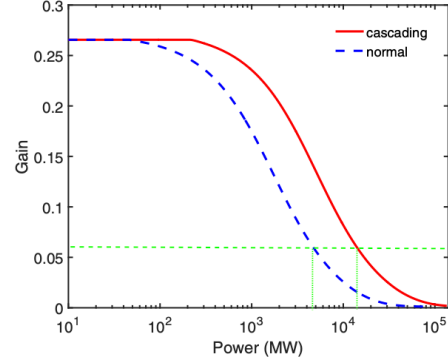


FIG. 2. Single-pass gain as a function of cavity pulse power. The dashed green line represents the single-pass gain at saturation for the typical 6% output coupling. For the same output coupling efficiency, the gain cascading FEL oscillator generates a larger light pulse power inside the cavity than the traditional FEL oscillator.

- 贡献：这篇论文 Section II 给出解析分析，说明多段波荡器组成确实比单个波荡器能够给出更高的能量效率。不同于 optical klystron (OK) 模式，此方案中多段波荡器间的 chicane 是用来抹除电子束群聚而不是增强群聚。因此，此方案的电子束经过 chicane 之后仍为低增益，但是 OK 模式的电子束则是高增益。

这篇论文 Section III 与 IV 分别考虑基于增益级联模式的两个例子：红外波段与硬 X 射线波段。明显基于增益级联模式能够给出更高输出峰值功率，并且输出辐射脉冲时间长度可以更短。

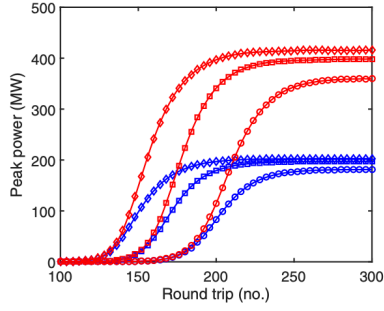


FIG. 3. The growths of output peak power in FEL oscillators from steady-state simulations, in which the blues are results from a normal oscillator with 25% single-pass gain from a single-stage undulator, while the reds are results from an FEL oscillator with 25% single-pass gain from two-stage cascaded undulator, i.e., 12% from each one. The diamond, square and circle represent the cases with the output coupling efficiency of 6%, 8% and 10%, respectively, and the passive loss of the cavity is assumed to be 1%.

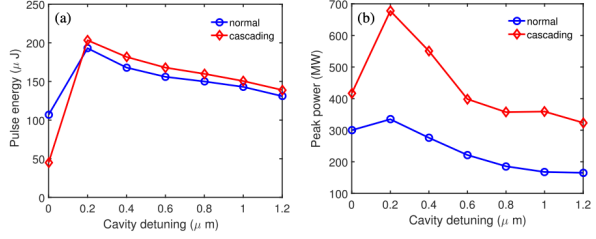


FIG. 4. The cavity detuning curve for (a) output energy and (b) peak power.

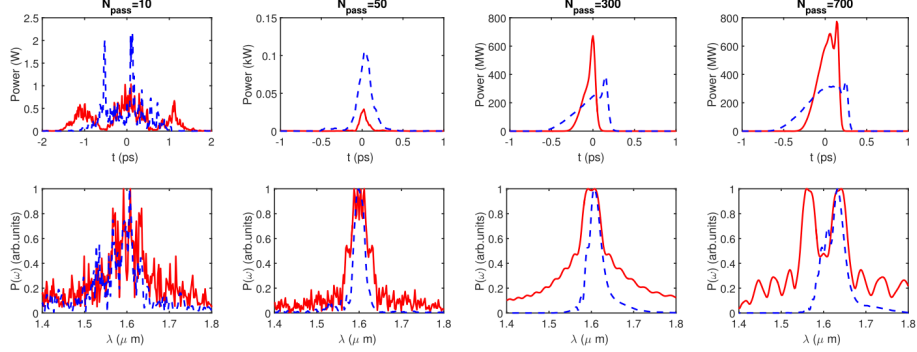


FIG. 5. The temporal and spectral profile of the output $1.6 \mu\text{m}$ pulse in the normal FEL oscillator (blue dashed line) and the two-stage undulator cascaded FEL oscillator (red solid line), with the chicane delay of 1.0 ps . The output coupling efficiency is 6% and the cavity detuning length of $0.2 \mu\text{m}$ for both of them. (The upper figures are manually shifted to the center.)

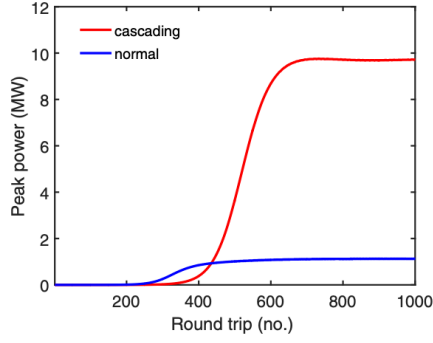


FIG. 7. The growth of output peak power in x-ray FEL oscillators from steady-state simulations, in which the total reflectivity and single-pass gain are assumed to be 89.8% and 15%, respectively, and the output coupling is 4.5%.

