

带光速调管的高增益高次谐波振荡器自由电子激光模拟*

顾小卫†

(浙江理工大学信息学院, 杭州 310018)

(2012年7月4日收到; 2012年11月24日收到修改稿)

本文提出一种可产生高增益高次谐波辐射的自由电子激光新结构, 将光速调管结构置于振荡器光腔中构成 HGHG 中的调制器, 可以去掉传统 HGHG 调制器中的种子激光. 这种结构可以具有振荡器的高重频、纵向相干和窄带宽等优点. 采用 GINGER 模拟软件对此结构进行详细模拟, 在高达 12 次谐波仍能很好的输出.

关键词: 激光器, 光速调管, 高增益高次谐波, 振荡器

PACS: 41.60.Cr, 42.60.Rn, 42.55.-f

DOI: 10.7498/aps.62.094102

1 引言

近年来自由电子激光器件是被认为唯一能够提供红外到硬 X 射线波段范围内的相干短脉冲辐射源. 目前世界上对相干短波长光波越来越感兴趣, 反应在发达国家的很多概念性报告^[1-3]及相关最新文献中^[4-6], 同样体现在得到发展中国家基金资助的文献中^[7-12]. 在 nm 和亚 nm 波段, 自由电子激光自放大自发辐射的 SASE^[13,14] 和高增益高次谐波的 HGHG^[15,16] 是主要的候选者. SASE 辐射来源于电子束的噪声启动, 结果具有很好的横向相干性, 但很差的纵向相干性(时间相干), 还有相对大的 shot-to-shot 的能量和光谱扰动. HGHG 谐波辐射比 SASE 的明显好处在于, 利用初始种子激光频率进行倍频, 产生全相干的谐波辐射. 但 HGHG 的倍频数比较小, 因需要大的能量调制而增加了电子束能散从而降低辐射段效率, 这些情况在一定程度上限制了它的广泛应用. 因此必须增强谐波辐射的研究, 这就触发了新工作模式的探索, 如 2009 年

Stupakov 提出的 Echo-enabled harmonic generation (EEHG) 自由电子激光概念^[17,18], 单级可以实现高次谐波, 特点是相对小的能量调制, 高次谐波选择性和低种子激光能量需要, 因其有很高的谐波转换效率而备受关注, 但其仍然需要种子激光激励, 无法实现高重复频率工作. 本文研究无需种子激光, 由光速调管放入光学谐振腔构成 HGHG 中的调制器, 利用自发辐射作为种子激光和光学谐振腔所构成的振荡器, 有望实现高重频、纵向相干和窄带宽的 X 射线输出.

2 OKHG HG 振荡器结构

Dattoli 在 2004 年^[19]曾提出光束调管 (optical klystron, OK) 结构, 用来降低电子束能散. 在此基础上提出 OKHG HG 振荡器结构如图 1 所示: 将光速调管加入在振荡器中, 相当于传统 HGHG 的第一个调制器, 唯一不同的是, 它会有有效的控制腔内辐射场能量, 调制幅度不会太大, 使得电子束能散能够保持在可接受的范围内.

* 国家自然科学基金(批准号: 60971034)、浙江省自然科学基金(批准号: LY12F02041)和浙江理工大学科研启动基金(批准号: 1104826-Y)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gxw@zstu.edu.cn

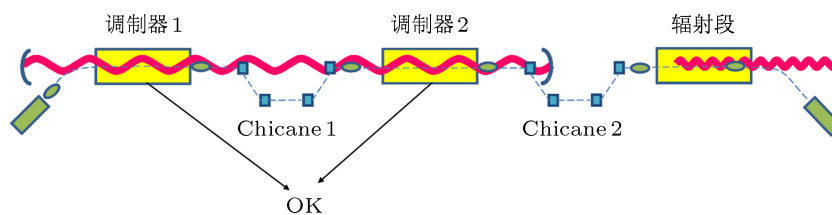


图1 OKHGHG 装置示意图

3 参数选择

对于辐射镜子的选择, 要考虑镜子材料对光场这一波段的反射系数, 经过 LBNL 劳伦斯伯克利国家实验室材料组 [20] 对材料反射的详细研究发现, 只有选择多层材料才能工作在深紫外和软 X 射线波长段, 当选择 Mo/Si 这种多层材料时发现, 发射系数较高. 图 2 是通过数据库得到的 Mo/Si 这种多层材料对光场的反射系数图. 选择这种多层材料的反射镜子, 在 13.4 nm 波段, 对光场能量的反射系数为 69.2%. OKHGHG 振荡器结构所用参数如表 1 所示.

