

加速器束流动力学期刊论文导读 (2023 年 9 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 (2023 年 9 月) 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
周剑晖	[??]	
李嘉鹏	[??]	

目录

1	面向桌上型自由电子激光的迷你波荡器进展 [LPB 36]	
	Development of mini-undulators for a table-top free-electron laser	3
2		7
3		8
4		9
5		10

1 面向桌上型自由电子激光的迷你波荡器进展 [LPB 36]

Development of mini-undulators for a table-top free-electron laser

1.1 基本信息

- 分类：自由电子激光
- 作者：G. Petrov et al. (主要机构：NRL 海军研究所，美国)
- 类型：理论、模拟
- 链接：<https://www.cambridge.org/core/journals/laser-and-particle-beams/article/abs/development-of-miniundulators-for-a-tabletop-freeelectron-laser/37A3DDE16AC5AB529DBC38A88542B07F>

1.2 摘要

近年来，激光尾场加速器 (laser wakefield accelerator, LWFA) 的发展引起了人们对紧凑 X 射线辐射源的兴趣，例如，桌上型“台式”自由电子激光器。然而，使用传统的永久磁铁的波荡器装置，系统尺寸很大。这篇论文评估了新型迷你波荡器装置与 LWFA 结合使用的可能性，使波荡器装置的尺寸与 LWFA 实验的加速距离 (几个 cm) 相当。这篇论文还描述了使用激光加工永久磁铁制作的原型波荡器装置在这一应用中的使用情况，并确定了该系统的辐射特性和限制。基于此设计，在密西根大学使用 LWFA 电子束进行了初步的电子传播和 X 射线辐射测量。

1.3 贡献或创新点

- 创新点：讨论了基于迷你波荡器形成的 X 射线自由电子激光装置，电子束经过时产生的辐射特性模拟评估。使用的波荡器参数与电子束参数总结如下表 Table 1 与 Table 2。

此外，结合迷你波荡器与激光尾场加速器产生的 400 MeV 电子束，这篇论文后半部分描述了设计初步实验量测的构想与结果。由于设计实验涉及的迷你波荡器周期数仅有 50，不足以产生激光，只有 X 射线波荡器 (非相干) 辐射。甚至，目前量测到的信号不足以区分是波荡器 (非相干) 辐射或是电子束与迷你结构交互作用产生的宽带 X 射线信号。

Table 1. Electron beam and undulator parameters for the mini-undulator and LCLS-FEL

Parameter	LCLS FEL	Mini-undulator	Ratio
Undulator length (m)	110	1	~ 100
Undulator period (cm)	3	0.04	~ 75
Number of undulator periods	3600	2500	~ 1.5
Undulator field (T)	1.25	0.2	~ 6
Undulator strength parameter	3.5	7.5×10^{-3}	~ 500
Fundamental wavelength (nm)	0.12	1–100	~ 0.01
Pierce parameter	4.5×10^{-4}	10^{-3} – 10^{-4}	~ 1
Gain length (m)	4.4	0.02–0.2	~ 40
Electron energy (GeV)	13.6	0.02–0.25	~ 100
Bunch duration (fs)	200	20	~ 10
Bunch charge (nC)	1	0.1	~ 10
Bunch current (kA)	3.4	5	~ 1

Table 2. Electron bunch parameters

Parameter	Value
Q [C]	0.1
D [μm]	20
τ [fs]	20
N_e	6×10^8
V [m^{-3}]	9.4×10^{-16}
n_e [m^{-3}]	6.4×10^{23}
λ_p [μm]	44
λ_p/λ_u	0.11

