

加速器束流动力学期刊论文导读 (2021 年 11 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 (2021 年 11 月) 导读成员¹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]、[7]、[8]、[9]、[10]	jcytsai@hust.edu.cn
宋怡方	[11]、[12]	yifangsong@hust.edu.cn

¹宋怡方为电磁所樊宽军教授研究生。

目录

1	高增益自放大自发辐射自由电子激光电子相空间演化的解析解 [PRST-AB 8-10] Analytical solution for phase space evolution of electrons operating in a self-amplified spontaneous emission free electron laser	4
2	基于横纵向耦合的谐波产生与束团压缩 [NIMA 1019] Harmonic generation and bunch compression based on transverse-longitudinal coupling	6
3	面向高重频自由电子激光的直接放大引致谐波产生 Direct-amplification enabled harmonic generation for seeding a high-repetition-rate free-electron laser	10
4	软 X 射线自由电子激光的电子束三维操控 [PRST-AB 17-07] Three-dimensional manipulation of electron beam phase space for seeding soft x-ray free-electron lasers	13
5	一种基于储存环自由电子激光产生超短相干深紫外与 X 射线光源方案研究 [Sci. Rep. 7] A Storage Ring Based Free-Electron Laser for Generating Ultrashort Coherent EUV and X-ray Radiation	17
6	高亮度电子束横向空间电荷效应引致的微束团不稳定性 [PRST-AB 18-05] Transverse space-charge induced microbunching instability in high-brightness electron bunches	20
7	在储存环中一种可逆种子激光电子束调制方案 [MOPB23] Reversible seeding in storage rings	23
8	预聚束电子束辐射场分析 [PRAB 20-07] Analysis of emissions from prebunched electron beams	25
9	自由电子激光的集体变量描述 [PRA 33] Collective variable description of a free-electron laser	28
10	利用高亮度自放大自发辐射自由电子激光产生变换极限 X 射线光脉冲 [PRL 110] Transform-Limited X-Ray Pulse Generation from a High-Brightness Self-Amplified Spontaneous-Emission Free-Electron Laser	30
11	圆柱导体管中有限尺寸的聚束束流的空间电荷极限 [PRSTAB 7] Space-charge limit for a finite-size bunched beam in a circular conducting	

pipe

32

12 拓扑阴极：用超材料控制电子发射的空间电荷极限 [PRAB 22-08]

Topological cathodes: Controlling the space charge limit of electron emission
using metamaterials

34

1 高增益自放大自发辐射自由电子激光电子相空间演化的解析解 [PRST-AB 8-10]

Analytical solution for phase space evolution of electrons operating in a self-amplified spontaneous emission free electron laser

1.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Nobuyuki Nishimori (JAEA)
- 类型：理论
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.8.100701>

1.2 摘要

这篇论文给出了在线性或指数区间的高增益自放大自发辐射自由电子激光 (self-amplified spontaneous emission free-electron laser, SASE FEL) 的电子相空间分布的解析解。这个解析解的表示式与色散关系三次方程的解关联，表征高增益 FEL 过程。研究发现，电子束倾向于群聚在束团中参考 (共振) 粒子的前方 $\pi/6$ 相位附近。解析解与直接数值求解 $2N + 1$ 联立方程得到的解比较得到很好的一致性。这篇论文得到的解析解被应用到计算高增益 FEL 过程时的相干光学渡越辐射 (optical transition radiation, OTR) 强度。相干光学渡越辐射强度与 FEL 强度成正比。

1.3 贡献或创新点

- 贡献：这篇论文给出了在波荡器中任何位置 τ 的单个电子的纵向相空间坐标，利用 FEL 经典的色散关系三次方程的解作为关联，并讨论了电子的相空间动力学。这篇论文的主要结果在 Eqs. (12) 与 (13)，如下

$$\mu_i(\tau) = \frac{2|a(0)|}{3} \left\{ e^{\frac{\sqrt{3}}{2}\tau} \cos \left[\psi_i(0) + \phi(0) + \frac{\tau}{2} - \frac{\pi}{6} \right] - e^{-\frac{\sqrt{3}}{2}\tau} \cos \left[\psi_i(0) + \phi(0) + \frac{\tau}{2} + \frac{\pi}{6} \right] + \cos \left[\psi_i(0) + \phi(0) - \tau + \frac{\pi}{2} \right] \right\}$$

$$\Delta\psi_i(\tau) = \frac{2|a(0)|}{3} \left\{ e^{\frac{\sqrt{3}}{2}\tau} \cos \left[\psi_i(0) + \phi(0) + \frac{\tau}{2} - \frac{\pi}{3} \right] + e^{-\frac{\sqrt{3}}{2}\tau} \cos \left[\psi_i(0) + \phi(0) + \frac{\tau}{2} + \frac{\pi}{3} \right] + \cos [\psi_i(0) + \phi(0) - \tau + \pi] \right\}$$

这篇论文 Section IV 还讨论了饱和时的相空间坐标的构建，也是利用迭代的思路。

论文最后一部分推导基于 OTR 辐射场的辐射功率谱 $P_c(\omega)$ ，并与既有结果比较。

- 创新点：这篇论文利用迭代方式，结合对 FEL 物理过程的认识²，得到电子相空间坐标的解析解。一旦得到相空间电子运动的解析解，将催生许多原本不容易在波荡器中得到的结果。这篇论文给出的解析解将波荡器中 τ 处的相空间坐标关联到初始 $\tau = 0$ 相空间坐标，可以被应用到分析微束团动力学时涉及在波荡器中的电子动力学，包含
 1. 构建更准确的 laser heater/modulator 模型；
 2. 对 HGHG/EEHG 等方案的更准确评估，参考 E. Hemsing 论文；
 3. 思考能否按类似思路应用到 FEL 后饱和动力学分析。

²利用电子沿着波荡器的相位改变 $\Delta\psi_i(\tau)$ 在线性或指数放大区间较小，与外部场 $a(\tau)$ 关联，可以表示成 $\psi_i(\tau) = \psi_i(0) + \Delta\psi_i(\tau)$ 的关系式开始迭代。

2 基于横纵向耦合的谐波产生与束团压缩 [NIMA 1019]

Harmonic generation and bunch compression based on transverse-longitudinal coupling

2.1 基本信息

- 分类：束流动力学
- 作者：X.J. Deng, W.H. Huang, Z.Z. Li, C.X. Tang (主要机构：清华大学)
- 类型：理论
- 链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900221008445?via%3Dihub>

2.2 摘要

当束团横向发射度较小时，可以利用横纵向耦合 (transverse-longitudinal coupling, TLC) 达到有效的谐波产生或束团压缩，同时缓解束团能量调制或啁啾强度。这篇论文推广过去关于谐波产生与束团压缩的分析，并证明两个相关的定理。潜在应用包含了自由电子激光 (free electron laser, FEL) 或稳态微聚束 (steady-state microbunching, SSMB) 的束团压缩或谐波产生。

2.3 贡献或创新点

按目前既有理论，基于高亮度电子加速器的谐波产生方案有：高增益谐波产生 (high-gain harmonic generation, HGHG) 或是回声增强谐波产生 (echo-enabled harmonic generation, EEHG) 或其它更进阶的方案如角度调制方案 (angular dispersion induced modulation, ADM)、发射度交换 (emittance exchange, EEX) 方案、相位合并增强方案 (phase-emerging enhanced harmonic generation, PEHG) 等。这些方案的成效很大程度取决于从基波到谐波的“转换效率”，即，调制激光的调制幅度。HGHG 直接限于调制激光；EEHG 能够达到更高次谐波，并缓解对调制激光的要求，但是限于更复杂的束线结构³。

³HGHG 一般包含一波荡器、一调制激光与一 chicane；EEHG 则需要至少两段波荡器与两 chicane 与两个可能不同频率的调制激光。

- 贡献：这篇论文将几种相空间调制方案放在一个更大的框架下分析，称为横纵向耦合 (TLC)。TLC 作为 SSMB 束团相空间调制的应用，这篇论文第一部分简单回顾 SSMB 原理，可以下图总结 值得注意的是，相较于 FEL 的微束团 (0.9, 1.1, 0.9, 1.1)，