4 OKHGHG 振荡器稳态数值模拟

GINGER 是多维, 具有多种模拟模块的自由电子激光软件, 是 Fawley [21] 来维护和开发的. 可以模拟稳态和时域单 Pass 的 SASE 放大器, 光速调管,

波导型自由电子激光, 还可以模拟 HGHG 的谐波辐射, 最近又加入了振荡器模块, 应该说 GINGER 是一个多功能的自由电子激光软件. 模拟 OKHGHG 系统, 需要在第一个振荡器结束后输出粒子和场的信息, 然后经过 Chicane2, 最后输入辐射段中得到相应的高次谐波辐射.

4.1 稳态模拟结果

通过 GINGER 进行稳态模拟, 得到如下结果. 图 3 所示为电子束在经过 OKHGHG 振荡器调制后的相空间图, 电子束类似 HGHG 作 sin 函数调制, 从纵坐标上发现电子束的能散还不到 1(以 γ_0 为单位), 能散小有利于辐射段性能. 图 4 是经过 Chicane2 后电子束的聚束因子随谐波数的变化关系图, 可看出以指数衰减, 跟 HGHG 的一维分析理论一致 [9,10], 在 12 次谐波时, 聚束因子仍有 0.0868.

表1 13.4 nm 的 OKHGHG 振荡器参数

电子束参数		种子激光参数	
归一化发射度/m.mrad	1×10^{-7}	波长/mm	13.4
能量/GeV	2.4	瑞利距离/m	14.7
能散/keV	24	光束腰位置/m	0
电流/A	150	最小模光束腰/ μm	150
束斑/m	1.2×10^{-5}	初始功率/W	1
振荡器参数 (光腔内)		光腔参数	
归一化场值	2.7	总长度/m	37
周期/m	0.07	镜子曲率/m	30.8
总长度/m	1.4	功率损耗/%	46.2
色散段参数		辐射段参数	
R_{56}^1/m	4.1×10^{-5}	振荡器归一化场值	1.11
长度 (1)/m	1.2	振荡器周期/cm	2.2
R_{56}^2/m	1.7×10^{-5}	振荡器总长度/m	23.408
长度 (2)/m	1.2	辐射波长/nm	1.12

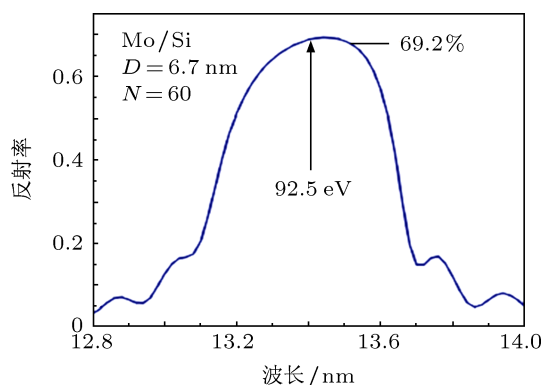


图2 Mo/Si材料对光场的反射系数

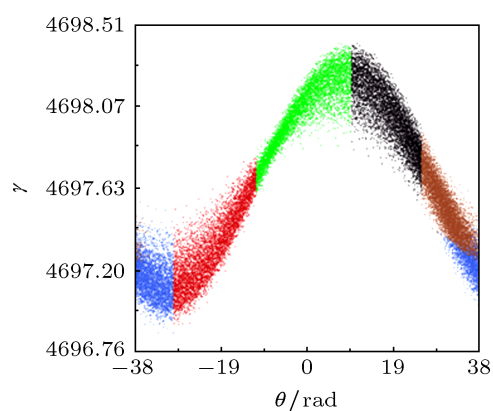


图3 (OKHGHG)振荡器出口处电子束相空间图

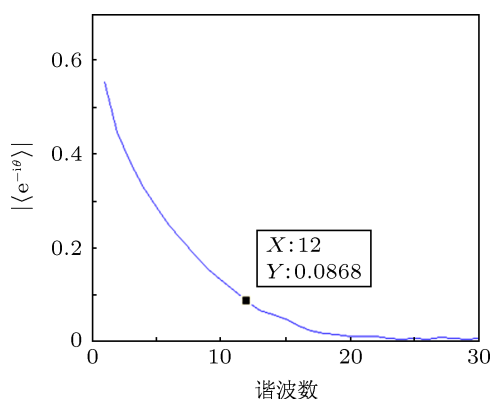


图4 经过 Chicane2 后, 聚束因子随谐波数的变化图

4.2 辐射段优化参数及模拟结果

由于电子束非零发射度或者四极铁聚束导致最大增益发生在比理想条件下由共振条件算出摇摆器参数略小, 为得到最佳辐射输出, 特对辐射段摇摆器无量纲参数进行优化, 其 GINGER 摇摆器标度参数为 AWUDULT(默认值为 1) 进行扫描,

从 0.99600 到 1.0000. 图 5 输出辐射功率与 AWDMULT 的变化关系图, 最大值发生在 0.9992 处, 同样图 6 聚束因子最大值也在 0.9992 处, 这就优化得到最佳辐射段摇摆器参数.

