

磁场预增强的锥型波荡器*

黄 羽 王明常 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 研究了波荡器磁场增强对提高自由电子激光器(FEL)效率的影响。模拟计算发现采用磁场增强波荡器能使自由电子激光器的效率提高到 17.6%。采用磁场预先增强而后又减弱的锥型波荡器则能获得高达 43.3% 的输出效率, 自由电子激光器的功率得到进一步的提高。

关键词 自由电子激光器, 磁场预增强的锥形波荡器。

自由电子激光器具有高功率、高效率和波长可调谐等特点。强流低能电子束产生的高功率毫米波自由电子激光可用于通信、雷达和目标测量等领域。近年来美国利弗莫尔实验室采用功率为 GW 级、脉宽为 20 ns 的毫米波自由电子激光来加热托卡马克中的等离子体^[1]。

为了提高自由电子激光器的输出功率, 必须提高它的电子转换效率。早在 1983 年, 作者曾研究过用锥型波荡器提高自由电子激光器放大器的效率^[2]。1985 年, 利弗莫尔用锥型波荡器获得波长为 8 mm、功率为 1 GW、效率高达 34% 的辐射输出^[3], 这是目前为止自由电子激光器的最高效率。自由电子激光器的共振关系式为

$$\lambda_s = \lambda_w (1 + a_w^2) / 2\gamma^2, \quad (1)$$

λ_s 为激光波长, λ_w 为波荡器周期, $a_w = eB_w / K_w mc$, B_w 、 k_w 为波荡器的磁场和波数, γ 为电子能量。当自由电子激光器接近饱和时 γ 降低, (1) 式不再满足。这时若降低磁场, 可以使共振关系仍然成立, 电子能继续释放能量, 提高效率。采用锥型波荡器只是提高自由电子激光器效率的一种办法。为了进一步提高自由电子激光器的效率, 作者研究了各种磁场变化的波荡器, 发现在自由电子激光器接近饱和时, 增强波荡器的磁场也能获得比均匀波荡器更高的效率。模拟还发现, 若自由电子激光器在磁场增强波荡器中又接近饱和时, 再降低波荡器磁场, 使有质动力势捕获的电子继续处于释放能量的状态, 则能获得高达 43.3% 的输出效率。

为了研究各种波荡器磁场对自由电子激光器能量的影响, 利用 KMR 方程, 考虑空间电荷效应, 对采用线极化波荡器的强流型自由电子激光器进行数值模拟。为了简化物理模型, 忽略电子的发射度, 假定电子都沿波荡器轴心入射, 并且不考虑电子的 Betatron 运动。普通加速器的电子束都有一定的发射度, 但是随着加速器技术的发展, 光阴极产生的电子束^[4]和虚火花放电电子束^[5]已具有很好的方向性, 接近零发射度。

* 国家自然科学基金资助项目。批准号 69337010

收稿日期: 1996 年 10 月 29 日; 收到修改稿日期: 1996 年 12 月 19 日

1 对均匀波荡器的模拟

根据 KMR 理论, 电子的能量 γ 和相位 Ψ 由以下方程组描述^[6]

$$d\gamma/dz = - (k_s a_s a_w / \gamma) \sin \Psi - a_z, \quad d\Psi/dz = k_w - k_s F + d\varphi/dz \quad (2)$$

其中 $a_s = eE_s/k_s mc^2$, E_s 和 k_s 分别是光场振幅和波数。 $a_w = eB_w/k_w mc$, $a_z = 4\kappa k_s \{ \langle \sin \Psi \rangle \cos \Psi - \sin \Psi \langle \cos \Psi \rangle \} / (k_s + k_w)$ 代表空间电荷力, $\kappa = \omega_p^2 / 2k_s c^2$, ω_p 为等离子体频率, $\langle \cdot \rangle$ 代表对所有电子求平均。 $F = (1 + a_w^2 + a_s^2 - 2a_s a_w \cos \Psi) / 2\gamma^2$ 。 φ 为光场的相位。 光场的方程为

$$da_s/dz = a_w \kappa \langle \sin \Psi \rangle / \gamma, \quad d\varphi/dz = (a_w / a_s) \kappa \langle \cos \Psi \rangle / \gamma - \kappa \langle 1/\gamma \rangle. \quad (3)$$