6 orders of magnitude extrapolation

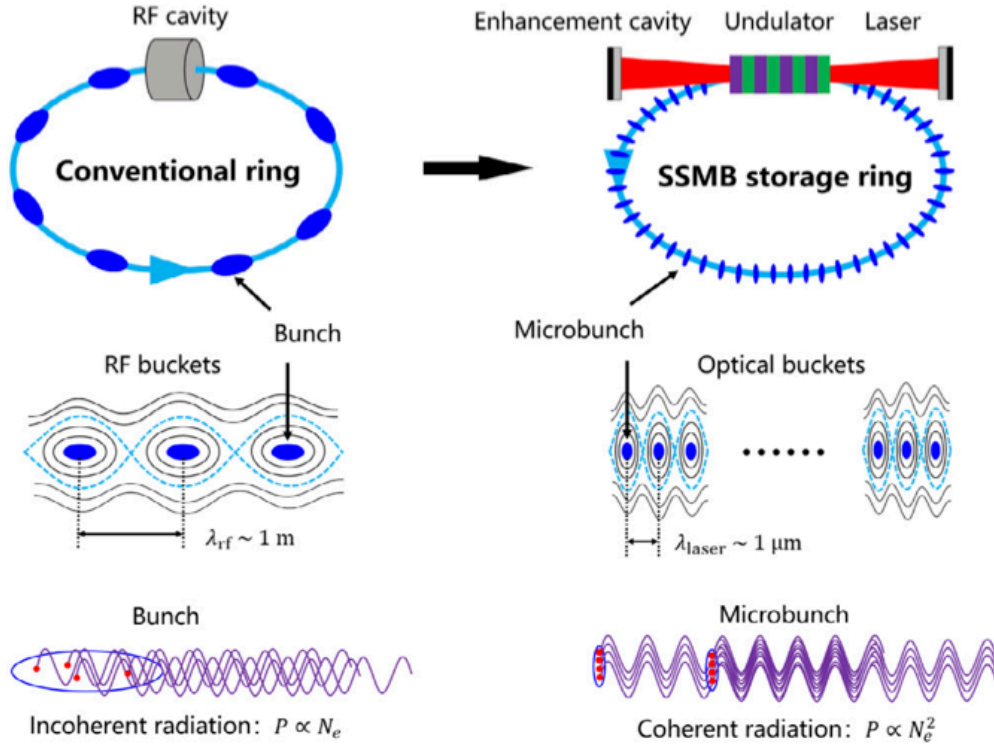


Fig. 1. Schematic layout and working principle of an SSMB storage ring and the comparisons with a conventional ring.

SSMB 的微聚束更像是 (0, 2, 0, 2) 的形态。此外，与单次通过 (single-pass) 部件不同的是，SSMB 在储存环中必须确保在 radiator 处的束长保持恒定，即，束团保持在本征态 (eigen state)。

早期 SSMB 设计想法采 HGHG 方案调制束团，但碍于 modulator 至 radiator 的束团压缩比例太高⁴而需要更有效的激光调制方案。

- 创新点：这篇论文将谐波产生与束团压缩放在一个统一框架下分析。比起谐波产生，这篇论文更多聚焦在束团压缩。这篇论文的主要结果有

1. 对于正常 RF TM_{010} 或是 TEM_{00} 调制激光，将在 modulator 或 radiator 处的 \mathcal{H} 函数与束团能量调制或啁啾强度关联； \mathcal{H} 函数表征束团横向发射度与纵向

⁴谐波产生 \approx 第 79 次谐波，由 1064 nm 至 13.5 nm。束长也许自 100 μm 至 3 nm。

束长的关系，也关联 beamline lattice 设计。按下面示意图， $4 \times 4 \mathbf{M}_{1,2,3}$ 分别表示自某处至 modulator 的传输矩阵、modulator 本身传输矩阵、modulator 至 radiator 的传输矩阵。合成矩阵以 \mathbf{T} 表示，这篇论文的第一个主要结果为以下不等式⁵

$$\mathbf{T} = \mathbf{M}_3 \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{E} \end{pmatrix}$$

$$h_{\text{mod}}^2 \mathcal{H}_{y,\text{mod}} \mathcal{H}_{y,\text{rad}} \geq 1$$

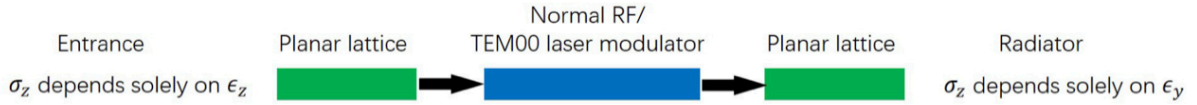


Fig. 3. Schematic layout of applying y - z coupling with a normal RF or TEM00 mode laser for bunch compression.

2. 对于 RF 偏转模或是 TEM_{01} 调制激光，将在 modulator 或 radiator 处的 \mathcal{H} 函数与束团能量调制或啁啾强度关联。上面的定理可以进一步改写，其中， \mathcal{H} 函数以 β 函数取代，能量啁啾 (energy chirp) 强度 h 则以角啁啾 (angular chirp) 强度 $t = R_{45}$ 取代，有⁶

$$t_{\text{mod}}^2 \beta_{y,\text{mod}} \mathcal{H}_{y,\text{rad}} \geq 1$$

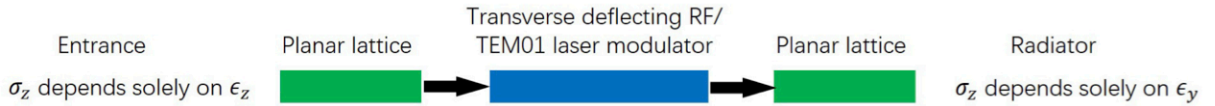


Fig. 6. Schematic layout of applying y - z coupling with a transverse deflecting RF or TEM01 mode laser for bunch compression.

3. 利用三次谐波激光调制，进一步维持高次谐波的群聚因子，参考论文 Fig. 5。分析利用 Jacobi-Anger 恒等式。

2.4 其它

这篇论文的一个创新思路为谐波产生与束团压缩的概念可以在同一个框架下讨论，前者为长束团图像，后者为短束团图像。这里长与短的概念相对于调制激光波长。以往研究纵向动力学时，横向动力学扮演的角色多为 degradation，如有限的横向发射度等。几种进阶调制方案等提出，如 PEHG、EEX 等，揭示了如果纵向相空间调控能够善用

⁵证明利用 Cauchy-Schwarz 不等式。

⁶证明利用 Cauchy-Schwarz 不等式。

横向垂直方向的束团发射度，则一定程度上或许能够受益。

群聚因子衰减效应对 SSMB 束团比对 FEL 束团更严峻，前者有时又称束团拉伸效应。对 FEL 束团而言，一般为 coasting beam，即束团长度 \ll 辐射波长。

以上讨论皆假设束团不受集体效应影响。

3 面向高重频自由电子激光的直接放大引致谐波产生

Direct-amplification enabled harmonic generation for seeding a high-repetition-rate free-electron laser

3.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Xiaofan Wang (王晓凡), Chao Feng (冯超), Bart Faatz, Weiqing Zhang and Zhentang Zhao (赵振堂) (主要机构：深圳综合粒子设施研究院)
- 类型：数值模拟
- 链接：<https://arxiv.org/abs/2103.11971>

3.2 摘要

近年来，许多光谱学 (spectroscopy) 与光刻 (lithography) 技术等科学与工业技术应用对基于加速器的高通量、相干光源 (如：深紫外、X 射线等) 的需求日益增加。这些需求可以通过 MHz 量级的高重频自由电子激光 (free electron laser, FEL) 实现。其中，对同样高重频种子激光的要求是实现这些相关方案的关键挑战。这篇论文提出一种称为直接放大引致谐波产生机制 (direct-amplification enabled harmonic generation, DEHG) 的方案，能够约三个数量级上缓解在高重频情况下对种子激光强度的要求，同时维持足够的相干性与稳定性。

3.3 贡献或创新点

- 贡献：这篇论文奠基于过去在相对低频模式下，对几种谐波产生方案的理解，如 HGHG、EEHG、PEHG、ADM 等。结合实际实现几种方案时对种子激光要求的考量，提出一个在 MHz 量级高重频模式下，能够缓解种子激光强度，并同时兼顾相干性与稳定性的方案，称“直接放大引致谐波产生”机制 (DEHG)。