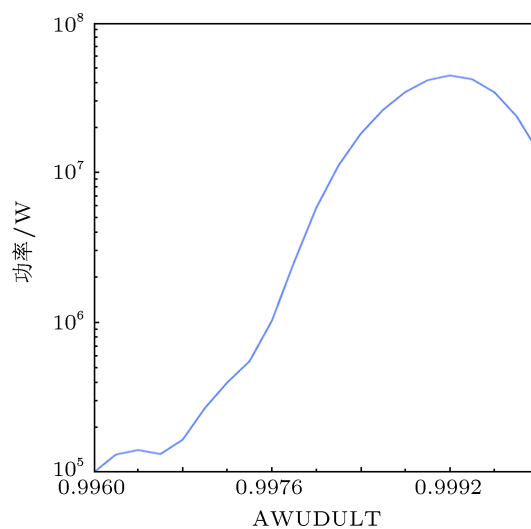


图5 输出辐射功率与 AWDMULT 的变化关系

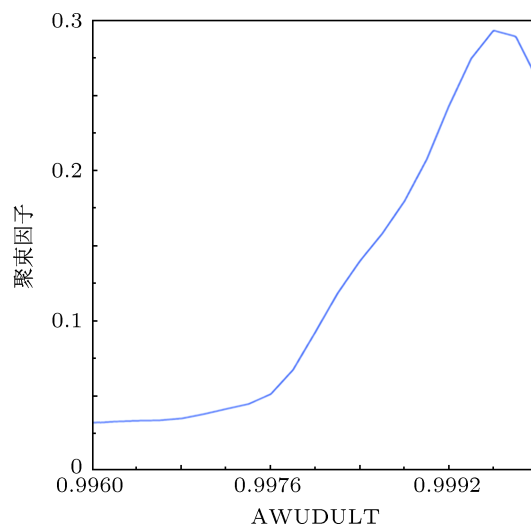


图6 聚束因子与 AWDMULT 的变化关系图

通过 Chicane2 后得到电子束密度分布具有丰富的高次谐波成分, 这里选定 12 次谐波, 下面从电子束经过 Chicane2 后, 通过辐射段时, 随机选取几个点 ($z = 0, 2, 4, 7, 11, 15$ m) 来观察辐射段对 12 次谐波放大时, 电子束相空间是如何演变的. 从图 7 中可见, (a)—(f) 电子束相空间从一个波长周期调制成 12 个波长周期, 很显然辐射段中原波长的 12 次谐波对电子束作了波长调制, 在 $z = 15$ m 后, 调制已完成, 此时的辐射功率和聚束因子都是最大的, 见图 8 和图 9.

通过辐射段得到辐射场功率随摇摆器长度的变化图 8 所示. 由于电子束进入辐射段已具有相当大的聚束, 因此辐射场功率很快指数上涨达到饱和, 饱和功率超过 100 MW. 图 9 为电子束在辐射段中

的聚束因子随摇摆器长度的变化图. 从开始的 0.1 一直上涨到 15 m 多的地方达到最大值 0.62. 由此可知, 此种结构在高达 12 次谐波的辐射仍然可以得到很好的输出.

