

同轴波导自由电子激光放大器的粒子模拟

钟 辉, 杨梓强, 梁 正

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】采用PIC模拟方法对同轴混合铁磁摇摆器自由电子激光器进行了研究,分析了等离子体填充对其性能的影响。粒子模拟结果表明,这种同轴摇摆器结构FEL在工作电压较低(205 kV)的情况下仍可以得到较好的放大输出,效率达到27.3%,饱和功率达到兆瓦级;等离子体填充对器件的性能有一定的影响,改善了束流传输特性。

关键词 等离子体; 自由电子激光; 摇摆器; 粒子模拟

中图分类号 O441.4 文献标识码 A

PIC Simulation of a Coaxial Free Electron Laser Amplifier

Zhong Hui, Yang Ziqiang, Liang Zheng

(School of physical Electronics, UESTC of China ChengDu 610054)

Abstract A coaxial hybrid wiggler free-electron laser(FEL) amplifier with and without plasma filling is studied by a method of PIC simulation in this paper. The results show that signal in FEL amplifier with a coaxial hybrid wiggler can get an efficient amplification even at a low voltage of 205 kV. The efficiency of the amplifier is upto 27.5% and the saturation power arrives to a MW level. Plasma has some beneficial effects on the characteristics of the FEL amplifier, for example, it can improve the characteristic of electron beam transmission.

Key words plasma; free-electron laser amplifier; wiggler; PIC simulation

自由电子激光(Free-Electron Laser, FEL)具有功率高、波长连续可调等一系列优点^[1],是一种很有发展前景的高功率源,但也因其装置较大等因素制约了它的应用。小型化已成为自由电子激光发展的一个重要因素。为提高自由电子激光器效率、功率,同时满足小型化的要求,这就需要减小摇摆器的周期、降低工作电压,文献[2]提出了同轴混合铁磁摇摆器结构。工作在这种摇摆器的FEL放大器需要采用环形相对论电子注,由于具有圆对称性,稳定性也较好。国外在这方面开展了积极的研究工作^[3]。本文采用二维半全电磁PIC粒子模拟方法,对同轴混合铁磁摇摆器型FEL放大器进行初步研究,并分析在这种结构中填充等离子体对其工作特性的影响。

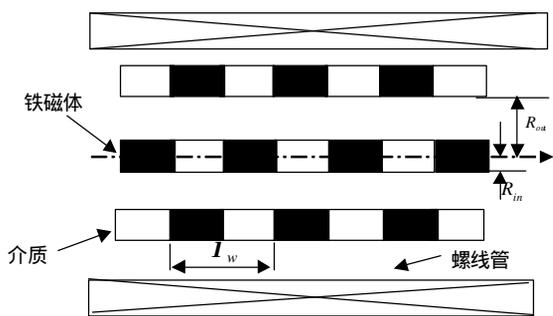


图1 同轴混合铁磁摇摆器示意图

1 物理模型

用于PIC模拟的FEL放大器的结构如图1所示。该结构中磁场采用同轴混合铁磁摇摆器,同轴波导的内外半径分别为1.4 cm、2.8 cm,电子注采用空心环形注,注内外半径分

收稿日期: 2003 - 09 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60178011)

作者简介: 钟辉(1976 -),男,硕士生,主要从事自由电子激光方面的研究。

别为 1.9 cm, 2.3 cm, 摇摆器周期长 $I_w = 2.54$ cm, 均匀区磁场为 $B_r = 1$ KG。在这种 FEL 放大器中, 由于结构是完全轴对称, 选取轴对称的 TE_{01} 模为工作模式^[4], 因此对这种结构完全可以采用二维半全电磁模拟软件进行分析。

2 粒子模拟结果及分析

2.1 无等离子体情况

在模拟中, 先输入一个功率为 1 kW, 频率为 15 GHz 的 TE_{01} 模信号, 得到波导中的场分布如图 2 所示, 然后一个电压为 205 kV, 电流为 100 A 的空心环形电子注入相互作用区, 图 3 所示为电子在相互作用区沿纵向的能量分布图, 从图中可以看出电子在相互作用区得到了较强的调制作用。