这篇论文着重于物理图像理解与 GENESIS 数值模拟，给出基于此方案的初步设计参数，包含产生 19 次谐波的调制波荡器 (modulator) 参数与电子束参数。还给出在此高阶谐波群聚的微束团电子进入辐射波荡器 (radiator) 后的辐射输出特性。

- 创新点：这个方案的关键想法不同于过去谐波产生时的电子束调制方案采用较短的调制波荡器，改成采用较长的调制波荡器，利用调制波荡器本身共振频率与外部调制激光同一频率的特点，在调制波荡器中引致一定程度的自由电子激光 (FEL) 放大过程，在增加电子束微群聚的同时，缓解对调制激光强度的要求。此方案在高重频操作模式下具有参考价值。

基于“直接放大引致谐波产生”机制的想法可以应用在 HGHG 或是 EEHG，示意图如下：

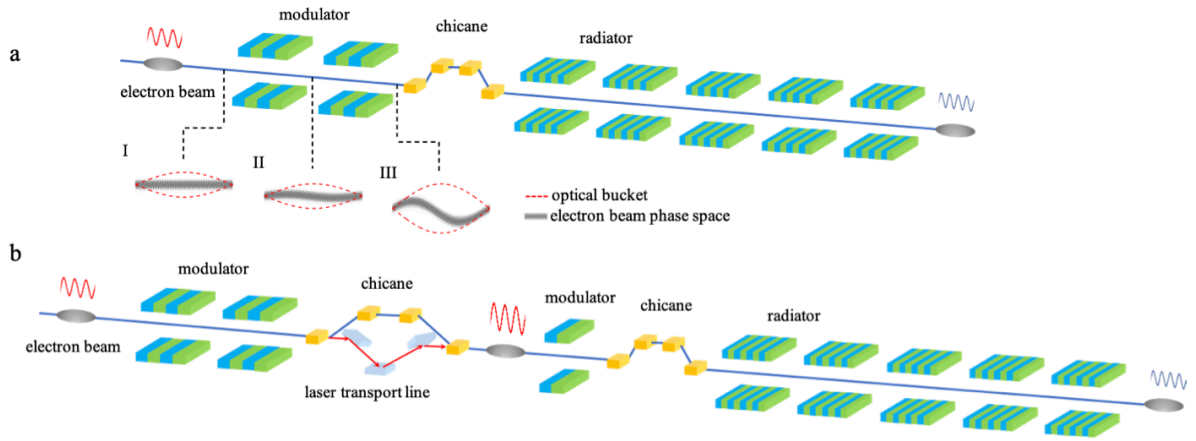


FIG. 1. Schematic layout of DEHG with its application in HGHG (a) and EEHG (b). I-III: the evolution of optical bucket and electron beam distribution in longitudinal phase space.

3.4 其它

外部调制激光由商用红外纤维激光器 1030 nm 经过四次谐波转换，得到 257.5 nm 种子激光。操作在 1 MHz 重复频率时，平均功率约为 0.35 W，峰值功率约为 1 MW。

调制波荡器与辐射波荡器段大约 4 m，波荡器周期分别为 8 cm 与 4.1 cm。

电子参考能量 2.5 GeV，平顶峰值电流约为 800 A，切片能散 0.19 MeV，横向归一化发射度约为 0.4 mm-mrad。

产生的第 19 次谐波约为 13.5 nm，面向光刻应用，可以通过结合 DEHG 与 HGHG 得到。峰值功率为 1 MW 的外部调制激光大约可以产生 11.6 的调制深度。调制深度定义为 $A = \Delta E / \sigma_E$ ，其中， σ_E 为电子切片能散 (0.19 MeV)。调制波荡器为 8 m，由两段 4-m 波荡器组成。下游色散段设定约为 34 μm 时，可以得到的电子微束团群聚因子约 0.03。后方在 20-m 的辐射波荡器 (共五段) 得到 13.5 nm 与 1.6 GW 的输出功率。

对于第 19 次谐波产生，也可以通过结合 DEHG 与 EEHG 得到。种子激光的峰值

功率约为 0.2 MW，或对应平均功率 70 mW(假设操作在 1 MHz)。EEHG 由两段调制波荡器形成，第二段长度仅 2.4 m，最终可以得到电子微束团群聚因子约 0.06。后方在 15-m 的辐射波荡器 (约四段) 得到在 6 nm 与 3.2 GW 的输出功率。

4 软 X 射线自由电子激光的电子束三维操控 [PRST-AB 17-07]

Three-dimensional manipulation of electron beam phase space for seeding soft x-ray free-electron lasers

4.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Chao Feng, Tong Zhang, Haixiao Deng, and Zhentang Zhao (主要机构：上海应用物理研究所)
- 类型：理论、模拟
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.17.070701>

4.2 摘要

这篇论文提出一种能够对低能散电子束引致明显密度调制 (或微束团) 的方案, 结合电子束本身色散 (dispersion) 特性与种子激光波前倾斜 (tilted wave front) 特性。增加电子束微群聚因子意味着提高短波长种子自由电子激光 (free electron laser, FEL) 效能。这篇论文从理论与数值模拟演示这个方案应用在软 X 射线自由电子激光的可行性。

4.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇论文提出的激光调制电子束方案为将激光调整使其波前 (wave front) 在电子束的横向分布有限范围内产生不同相位 (故称“倾斜”)。此时电子束因为经过一色散段 (R_{16}, R_{36}), 横向分布由于切片能散而展开, 看到不同的激光波前相位, 因此将引起些微能量差异。下图为改变激光波前相位倾斜角度的示意图:
- 贡献：基于此方案的调制波荡器可按如下 lattice 实现:
对电子束而言, 经过此波荡器后的能量调制可以表示成

$$\begin{cases} z' = z \\ p' = p + A \sin [k_s z + \tau_x (x - x_0) + \tau_y (y - y_0)] \end{cases}$$

其中, x_0, y_0 为束团中心参考粒子的横向坐标, $\tau_x = k_s \tan \theta, \tau_y = k_s \tan \theta$ 。波荡器下游紧邻 chicane, 按以下方式将电子束纵向相空间调制

$$\begin{cases} z'' = z' + R_{56} p' \sigma_\gamma / \gamma_0 \\ p'' = p' \end{cases}$$

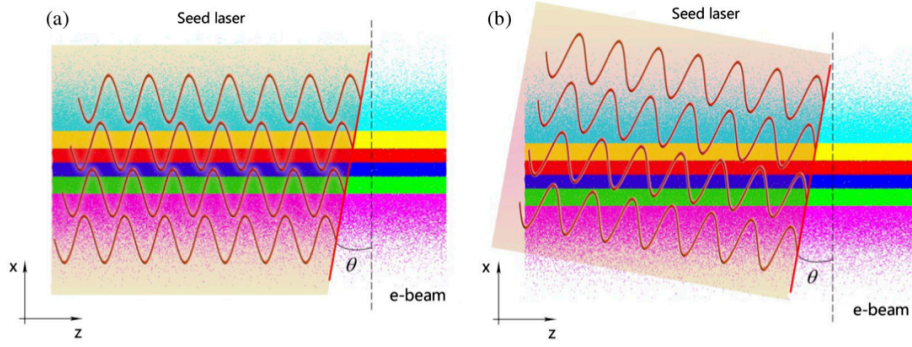


FIG. 1. Schematic of two methods for three-dimensional manipulations of the electron beam phase space with a transversely dispersed electron beam (x - z) and a wave front tilted seed laser: (a) directly tilt the wave front of the seed laser, and (b) oblique incidence the seed laser with a small angle θ .

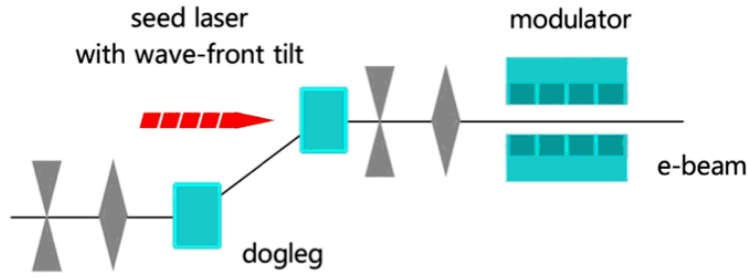


FIG. 3. Layout of the proposed scheme at SXFEL.