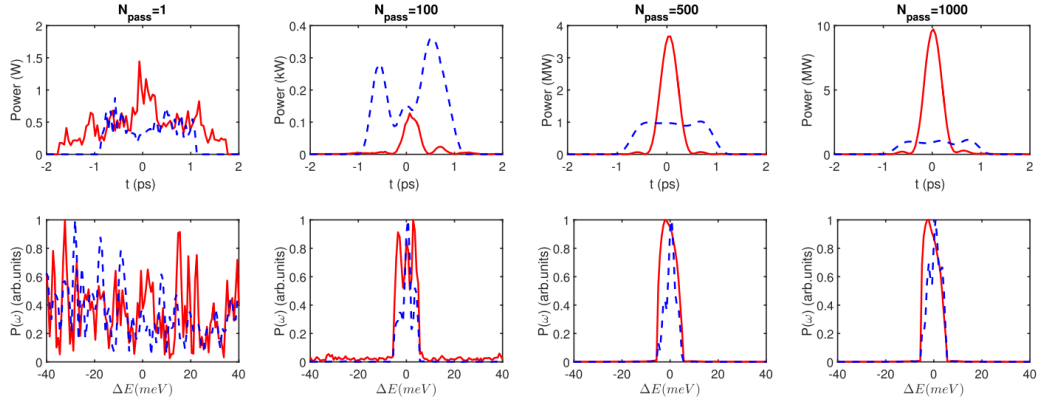


FIG. 6. The temporal and spectral profile of the output 1 Å pulse in the normal FEL oscillator (blue dashed line) and four-stage undulator cascaded FEL oscillator (red solid line).

6 基于 GeV 量级能量回收直线加速器的自由电子激光振荡器模拟 [WEPC34]

Simulation of an x-ray FEL oscillator for the multi-GeV ERL in Japan

6.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：R. Hajima and N. Nishimori (JAEA, 日本)
- 类型：数值计算
- 链接：<https://accelconf.web.cern.ch/FEL2009/papers/wepc34.pdf>

6.2 摘要

这篇论文给出一种基于能量回收直线加速器 (energy recovery linac, ERL) 驱动自由电子激光振荡器 (x-ray FEL oscillator, XFEL) 的方案，利用了速度群聚概念。速度群聚效应加强了低增益模式的效能，从数值模拟上证实利用 5 GeV 高亮度电子束在 0.1 nm 发光是可能的。设计参数基于“日本原子力研究開発機構”(Japan Atomic Energy Agency, JAEA) 的能量回收直线加速器⁶。

6.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇论文考虑在相对较低能量 5 GeV 情况下运行 XFEL 模式的效能评估⁷。为了提升效能，这篇论文利用电子束通过能量回收直线超导加速器时经过适当安排加速相位，在低能段产生足够的啁啾从而形成速度群聚。速度群聚能够有效提高低增益，为自由电子激光振荡器起振提供便利。
- 贡献：分析低增益对束团发射度 (三维效应) 的影响时，这篇论文考虑两种情况，能量在 5 GeV 情况下：
 - 无速度群聚效应情况 \Rightarrow 20 pC、2 ps、能散 10^{-4}
 - 有速度群聚效应情况 \Rightarrow 7.7 pC、380 fs、能散 0.5×10^{-4}

小信号低增益与发射度关系如下图 Fig. 5 所示

⁶Compact ERL (cERL): 500 kV DC gun, buncher, 2-cell \times 3 injector cavities, 3-dipole merger, and accelerator modules of the main linac. Each module of the main linac accommodates four 9-cell cavities.