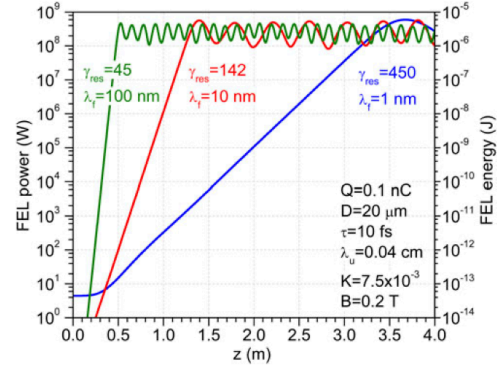


Fig. 3. Power amplification and FEL pulse energy as a function of the length z traveled in the undulator for beam energies $\gamma = 450, 142$ and 45 , corresponding to fundamental wavelengths 1, 10 and 100 nm. The energy above resonance at the undulator entrance is $\eta = (\Delta\gamma/\gamma_{\text{res}})_{z=0} = 10^{-4}, 3 \times 10^{-4}, 10^{-3}$, respectively. Electron bunch parameters: $Q = 0.1$ nC, $D = 20$ μm , $\tau = 20$ fs, $I = 5$ kA. Undulator parameters: $\lambda_u = 400$ μm , $B_0 = 0.2$ T and $K = 7.5 \times 10^{-3}$.

- 贡献：早期关于桌上型自由电子激光概念由两组人马提出。第一组在 2007 年由 Eichner 等人、Gruner 等人提出，在 VUV 波段 (25 nm), $\lambda_u = 5$ mm, $K = 0.5$, $L_{\text{sat}} = 0.8$ m，利用拍瓦 (petawatt, 10^{15} W) 激光产生电子束，实验在 2009 年由 Fuchs 等人得到验证。第二组在 2008 年由 Nakajima 提出，在红外光波段。此时，桌上型装置要求波荡器周期约为 mm 量级。近期，对桌上型波荡器周期的要求提升到 100 μm “迷你”量级，通过激光加工制成。

当采迷你波荡器时，由于波荡器周期有量级减小，其它相应物理量也要跟着调整。因此，分析时需要一些定标 (scaling) 关系。由 FEL 共振关系

$$\lambda_f = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

再根据 Table 2 中的电子束参数，整理如下结果

$$\begin{aligned}\rho &= 5.3 \times 10^{-2}/\gamma \\ L_{\text{gain}} [\text{m}] &= 3.5 \times 10^{-4}\gamma \\ L_{\text{sat}} [\text{m}] &\cong 7.5 \times 10^{-4}\gamma\end{aligned}$$

为了满足以上要求，目前电子束能量已经容易满足，但是，若要求波荡器整体总长度 ~ 1 m，则电子束能散仍比 Pierce 参数 ρ 所要求达到的目标稍大。

数值模拟采一维、稳态模拟，结果如上面 Fig. 3 所示。三维效应通过谢明拟合公式 (Ming Xie fitting formula) 估算，细节此处不论，可以参考介绍 FEL 的教科书。

这篇论文后半部分描述初步实验设计与结果。由于电子束能量分布仍太宽泛，不足以产生激光过程 (lasing)，这里更多的是验证多数电子能够顺利通过迷你波荡器，参考下图 Fig. 4。

目前实验结果显示，迷你波荡器能够成功与激光尾波加速器配合使用。但是，电子束需要经过更准确控制以避免与波荡器的内壁相互作用并产生明显的韧制辐射。如果要观测到显著的 X 射线波荡器发射，迷你波荡器的长度需要是目前这些实验中使用的原型的多倍才行。

1.4 其它

如上所述，由于设计实验涉及的迷你波荡器周期数仅有 50，不足以产生激光过程 (lasing)，甚至，目前量测到的信号不足以区分是波荡器 (非相干) 辐射或是电子束与迷

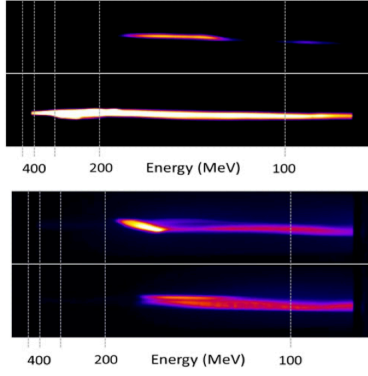


Fig. 5. Electron beam spectra taken without traveling through the undulator (top) and traveling through the undulator (bottom). Although the electron beam charge is slightly reduced after traveling through the undulator the spectral shape is similar. The change in beam charge is within shot-to-shot variability and we estimate that the majority of the electron beam from an LWFA is easily able to pass through an undulator of these dimensions.