在 chicane 出口处，电子微束团的高阶谐波分量可以写成

$$b_n = J_n(nAB) e^{-\frac{n^2}{2}(\tau_x R_{16}\sigma_\gamma/\gamma_0 + \tau_y R_{36}\sigma_\gamma/\gamma_0 + B)^2} e^{-\frac{n^2}{2}(\tau_x\sigma_x + \tau_y\sigma_y)^2}$$

下图比较此方案与既有方案中，电子相空间分布的区别。由图中可以看出，当调制激光的波前没有倾斜时，在 chicane 出口处的电子束 (x, z) 分布存在“倾斜”，而这种倾斜将体现在下游辐射波荡器的辐射输出。如果在上游调制激光先引入相应的波前相位倾斜修正，则可以更好地得到下游 chicane 出口处的电子高阶谐波群聚因子。

4.4 其它

过去几种典型的种子激光调制电子束方案：

- HGHG [1, 2, 3]
- EEHG [4, 5]
- PEHG [6, 7]
- ADM [8]

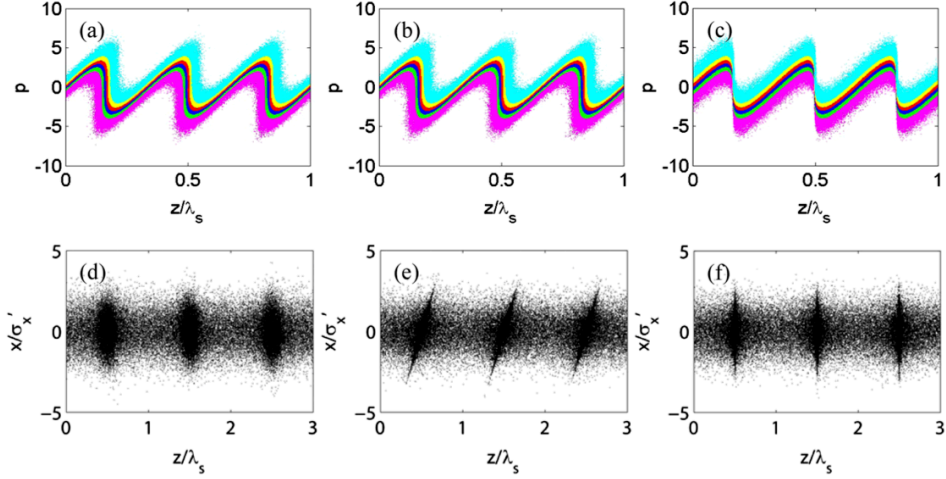


FIG. 2. Comparison of beam longitudinal phase space (p - z) and normalized transverse electrons distributions (x - z) for different electron and laser beam injection conditions.

图 1: 由左至右: (a,d) HGHG; (b,e) 无激光波前倾斜; (c,f) 有激光波前倾斜.

参考文献

- [1] L. H. Yu, Generation of intense UV radiation by subharmonically seeded single-pass free-electron lasers, Phys. Rev. A 44, 5178 (1991). <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.44.5178>
- [2] L. H. Yu *et al.*, High-Gain Harmonic-Generation Free-Electron Laser, Science 289, 932 (2000). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.289.5481.932>
- [3] L. H. Yu, L. DiMauro, A. Doyuran, W. S. Graves, E. D. Johnson, R. Heese, S. Krinsky, H. Loos, J. B. Murphy, G. Rakowsky, J. Rose, T. Shaftan, B. Sheehy, J. Skaritka, X. J. Wang, and Z. Wu, First Ultraviolet High-Gain Harmonic-Generation Free-Electron Laser, Phys. Rev. Lett. 91, 074801 (2003). <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.91.074801>
- [4] G. Stupakov, Using the Beam-Echo Effect for Generation of Short-Wavelength Radiation, Phys. Rev. Lett. 102, 074801(2009). <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.102.074801>
- [5] Dao Xiang and Gennady Stupakov, Echo-enabled harmonic generation free electron laser, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 030702 (2009). <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.12.030702>
- [6] Haixiao Deng and Chao Feng, Using Off-Resonance Laser Modulation for Beam-Energy-Spread Cooling in Generation of Short-Wavelength Radiation, Phys. Rev.

Lett. 111, 084801 (2013). <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.111.084801>

- [7] Chao Feng, Haixiao Deng, Dong Wang and Zhentang Zhao, Phase-merging enhanced harmonic generation free-electron laser, New J. Phys. 16 043021 (2014).<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/16/4/043021>
- [8] Chao Feng and Zhentang Zhao, A Storage Ring Based Free-Electron Laser for Generating Ultrashort Coherent EUV and X-ray Radiation, Scientific Reports 7, 4724 (2017).<https://www.nature.com/articles/s41598-017-04962-5>

5 一种基于储存环自由电子激光产生超短相干深紫外与 X 射线光源方案研究 [Sci. Rep. 7]

A Storage Ring Based Free-Electron Laser for Generating Ultrashort Coherent EUV and X-ray Radiation

5.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Chao Feng and Zhentang Zhao (上海应用物理研究所)
- 类型：理论、数值模拟
- 链接：<https://www.nature.com/articles/s41598-017-04962-5>

5.2 摘要

对于同步辐射光源社群，产生在深紫外、X 射线频段的超短 (飞秒或更短)、相干辐射脉冲具有指标意义。这篇论文提出一种创新方案，能够有效产生良好微束团群聚的电子束用以产生相应的相干辐射。理论分析与数值模拟表明这个方案能够产生 MW 等级的峰值输出功率，纵向完全相干的飞秒深紫外、X 射线脉冲，作为同步辐射储存环光源。

5.3 贡献或创新点

原子运动与结构动力学的时间尺度大约在 100 飞秒 ($\text{fs} = 10^{-15} \text{ s}$) 左右。然而，目前基于同步加速器的储存环光源，其产生的辐射脉冲大约在几个皮秒 ($\text{ps} = 10^{-12} \text{ s}$) 量级。因此，基于储存环光源的方案，如果能够产生飞秒辐射脉冲，将具有一定的指标意义。目前来说，基于直线加速器的自由电子激光 (free electron laser, FEL) 光源已经能够满足多数实验用户需求，但是 FEL 限于低重频与非常有限的用户限制⁷，因此使用成本相对高出许多。

- 贡献：目前在同步辐射储存环加速器下，产生超短辐射脉冲的方式多依赖于安置外部飞秒激光，用来操控电子束特性，使其在一定条件下，在储存环的特定位置产生需要的超短飞秒辐射脉冲。一种目前较为普遍的方式为激光切片技术 (laser slicing)，由 A. Zholents 与 M. Zolotarev 在 1996 年提出。这种方案仅有电子束的

⁷ 由于 FEL 基于直线加速器，因此能从束线拉出来的使用者用户实验室数量非常有限。

局部“发光”，这种飞秒辐射脉冲为非相干辐射，因此亮度不高。

随后，受益于种子自由电子激光 (seeded FEL) 概念，有相干谐波产生 (coherent harmonic generation, CHG) 机制陆续被提出，如 HGHG。但是，这种谐波产生方案有一个局限，即，要产生 n 次谐波，则外部激光调制深度要求产生 n 倍的电子束团切片能散。对于电子同步加速器储存环而言，由于束团切片能散较大⁸，很难产生太高次的谐波。另外，如果操作在高重频模式，则越高次谐波产生方案对外部调制激光的功率要求⁹也将越严苛。

过去几年基于直线加速器产生高次谐波 (以达到深紫外、X 射线频段为目标) 已有长足进展，但是基于电子同步辐射储存环的方案则相对局限。

这篇论文分析利用线性传输矩阵，特别是，在 Eq.(3) 中，仅考虑电子束团在调制激光相位中零相位附近的动力学。数值模拟采用 ELEGANT 与 GENESIS，分别模拟 lattice 与 modulator 中的动力学。在数值模拟中，相干与非相干同步辐射效应已考虑。使用的参数有两种，一种基于传统三代储存环光源的电子设计参数，另一种为基于衍射极限储存环设计。

- 创新点：这篇论文提出一种方案，先使电子束经过一色散元件，如二极铁，产生角度色散，然后与调制波荡器作用之后，得到能量调制，接着经过 dogleg 形成密度调制，然后在下流的辐射波荡器发光，最终再经过第二个 dogleg 补偿横向的角度色散。这种方案将被应用在同步辐射储存环光源加速器中。