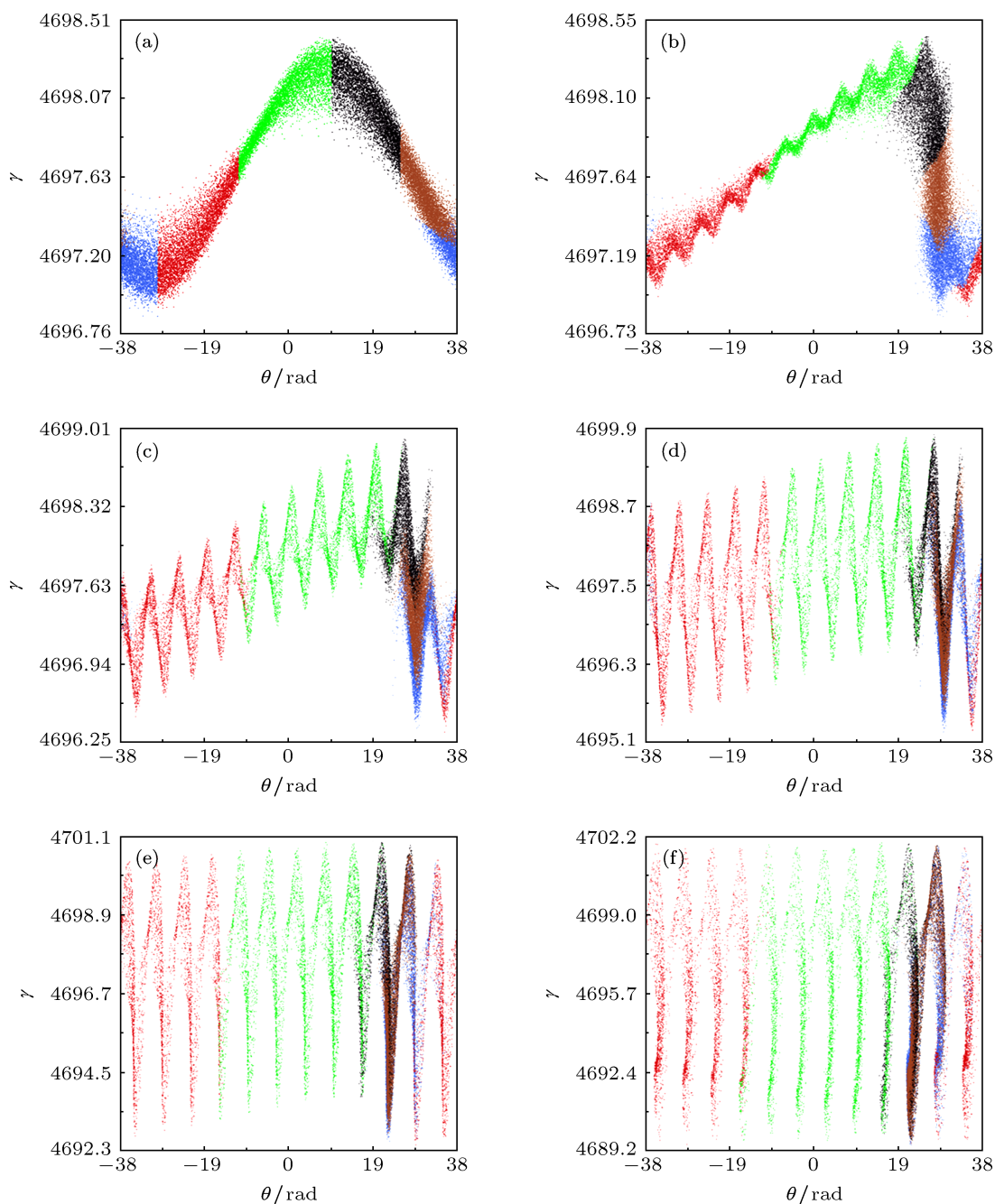


图 7 辐射段各随机点处电子束相空间演变图 (a) $z = 0$ m; (b) $z = 2$ m; (c) $z = 4$ m; (d) $z = 7$ m; (e) $z = 11$ m; (f) $z = 15$ m