⁷一般目前的分析中，电子束能量大约落在 7-10 GeV。

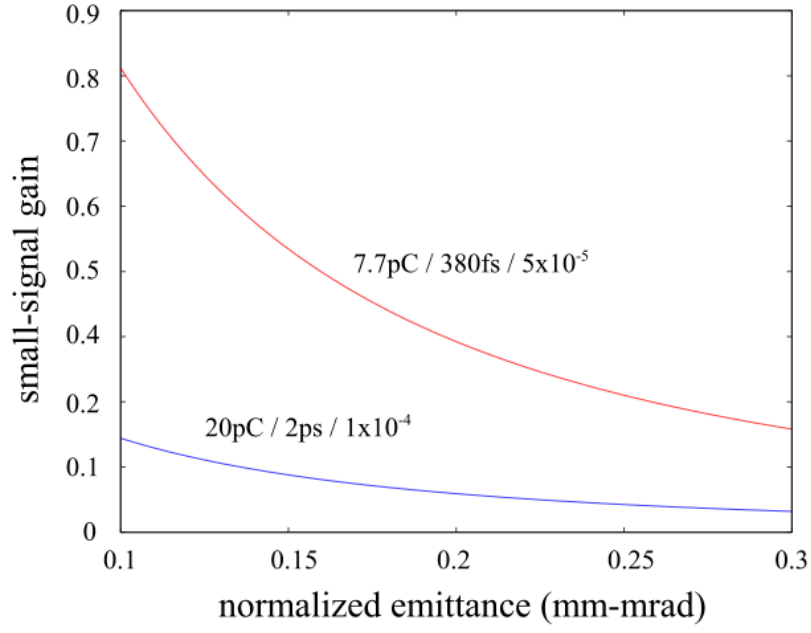


Figure 5: Small-signal FEL gain estimated from analytical formula. Gain without velocity bunching (20 pC, 2 ps, $\sigma_E/E = 10^{-4}$) and gain with velocity bunching (7.7 pC, 380 fs, $\sigma_E/E = 5 \times 10^{-5}$) are plotted.

Bragg 晶体采用解析模型，参考了教科书 J. Als-Nielsen and D. McMorrow, “Elements of Modern X-ray Physics”, John Wiley & Sons, Ltd. (2001), 如下图 Fig. 6

最终数值模拟有如图 Fig. 7 与 8

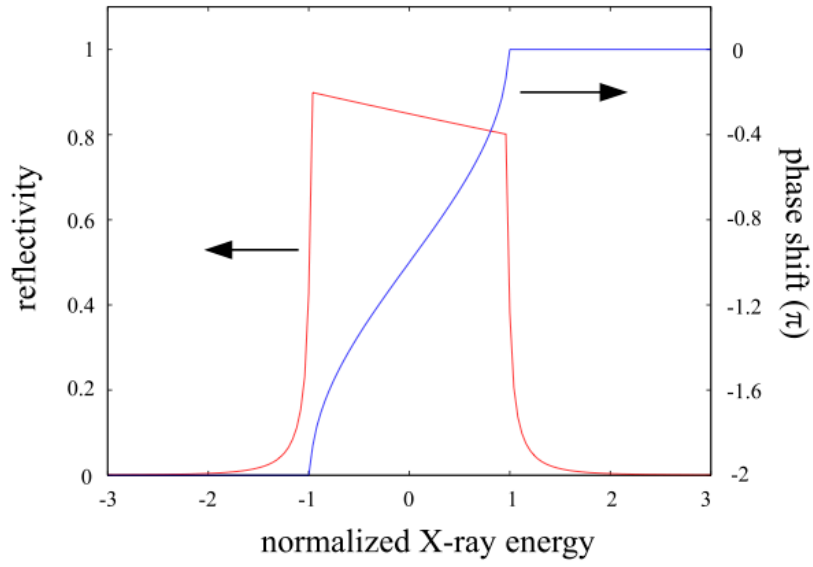


Figure 6: Model of Bragg mirrors: Reflectivity and phase shift are plotted for a cavity round trip.

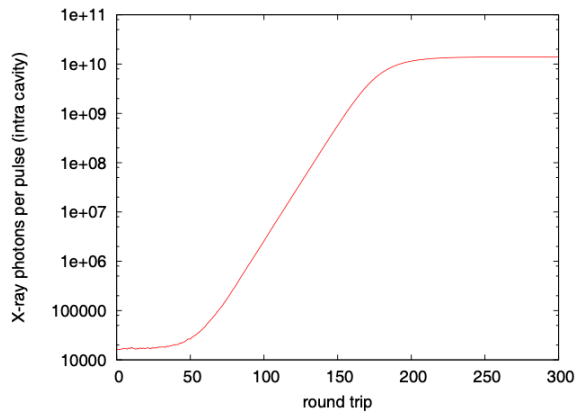


Figure 7: X-ray pulse evolution in the X-FELO.

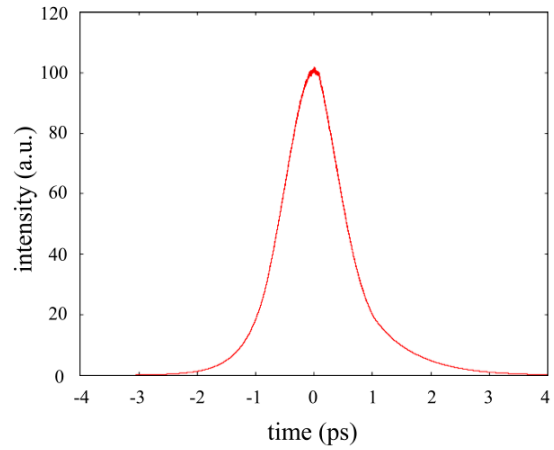


Figure 8: Temporal profile of a saturated FEL pulse. The temporal duration is 1.2 ps (FWHM).