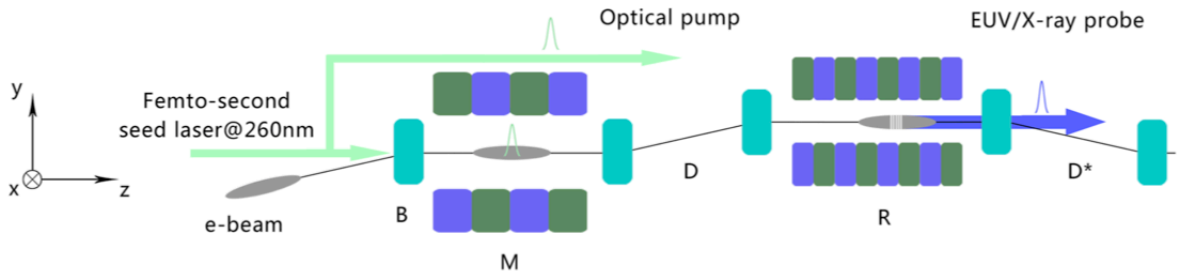


Figure 1. Schematic layout of the proposed scheme. The electron beam first passes through a bending magnet (B) to get an angular dispersion. This electron beam interacts with a femto-second seed laser pulse at 260 nm in the first undulator (M) to generate an energy modulation. The dogleg (D) is adopted to convert the energy modulation into coherent microbunching. Then the pre-bunched electron beam will be sent into the second undulator (R) for high harmonic generation. The second dogleg (D*) is used to compensate the transverse dispersion induced by the first dogleg. The seed laser can be split in two branches and one of them together with the EUV/X-ray radiation pulse can be applied for the femto-second pump-probe experiments at storage rings.

⁸比起直线加速器电子束，储存环电子束的能散约大一个数量级。对几个 GeV 的电子储存环而言，切片能散约为几个 MeV。

⁹一般需要的调制激光的峰值功率与调制深度的平方成正比。

模组中的第一个二极铁要求置于横向无色散区域，整个设置安装在一长直漂移段。第一个 dogleg 的色散由第二个 dogleg 补偿。第一个二极铁的色散则由储存环中其它位置的二极铁补偿。用于调制电子束的激光还可以分束，使一部分作为 pump 样品，然后利用电子束产生的高次谐波辐射作为 probe，进行 pump-probe 实验。

5.4 其它

基于既有 CHG 方案，如 HGHG，微束团群聚因子可以写为

$$b_n = J_n \left(nk_z \xi_c \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \right) e^{-\frac{n^2}{2} k_z^2 \xi_c^2 \frac{\sigma_\gamma^2}{\gamma^2}}$$

其中， ξ_c 为 chicane 的动量压缩因子 R_{56} 。

基于这篇论文提出的方案，微束团群聚因子可以写为

$$b_n = J_n \left(nk_z \xi_D \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \right) e^{-\frac{n^2}{2} k_z^2 \eta_D^2 \sigma_{y'}^2}$$

其中， ξ_D 为 dogleg 的动量压缩因子 R_{56} ， η_D 为 dogleg 的色散 R_{16} 。

为了减小 $\sigma_{y'}$ ，可以在入口处（即，第一个二极铁前）增加 β 函数；或者，为了减小 dogleg 的色散 η_D ，可以增加第一个二极铁的弯转角度。

6 高亮度电子束横向空间电荷效应引致的微束团不稳定性 [PRST-AB 18-05]

Transverse space-charge induced microbunching instability in high-brightness electron bunches

6.1 基本信息

- 分类：多粒子效应
- 作者：M. Venturini and J. Qiang (LBL)
- 类型：理论、数值模拟
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.18.054401>

6.2 摘要

这篇论文提出一个新的微束团不稳定性驱动机制，由束团内横向自场 (transverse self-field) 导致，有别于既有的纵向自场。给出基于这个效应的束流动力学理论模型，并解读了部分基于 LCLS-II 阶段设计的结果。

6.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇论文提出一种新的形成电子束微束团不稳定性的驱动源。下图为这个形成机制的示意图。考虑一个束团横向仅有有限 $\sigma_{x'}$ ，现在假设束团受到一能量调制有 $\delta = \delta_p \cos(kz_0)$ ，则在下流色散段 (即， $R_{16} \neq 0$ ，但未必需要 R_{56}) 将导致 x 改变，有 $x = R_{12}x'_0 + R_{16}\delta_p \cos(kz_0)$ 。束团内电子的纵向坐标也有相应滑移，有 $z = z_0 + R_{52}x'_0$ 。结合 x, z 这两个方向的映射，将有如下图所示的结果：在发生能量调制后的下游某处，将导致纵向 z 方向的束团内电子群聚效应，称横向/纵向微束团 (transverse/longitudinal microbunching) 不稳定性或二维 (2D) 不稳定性。

这篇论文将探讨这种微束团不稳定性机制与驱动源，特别地，驱动源为束团自场的空间电荷场。

- 贡献：分析一开始假设束团相空间分布为

$$f(\mathbf{x}_0; s_0) = \frac{n_z}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} e^{-\frac{(\delta_0 + \delta_p \cos kz_0)}{2\sigma_\delta^2}} \frac{1}{2\pi\epsilon_{x0}} e^{-\frac{\gamma_{x0}x_0^2 + 2\alpha_{x0}x_0x'_0 + \beta_{x0}x_0'^2}{2\epsilon_{x0}}} \frac{1}{2\pi\epsilon_{y0}} e^{-\frac{\gamma_{y0}y_0^2 + 2\alpha_{y0}y_0y'_0 + \beta_{y0}y_0'^2}{2\epsilon_{y0}}}$$

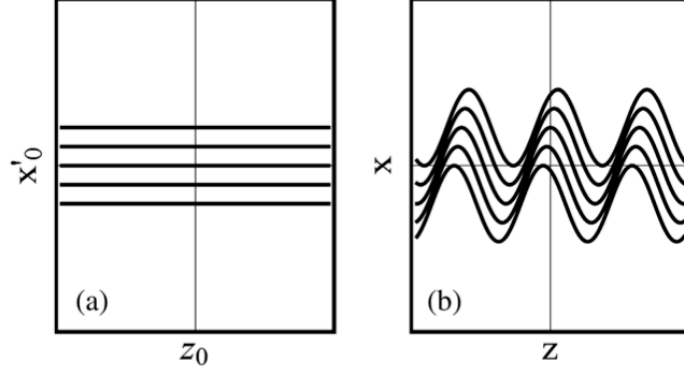


FIG. 1. A beam assumed for simplicity to have vanishing horizontal width ($x_0 = 0$) but finite angular spread, uniform density in z_0 , and carrying a small energy modulation, is represented here as a set of five uniform charge lines in the z_0/x'_0 plane (left). The beam will exhibit longitudinal/transverse microbunching (right) as it propagates through a dispersive transport line (lumping of charge along diagonal ridges).

为了简化 δ_p 后续的动力学影响，将这个分布的 δ_p 按泰勒展开，有

$$f(\mathbf{x}_0; s_0) \approx f^{(0)}(\mathbf{x}_0; s_0) + \delta_p \left. \frac{\partial f}{\partial \delta_p} \right|_{\delta_p=0} = f^{(0)}(\mathbf{x}_0; s_0) + f^{(1)}(\mathbf{x}_0; s_0)$$

接着，先考虑在没有空间电荷情况下，微扰项导致的束团密度改变，即，将相空间分布对 x', y', δ 积分

$$f^{(1)}(\mathbf{x}_0; s_0) \Rightarrow \rho^{(1)}$$

按微扰理论，这个密度微扰将引致空间电荷场。从列写在电子静止坐标的泊松方程开始，求解空间电荷场的步骤为

$$\nabla^2 \phi_b^{(1)} = \frac{e\rho_b^{(1)}}{\epsilon_0} \Rightarrow \phi_b^{(1)} \Rightarrow E_{b,x} = -\frac{\partial \phi_b^{(1)}}{\partial x} \Rightarrow \begin{cases} E_x = \gamma E_{b,x} \\ B_y \approx \gamma c E_{b,x} \end{cases} \Rightarrow F_x \Rightarrow \frac{dx'}{ds} = \frac{F_x}{cp_0}$$