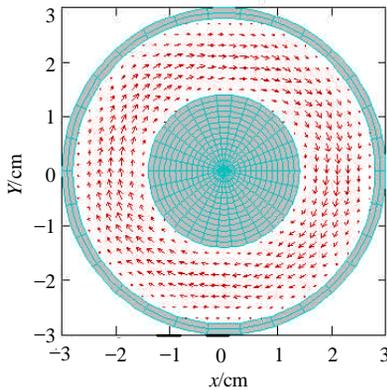


图 2 波导截面电场分布图

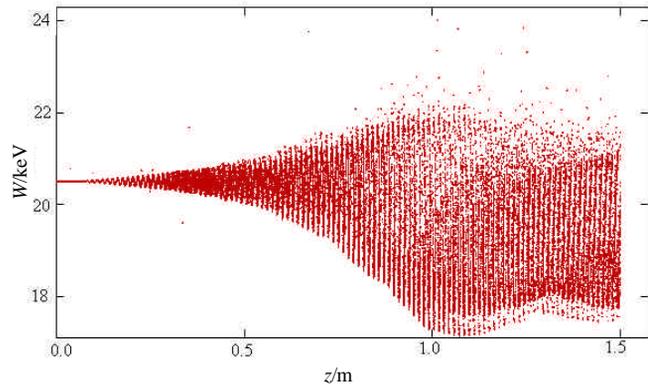


图 3 $t=30$ ns 时电子在相互作用区沿纵向的能量分布图

图 4 所示为输出功率沿 z 轴变化情况。从图中可看出在开始 40 cm 距离内信号功率无明显变化, 然后开始增大, 过了 90 cm 处, 功率急剧增大, 在 128 cm 处系统达到饱和, 饱和功率为 5.6 MW, 效率为 27.3%。图中出现了以周期为 $I_w/2$ 的快速振荡, 这是由于下拍波影响引起的, 在平板摇摆器 FEL 中也观察到了类似情况。在电压、电流、电子注位置、输入信号功率保持一致情况下, 改变输入信号频率, 得到一组不同频率信号的饱和功率曲线, 如图 5 所示。输入信号为 1 kW。由图可以看出在 14 ~ 16 GHz 范围内获得了较高的饱和功率, 而随后饱和功率出现了明显的下降, 这与用非线性方法计算得到的结论相符^[5]。

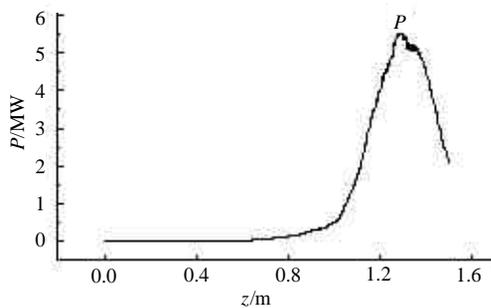


图 4 15 GHz 信号功率演化曲线

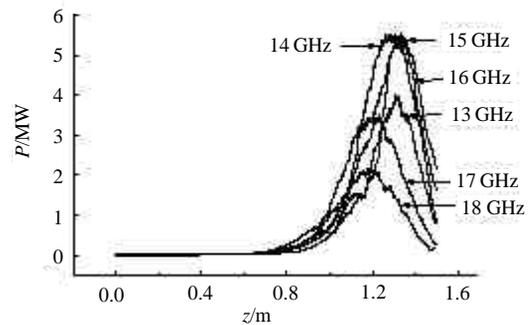


图 5 不同频率信号的饱和功率曲线

为了提高效率, 可使用参数渐变的摇摆器, 从而达到延缓饱和状态的发生, 提高饱和功率的目的。结合模拟过程的观察, 摇摆器参数渐变位置在本文中选择在 $Z/I_w = 15$, 即电子开始处于减速场区的位置。渐变参数依次选 $e_w = 0, -0.0003, -0.0005, -0.0010, -0.0015, -0.0020$ 得曲线如图 6 所示。从图中可看出渐变对放大器的影响是比较明显的。随着 e_w 绝对值的不断增大, 饱和距离增大, 饱和功率有所提高, 但当 e_w 绝对值太大时,

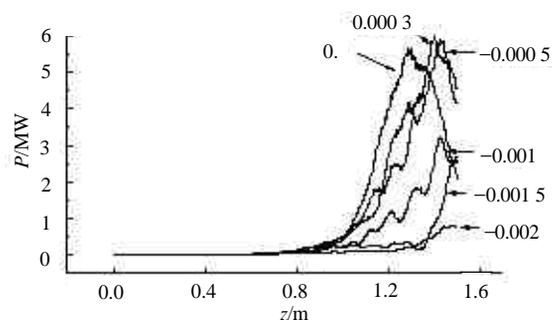


图 6 摇摆器渐变对饱和功率的影响

达到饱和距离变的过长,这不是所希望的,所以 e_w 数值的选取一般不要小于-0.000 5。从模拟结果分析,在所选定的这几组 e_w 数据中, $e_w = -0.000 3$ 时,效率最大达到了32.87%。