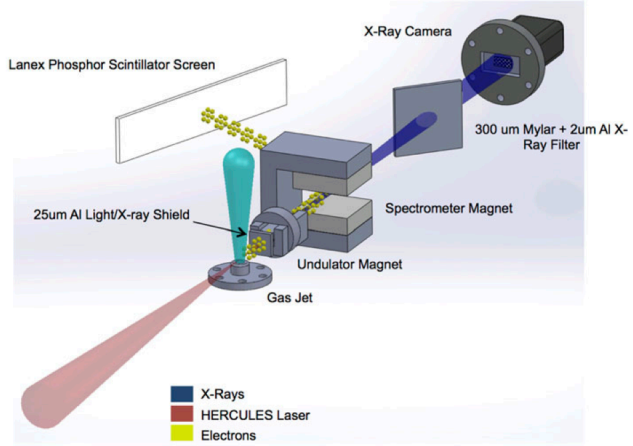


Fig. 4. Diagram of the set-up for preliminary measurements using the micro-undulator in a laser wakefield accelerator set-up.

你结构交互作用产生的宽带 X 射线信号。此外，激光尾场加速器产生的电子中包含暗电流成分，这些暗电流造成背景信号可能包含韧致 (bremsstrahlung) 辐射，后阶段还需进一步探究，参考下图 Fig. 6。

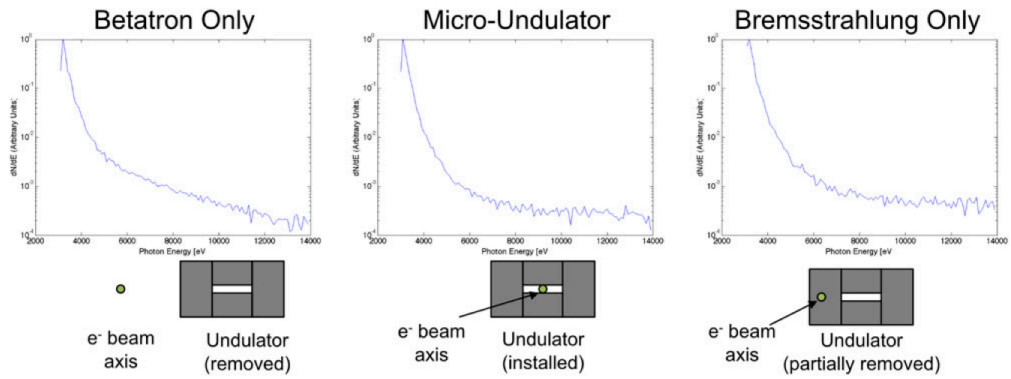


Fig. 6. X-ray spectrum from the experiment under three different conditions (corresponding to the diagrams). The three conditions correspond to (a) the electron beam passing outside the undulator, (b) the electron beam traveling through the undulator, and (c) the electron beam striking the undulator material (generating) bremsstrahlung. Although there is a slight increase in the X-ray signal from the bremsstrahlung case the total photon spectrum is roughly similar. Further work showed that these X rays were mainly caused by a large divergence dark current in the beam.

NIMA 导读
日期: 2023/9/2

导读成员: 蔡承颖

2

2.1 基本信息

- 分类:
- 作者:
- 类型: 理论、模拟
- 链接:

2.2 摘要

2.3 贡献或创新点

- 创新点:
- 贡献:

2.4 其它

NIMA 导读
日期: 2023/9/3

导读成员: 蔡承颖

3

3.1 基本信息

- 分类:
- 作者:
- 类型: 理论、模拟
- 链接:

3.2 摘要

3.3 贡献或创新点

- 创新点:
- 贡献:

3.4 其它

NIMA 导读
日期: 2023/9/4

导读成员: 蔡承颖

4

4.1 基本信息

- 分类:
- 作者:
- 类型: 理论、模拟
- 链接:

4.2 摘要

4.3 贡献或创新点

- 创新点:
- 贡献:

4.4 其它

NIMA 导读
日期: 2023/9/5

导读成员: 蔡承颖

5

5.1 基本信息

- 分类:
- 作者:
- 类型: 理论、模拟
- 链接:

5.2 摘要

5.3 贡献或创新点

- 创新点:
- 贡献:

5.4 其它