可以得到空间电荷对束团内电子的 angular kick 为

$$\frac{dx'}{ds} = -\frac{4\pi r_e \hat{\rho}^{(1)} \tilde{\xi}}{\gamma k (1 + \gamma^2 \tilde{\xi}^2)} \cos(k\tilde{\xi}x + kz) = A \cos[k\tilde{\xi}x(\mathbf{x}_0) + kz(\mathbf{x}_0)]$$

横向空间电荷效应对微束团群聚因子影响的分析可以从描述相空间微扰开始

$$f(\mathbf{x}_f; s_f) = f^{(0)}(\mathbf{x}_0; s_0) + \int_{s_0}^{s_f} \frac{\partial f^{(0)}(\mathbf{x}; s)}{\partial x'} \frac{dx'}{ds} ds$$

通过将相空间积分变量回朔至初始相空间变量，可以得到在等时性 lattice 出口处的微束团群聚因子的近似表示式为

$$b_k \approx \delta_p \frac{2Ik}{\epsilon_{nx} \gamma^2 I_A} \int_{s_0}^{s_f} \frac{\eta_x^2}{\sqrt{\beta_x \beta_y}} e^{-k^2 \frac{\epsilon_{nx} \eta_x^2}{\gamma \beta_x}} ds$$

6.4 其它

这篇论文以 LCLS-II 的等时性 dogleg 为例,说明在这个设计下,虽不再像 LCLS-I 有明显的 trickle heating 效应,但可能发生 transverse/longitudinal microbunching。因此,建议 dogleg 不需要完全抵消 R_{56} ,或许部分抵消 R_{56} 可以更好地平衡 TSC 或 LSC 导致的微束团不稳定性。

7 在储存环中一种可逆种子激光电子束调制方案 [MOPB23]

Reversible seeding in storage rings

7.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Daniel Ratner and Alex Chao (SLAC)
- 类型：理论、数值模拟
- 链接：<https://accelconf.web.cern.ch/FEL2011/papers/mopb23.pdf>

7.2 摘要

目前设计阶段提出的在高亮度电子储存环中实现稳态微聚束 (steady-state microbunching, SSMB) 的方案不只一种，这篇论文提出利用“可逆”(reversible) 种子激光调制电子束作为实现 SSMB 的一种方案。这里的可逆种子激光调制电子束利用目前典型的高增益谐波产生 (HG HG) 与回声增强谐波产生方案 (EEHG) 为基础，考虑设计方案中可能的误差/偏差在电子储存环中可能对束流动力学造成的影响，从而给出对几种误差的容忍范围。

7.3 贡献或创新点

- 贡献：这篇论文是在 2010 年 SSMB 概念第一次被提出之后的接续工作。在 SSMB 储存环中，需要至少一个电子束调制段 (modulator) 使电子束形成微束团，还需要至少一个发射段 (radiator) 用来使已经群聚的电子束产生相干辐射。这篇论文聚焦调制段的设计，利用典型的高增益谐波产生 (HG HG) 与回声增强谐波产生方案 (EEHG) 为基础。由于过去这两种方案都是应用在单次通过的直线加速器，下游应用为自由电子激光 (FEL)，现在将此方案应用在储存环，则还需要考虑逐圈效应，因为每次经过调制段时，电子束的能散将相较于储存环平衡态时的能散获得相应增加。对于 HG HG 而言，能散大概增加 $H\sigma_E$ 倍，其中 H 为谐波数， σ_E 为束团平衡时的 (非相干) 能散。对于 EEHG 而言，能散大概增加 $2 \sim 3\sigma_E$ 倍，但是束线设计将复杂许多。

如果在通过调制段之后，利用“自然的”同步辐射阻尼效应使电子束冷却，则电子将需要经历几个阻尼时间 (damping time)。这将大大降低作为储存环光源的高重频

特性的优势。因此，如果有一个能够使电子调制方案“可逆”的设计，将可以大大缩短电子束需要恢复平衡态时固有能散的时间。

这篇论文分析利用 HGHG 与 EEHG 为基础的可逆调制方案，通过列写在调制段前后、辐射段前后与剩余储存环的纵向一维运动方程，可以给出初步的关于束团群聚因子分析结果。进一步考虑几种可能的误差来源，如逆调制段的振幅 ΔA 与相位 $\Delta\phi$ 、逆色散段的 ΔR_{56} 与电子本身在逆调制段的位置 Δz_f 与能量偏差 ΔE ，结合同步辐射的量子激发效应，能够给出可容忍的误差范围。这里有一个关键指标参数，称 duty factor T ，即每个电子微束团需要经历几圈之后再受到调制段作用，而仍然能够不失束流品质的在辐射段产生相干辐射。

8 预聚束电子束辐射场分析 [PRAB 20-07]

Analysis of emissions from prebunched electron beams

8.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Qika Jia (USTC)
- 类型：理论
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.070702>

8.2 摘要

这篇论文在一维自由电子激光 (free electron laser, FEL) 理论框架下分析预聚束电子束 (prebunched electron beam) 辐射场，包含相干自发辐射 (coherent spontaneous emission) 与自放大受激辐射¹⁰(self-amplified stimulated emission) 两部分，前者忽略了电子与光场的交互作用。相干自发辐射的功率正比于初始群聚因子的平方与波荡器长度。对于一般情况，这篇论文推导了辐射场输出功率公式，适用于低增益至高增益区间。这篇论文研究发现，当波荡器短于四个增益长度 (gain length) 时，只有相干自发辐射；长于四个增益长度则由自放大受激辐射主导。另外，这篇论文的分析还考虑了偏离共振条件 (detune) 时的情况。最后，这篇论文比较这种预聚束电子束辐射场的特性与波荡器操作在放大器时输出辐射场的特性。

8.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇论文通过物理上“迭代”思维，求解一维 $(2N + 1)$ 个 FEL 方程组，特别是，着重在对辐射场的解，给出辐射场在预聚束电子束操作模式下的解析解。有了解析解之后，对光场特性的分析将便利许多，并得到背后物理图像。
- 贡献：这篇论文的 Section II 给出利用物理上“迭代”思维，求解一维 $(2N + 1)$ 个 FEL 方程组后，给出辐射场的方程 [Eq. (7)]。该方程可以通过 Laplace 变换得到解析解 [Eq. (11)]。

¹⁰注意，不是“自放大自发辐射”，因为电子束团已经预聚束了，在相位上不是均匀分布。

这种预聚束电子束一般发生在电子束进入波荡器前的前置束线，如 HGHG 或 EEHG 等。因此，这篇论文在 Section III 后半部分别针对这两种外部种子激光调制方案后的预聚束电子束在下游 FEL 波荡器输出功率的分析。

这篇论文的 Section IV 讨论了几个可能感兴趣的议题，如预聚束电子束操作模式与种子 FEL 放大器模式中，FEL 功率随波荡器演变的差别，如下图所示。可以看到，在预聚束电子束模式下，在波荡器中前四个增益长度中，辐射光场输出功率的演变与种子 FEL 放大器差别较大；在四个增益长度之后，两者辐射光场输出功率的演变趋势则大致相同。图中还比较了不考虑电子束与光场交互作用的“相干自发辐射”模式，可以看到，与“自放大受激辐射”模式同样在四个增益长度后有明显区别。

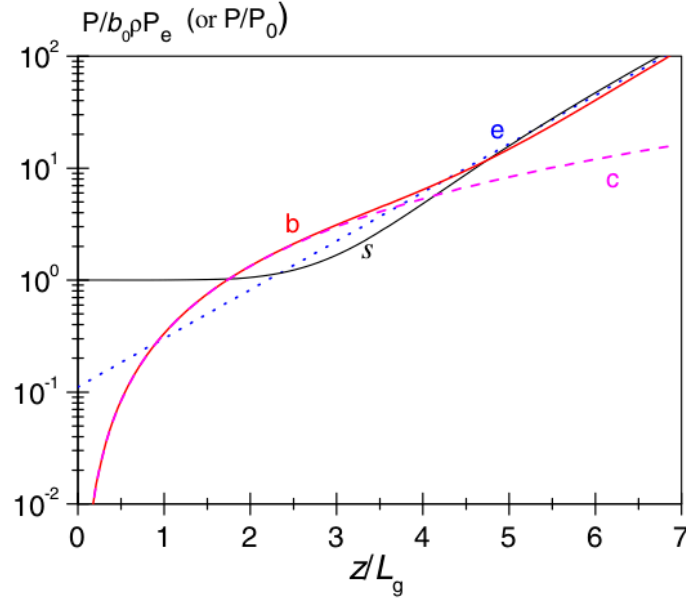


FIG. 1. The optical power growing vs undulator length ($\phi'_0 = 0$). The red line (b): the prebunched mode [Eq. (12)]. The pink dashed line (c): the coherent spontaneous emission [Eq. (8)]. The blue dot line (e): the exponential gain formula [Eq. (14)]. The black line(s): the seeded amplifier mode [Eq. (13)].