2.2 填充等离子体对系统性能的影响

模拟中采取在每个网格中放入一定数目正负粒子的方式,即在每个网格中加入等量的电子和氩离子,来描述所需等离子体。

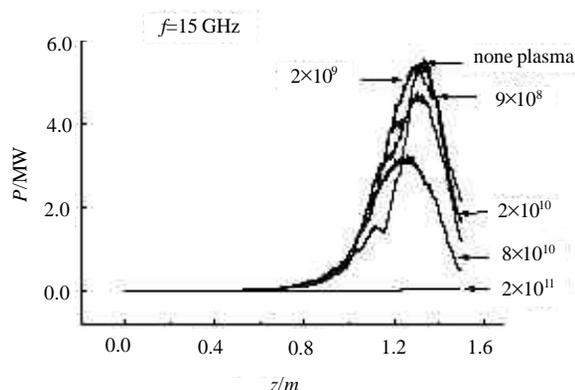


图7 等离子体密度对微波功率的影响

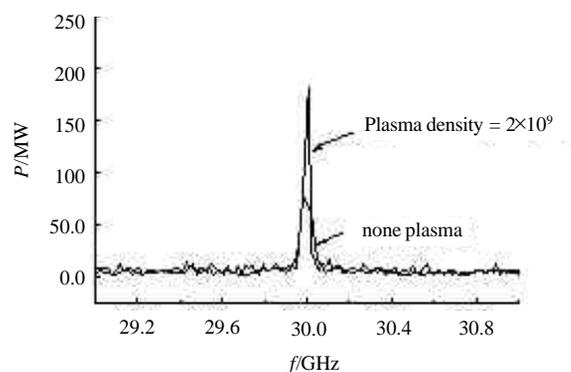


图8 微波功率的傅里叶变换谱

图7所示显示了不同等离子体密度对饱和功率的影响。引入等离子体之后,观察到一些影响:1) 虽然没有观察到饱和功率的明显增长,但是在达到饱和之前,功率的增长速度明显比真空情况要快,说明等离子体引入后,在一定程度上改善了注波互作用的特性;2) 使输出信号的频率发生了一定的上移,如当等离子体密度为 2×10^9 时,输出信号的频移为15 MHz,如图8所示,这是由于等离子体填充后使工作点发生漂移引起的^[6];3) 在较高的等离子体密度下,饱和功率点的功率快速下降;等离子体密度很高时,不仅影响输入信号的传输,同时也影响电子注的传输质量,从而导致了相互作用效率的降低。

3 结束语

对同轴混和铁磁摇摆器自由电子激光放大器PIC模拟结果表明,该器件在低电压(205kV)下仍获得了较高的输出功率,达到5.6 MW和较高的效率,采用渐变参数的摇摆器可以进一步提高器件的饱和功率和效率,这对优化器件设计是有实际意义的;等离子体填充后,在一定程度上改善了注波互作用的特性;等离子体密度增加,使放大器的频率发生了上移;等离子体密度过高将降低相互作用效率。

参 考 文 献

- [1] 惠钟锡, 杨震华. 自由电子激光[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995
- [2] Jackson R H, Freund H P, Pershing D E. Coaxial hybrid wiggler[P] United States Patent 5: 499 -255
- [3] Freund H P, Jackson R H, Pershing D E, *et al.* Nonlinear theory of the free-electron laser based upon a coaxial hybrid wiggler[J]. IEEE.Phys.plasmas 1994, 1 (4): 1 046-1 059
- [4] Freund H P, Antonsen T M. Principles of free-electron lasers[M]. London: Chapman & Hall, 1992
- [5] 史宗君, 杨梓强, 梁 正. 同轴波导FEL放大器的非线性分析[J]. 电子科技大学学报, 2003, 31(3): 245-249
- [6] Pei W B, Chen Y S. The effect of background plasma in the undulator on free electron laser[J]. INT J Electronics 1988, 65(3): 551-564

编辑 孙晓丹