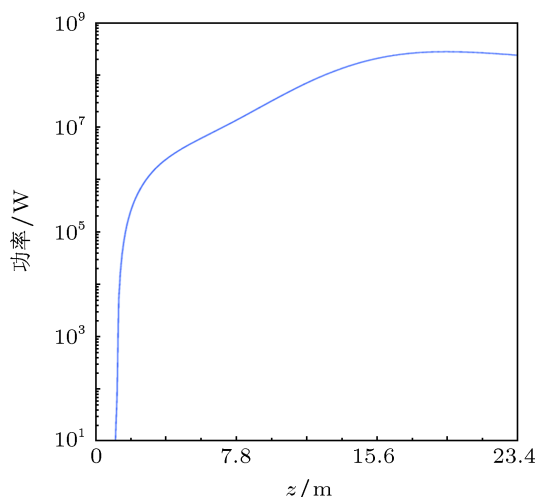


图8 辐射场功率随摇摆器长度变化

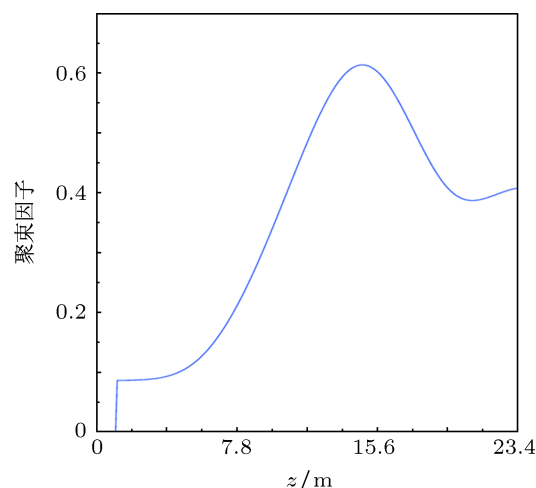


图9 聚焦因子随摇摆器长度变化

5 结论

本文对利用 OK 结构加入振荡器, 作为 HGHG 的一个调制器的创新结构进行了详细的数值模拟研究, 对振荡器镜子反射系数进行分析并对摇摆器参数进行了优化, 最终获得电子束能散小, 得到高

质量的可调谐、高重频、纵向相干和窄带宽的 12 次谐波辐射. 本文的研究结果将为硬 X 射线自由电子激光的研制和发展提供了一个可行的方案.

感谢美国加州大学伯克利分校 J.S. Wurtele 教授, P. Gandhi 博士生以及劳伦斯伯克利国家实验室的 G. Penn 研究员和 B. Fawley 有益讨论和无私帮助.

- [1] Richard F, Schneider J R, Trines D, Wagner A, *TESLA Technical Design Report*, 2001
- [2] Robinson A L, Plummer B, *Science and Technology of Future Light Sources*, 2008
- [3] Arthur J, Bane K, Bharadwaj V, *Linac Coherent Light Source Design Study Report*, 1998
- [4] Huang Z R, Lindau I 2012 *Nat. Photonics* **6** 505
- [5] Allaria E, De Ninno G 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 014801
- [6] Bartolini R 2011 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **657** 177
- [7] Zahedian Maryam, Maraghechi B, Rouhani M H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034101
- [8] Saviz S, Aghamir F M, Mehdian H, Ghorannevis M 2011 *Chin. Phys. B* **20** 074101
- [9] Meng X Z, Wang M H, Ren Z M 2011 *Chin. Phys. B* **20** 050702
- [10] Lin X L, Zhang J B, Lu Y, Luo F, Lu S L, Yu T M, Dai Z M 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 044101
- [11] Kim S H 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 054101
- [12] Kim S H 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 011201
- [13] Kondratenko A, Saldin E 1980 *Part. Accel.* **10** 207
- [14] Bonifacio R, Pellegrini C, Narducci L M 1984 *Opt. Commun* **50** 373
- [15] Wu J, Yu L H 2001 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **475** 104
- [16] Yu L H, Babzien M, Ben Zvi I, DiMauro L F, Doyuran A, Graves W, Johnson E, Krinsky S, Malone R, Pogorelsky I, Skaritka J, Rakowsky G, Solomon L, Wang X J, Woodle M, Yakimenko V, Biedron S G, Galayda J N, Gluskin E, Jagger J, Sajaev V, Vasseran I 2000 *Science* **289** 932
- [17] Stupakov G 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 074801
- [18] Xiang D, Stupakov G 2009 *Phys. Rev. Spec. Top-AC* **12** 030702
- [19] Bartolini R, Dattoli G, Giannessi L, Ottaviani P L 2004 *Opt. Commun* **230** 205
- [20] <http://henke.lbl.gov/multilayer/survey.html>
- [21] Fawley W M, A User Manual for GINGER and its Post-Processor XPLOTGIN, Report LBNL-49625

Simulation of high gain high harmonics oscillator with optical klystron free electron laser*

Gu Xiao-Wei[†]

(School of Info Sci & Tech, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

(Received 4 July 2012; revised manuscript received 24 November 2012)

Abstract

A possibility of new structure for high harmonics high gain (HGFG) free electron laser is proposed, in which the structure of the optical klystron is placed in the resonance cavity to form the HGFG modulator. This particular modulator can remove seed laser of the conventional HGFG. Such a scheme will be beneficial to high-repetition-rate, full coherence and narrow bandwidth. Detail simulation by GINGER was given, showing that up to 12 harmonics the output of the oscillator is still very well.

Keywords: lasers, optic klystron, HGFG, oscillator

PACS: 41.60.Cr, 42.60.Rn, 42.55.-f

DOI: 10.7498/aps.62.094102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60971034), the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation, China (Grant No. LY12F02041), and the Science Foundation of Zhejiang Sci-Tech University (ZSTU), China (Grant No. 1104826-Y).

[†] Corresponding author. E-mail: gxw@zstu.edu.cn