除了讨论辐射输出功率沿着波荡器的演变之外，这篇论文还考虑了不同操作模式在波荡器不同位置时，偏离共振条件时，辐射场功率的随偏离量 (detune) 的区别，如下图。

8.4 其它

这篇论文在 Section II 分析中考虑了 detune 效应，值得琢磨。

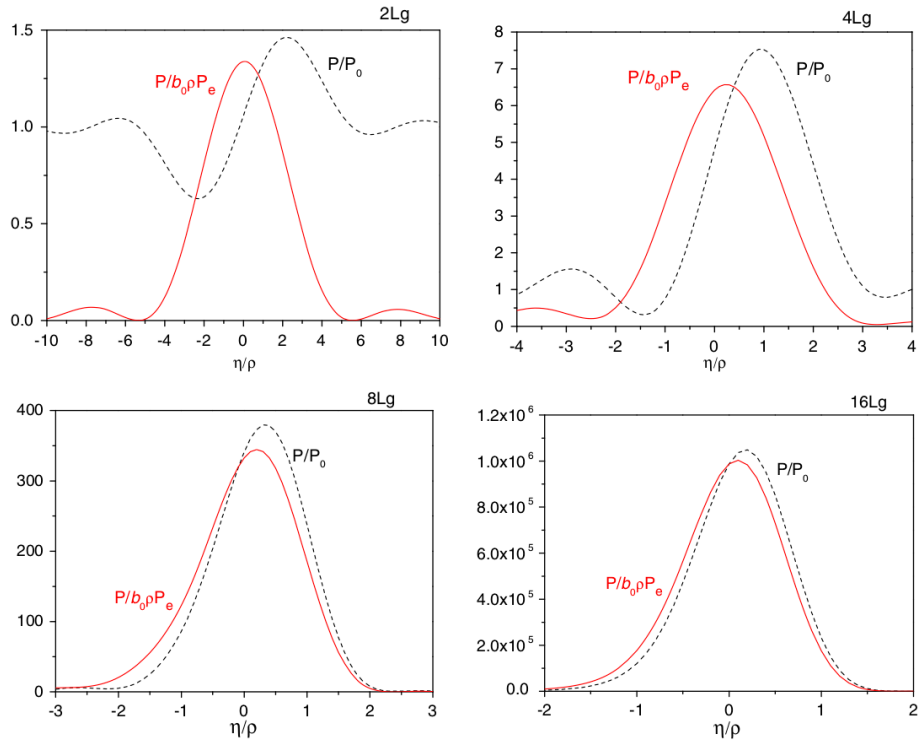


FIG. 2. The variation of the emission intensity with the detuning parameter for different interaction length. The solid line: prebunching mode; the dashed line: seeding mode.

9 自由电子激光的集体变量描述 [PRA 33]

Collective variable description of a free-electron laser

9.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：R. Bonifacio, F. Casagrande, and L. De Salvo Souza (主要机构：Dipartimento di Fisica dell'Universita, 意大利)
- 类型：理论
- 链接：<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.33.2836>

9.2 摘要

这篇论文给出高增益自由电子激光的集体变量描述方式，适用于线性指数增益区间与非线性饱和区间。

9.3 贡献或创新点

- 贡献：这篇论文是继作者在前一期一篇经典论文 [1] 基础上，将用于描述高增益自由电子激光 (free electron laser, FEL) 理论的集体变量方法进一步推广，使其不仅适用于线性指数增益区间，也近似适用于非线性饱和区间。
- 创新点：由于进入非线性饱和区间后，电子在相空间的动力学变得更为复杂，单纯利用经典的三个集体变量 $A, b = \langle e^{-i\theta_j} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{-i\theta_j}, P = \langle p_j e^{-i\theta_j} \rangle$ 将不再能够有效描述非线性饱和区间动力学，并且将出现高阶矩变量 (high order moments)。作者利用直接对 $(2N + 2)$ 个场-粒子运动方程¹¹数值求解、观察解的行为，进一步给

¹¹有些文献写为 $(2N + 1)$ 个方程，差别在于场为一复数函数，包含实部与虚部。

出基于以上三个集体变量的一组三个耦合的微分方程，主要结果如下：

$$\begin{aligned}
\frac{dA}{dz} &= b + i\delta A \\
\frac{dP}{dz} &= -A - i \langle p_j^2 e^{-i\theta_j} \rangle - A^* \langle e^{-2i\theta_j} \rangle \\
&= -A + 2b(Ab^* - A^*b) + 2i(|A|^2 - |A|_0^2) [P + (|A|^2 - |A|_0^2 - \delta)] b \\
&\quad - b [2(Ab^* - A^*b)_0 + i \langle P^2 \rangle_0] \\
\frac{db}{dz} &= -iP
\end{aligned}$$

在 $A_0 = b_0 = \mathcal{P}_0 = 0$ 附近一阶展开，可以得到线性区间的三个方程组，有

$$\begin{aligned}
\frac{dA}{dz} &= b + i\delta A \\
\frac{dP}{dz} &= -A \\
\frac{db}{dz} &= -iP
\end{aligned}$$

9.4 其它

关于自由电子激光后饱和和动力学，目前多数研究仰赖数值计算，理论分析较少，除了这篇论文外，还有 [2]。

参考文献

- [1] R. Bonifacio, C. Pellegrini, and L.M. Narducci, Collective instabilities and high-gain regime in a free electron laser, Optics Communications 50, 373-378 (1984). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0030401884901056>
- [2] Robert L. Gluckstern, Samuel Krinsky, and Hiromi Okamoto, Analysis of the saturation of a high-gain free-electron laser, Phys. Rev. E 47, 4412 (1993). <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.47.4412>

10 利用高亮度自放大自发辐射自由电子激光产生变换极限 X 射线光脉冲 [PRL 110]

Transform-Limited X-Ray Pulse Generation from a High-Brightness Self-Amplified Spontaneous-Emission Free-Electron Laser

10.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：B. W. J. McNeil, N. R. Thompson, and D. J. Dunning (主要机构：University of Strathclyde 与 ASTeC, Daresbury Laboratory)
- 类型：理论、数值模拟
- 链接：<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.134802>

10.2 摘要

这篇论文提出一种提高高增益自发辐射自由电子激光 (self-amplified spontaneous emission free-electron lasers, SASE FEL) 的方案，利用几次“滑移”使 FEL 过程“去局域化”。这个方法不需要外部种子激光或其它光学调变元件，因此适用于任意波长或重复频率。通过线性理论分析与数值模拟，发现辐射场的相干长度比起传统 SASE FEL 可能增加两个数量级，对应的辐射亮度也相应提高。此外，基于这个方案产生的软 X 射线辐射脉冲为傅立叶变换极限，对于硬 X 射线，辐射脉冲也接近变换极限。

10.3 贡献或创新点

- 创新点：通过一系列相位“滑移”器 (称 phase shifter 或 chicane)，将电子束与辐射场分开，使后方产生的辐射场调制前方电子束切片。被调制的电子束切片产生的新的辐射场，新的辐射场于是与后方辐射场相位关联，即相干。如此反复操作，最终基于 SASE 的辐射场相干性能够大大提高，输出亮度也将相应增加。

传统基于 SASE 的辐射机制，可以视为一种“局域”集体不稳定性过程。在 SASE 达饱和时，可以预期产生许多个在“局域”范围内的辐射波包，每个波包纵向长度大约 $2\pi\ell_c$ ，其中 $\ell_c = \lambda_r/4\pi\rho$ 为 cooperation length。波包彼此可以视为完全独立，其相

位没有关联。通过外部手段使将电子束与辐射场产生相对、可控制的滑移，则可以视为一种将 FEL“去局域化”的过程。此时，可以想象，上述的几个波包通过适当选取“滑移”相位后，可能在时间上叠加在一起并且相位关联 (即相干)，从而缩短辐射脉冲长度与相干性。作为可能的代价，输出功率将比传统 SASE 输出功率低。

10.4 其它

几乎同时期，非常类似的方案 [1, 2] 被提出。

这些分析中暂时忽略 phase shifter 或 chicane 的 R_{56} 可能对电子束微束团影响，目前模型假设 $R_{56} = 0$ ，即不影响电子束的群聚因子，而仅发生电子束与辐射场间的相位“滑移”。

参考文献

- [1] J. Wu, A. Marinelli and C. Pellegrini, Generation of Longitudinally Coherent Ultra High Power X-Ray FEL Pulses by Phase and Amplitude Mixing, Proceedings of FEL 2012 (TUPD07). <https://accelconf.web.cern.ch/FEL2012/papers/tupd07.pdf>
- [2] J. Wu, C. Pellegrini, A. Marinelli *et al.*, X-ray spectra and peak power control with iSASE, Proceedings of the IPAC2013. <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2013/papers/weodb101.pdf>

11 圆柱导体管中有限尺寸的聚束束流的空间电荷极限 [PRSTAB 7] Space-charge limit for a finite-size bunched beam in a circular conducting pipe

11.1 基本信息

- 分类: 射频计算与技术
- 作者: Mark Hess and Chiping Chen (主要机构: MIT)
- 类型: 理论
- 链接: <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.7.092002>

11.2 摘要

这篇论文推导了周期性有限尺寸束流串在稍微偏离圆柱形完美导体管导轴线情况下的空间电荷极限。论文的计算假设了周期性电子束可能具有任意的径向和纵向密度分布, 并给出了一些特定分布的结果, 以及未聚束 (unbunched) 和单束团 (single-bunch) 的束流的空间电荷极限。最后, 论文展示了如何将聚束 (bunched) 束流空间电荷极限和聚束束流的径向均方根包络方程应用于预测周期性永磁聚焦速调管 (periodic permanent magnet focusing klystrons) 的工作极限。

11.3 贡献或创新点

- 创新点: 这篇论文讨论速调管中纵向聚束的束团在偏轴时由于空间电荷力过强而突破磁约束的极限情况 (称空间电荷极限)。通过将纵向聚束的束团串近似为无限个周期性分布的束团, 作者推导出了单个束团质心在束团串偏离轴线时受到的来自束团串和圆柱管道镜像电荷的合力, 以此得出束团质心的哈密顿量和突破空间电荷极限的条件。这篇论文在推导过程中考虑束团的纵向和横向分布, 并得出了束团的空间电荷极限随横向尺寸增大而降低, 随纵向尺寸增大而增加的结论。
- 贡献: 基于这篇论文的理论模型, 作者讨论了多种束团分布下的空间电荷极限, 该模型适用于纵向均匀磁约束的速调管和纵向周期性磁约束速调管两种情况。作者在最后使用理论模型预测了五个速调管的运行状态, 在突破空间电荷极限的情况下, 速调管会有明显的束流功率损失。

11.4 部分公式

这篇论文推导的纵向周期性聚束的束流保留在空间电荷极限内的条件为：

$$\lambda \leq \frac{N_b m_e \omega_{c,rms}}{8}$$

其中， N_b 为单个束团内的电子数， m_e 为电子质量。在均匀纵向磁约束情况下 $\omega_{c,rms} = eB_0/m_e c$ ，周期性纵向磁约束情况下 $\omega_{c,rms} = eB_0/\sqrt{2}m_e c$ ，其中， B_0 为磁场幅值， e 和 c 分别表示元电荷和光速。 λ 的表达式如下：

$$\lambda = \frac{N_b^2 e^2 \alpha}{2\pi a^3 \gamma_b^2} \left\{ 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m m \alpha}{I_0(m\alpha) I_1(m\alpha)} \right\}$$

其中， $\alpha = 2\pi a/\gamma L$ ， a 和 L 分别是圆柱管道的半径和束团的纵向间距， γ_b 为束团的相对论因子。 $I_k(x)$ 是 k 阶第一类 Bessel 方程， A_m 是和束团分布决定的量，具体推导详见论文附录。

12 拓扑阴极: 用超材料控制电子发射的空间电荷极限 [PRAB 22-08]

Topological cathodes: Controlling the space charge limit of electron emission using metamaterials

12.1 基本信息

- 分类: 低能、多粒子动力学
- 作者: David H. Dowell (SLAC)
- 类型: 理论与设计
- 链接: <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.084201>

12.2 摘要

光电阴极发射的空间电荷极限 (space-charge limit, SCL) 决定了电子枪性能的上限。通常人们要在空间电荷极限和阴极的固有发射度之间取舍。这篇论文通过设计阴极表面的形貌, 将阴极表面的等离子体频率降低到了加速电子的频谱以下, 由此大大降低阴极的极化和镜像电荷场, 进而降低阴极的光电、热离子和场发射空间电荷限制。这篇论文发展了从阴极表面加速的圆盘电荷 (disk of charge) 的镜像电荷场理论, 该理论包括阴极介电函数的频率依赖效应。这一理论验证了线阵列 (wire array) 超材料 (metamaterial) 缓解 SCL 的概念, 从而设计了一种具有大幅降低镜像电荷场的超阴极 (metacathode), 并给出超阴极的整体设计细节。

12.3 贡献或创新点

- 创新点: 这篇论文提出了通过设计阴极表面的形貌改变阴极的介电常数, 由此抑制镜像电荷的方案。论文采用线阵列的表面形貌 (见下图), 通过控制线阵列的间距、线半径、导电系数等参数, 可以将超阴极的过渡频率降低到常规金属阴极的六个数量级以下, 使超阴极的过渡频率低于电子束发射产生的时变镜像电荷场的频率, 由此抑制镜像电荷的生成。
- 贡献: 这篇论文分析了阴极发射过程镜像电荷的时域和频域特性, 并分析了改变阴极介电常数对这时域和频率的影响, 给出线阵列的结构尺寸和超阴极过渡频率的对应公式。在此基础上, 这篇论文还详细讨论了超阴极加工的可行性和各种实

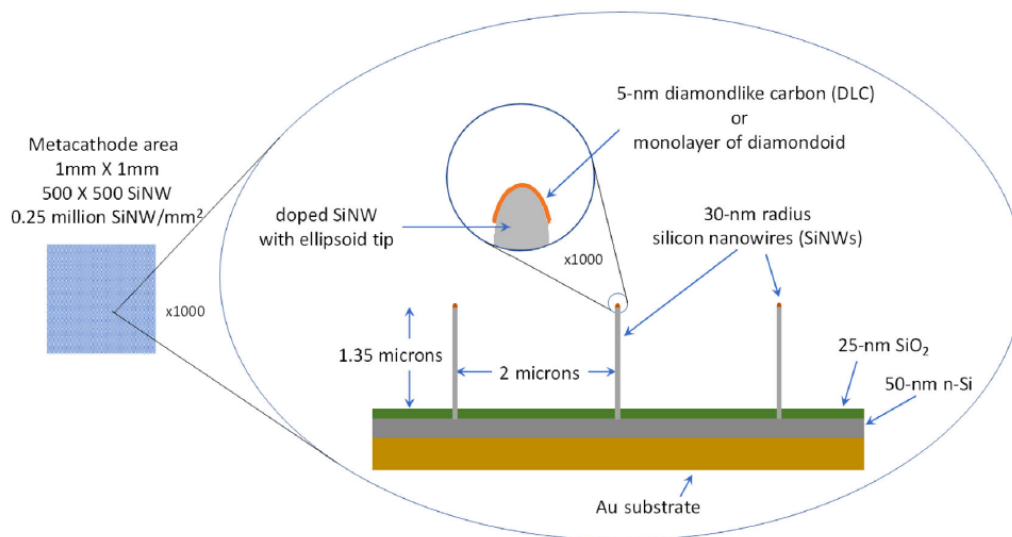


图 2: 超阴极的概念设计。

际参数对阴极性能的影响，给出超阴极的具体制造材料、尺寸和工艺技术。理论分析表明，设计的超阴极可以将镜像电荷降低至常规金属阴极的 1/14。