采用如下一组参数对均匀波荡器进行模拟, 电子束能量 $\gamma = 7.8$, 能散 $\Delta\gamma = 0.2$, 电子束能量均匀分布在 $\gamma \pm \Delta\gamma/2$ 之间, 相位均匀分布在 $-\pi \sim \pi$ 的区间, 电子束流 $I = 850$ A。采用线极化波荡器, 周期为 98 mm, 磁场强度为 0.372 T。入射微波源波长为 8 mm, 功率为 5 kW。

图 1 是模拟计算的输出效率与 z 轴距离(沿 Wiggler 的长度)的关系, 在 $z = 1.34$ m 处自由电子激光器出现饱和, 最大效率为 12.9%。图 2 对应不同距离的电子能量相位图。

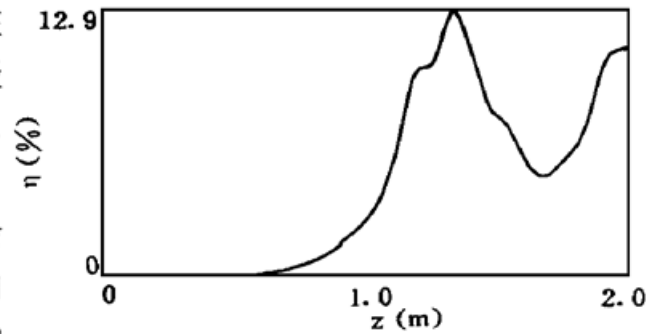


Fig. 1 FEL efficiency as a functions of wiggler length in a uniform wiggler

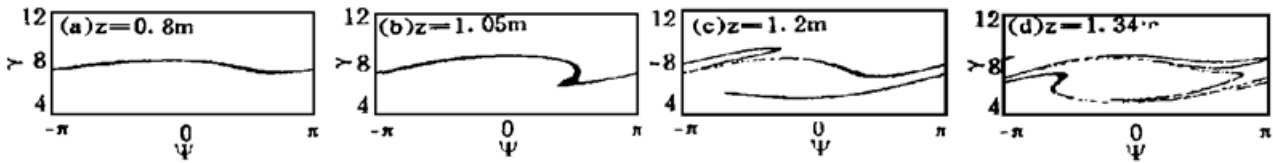


Fig. 2 Electron phase space at $z = 0.8$ m, $z = 1.05$ m, $z = 1.2$ m, and $z = 1.34$ m in a uniform wiggler

2 磁场增强波荡器

强流型自由电子激光器的束能散度较大[如图 2(a)], 在沿波荡器传输过程中, 由于与有质动力势的相互作用和空间电荷力等原因, 电子能量分布范围变得更大[如图 2(b)、(c)]。当激光器能量接近饱和时, 只有一部分电子能量被抽取变成低能电子, 另一部分的能量和初始入射能量 γ_0 持平, 其余少部分比 γ_0 还高一点[如图 2(d)]。锥型波荡器的实质是追踪已经被抽出能量的电子, 使它们继续把能量传给光场。由于这些电子的能量较低[如图 2(d) 的下半部], 能提供光场的能量不多。如果在激光器接近饱和处, 逐渐提高波荡器磁场, 由共振关系式知道, 这样一方面可使能量大于 γ_0 的电子也加入释放能量的行列, 另一方面能使已经释放能量的低能电子与有质动力失谐, 从而不再吸收光场能量, 也有利于提高激光器的能量。

利用(2)、(3)式, 采用磁场增强型波荡器对自由电子激光器进行模拟计算。波荡器磁场在初始的部分是均匀的, 参数和上一节完全相同, 当自由电子激光器快要接近饱和时, 磁场逐渐增大。波荡器磁场的变化在方程组中体现在 a_w 和 B_w 有变化。通过计算发现, 选择合适的波荡器能使自由电子激光器输出能量增大。所选择的波荡器的磁场与 z 轴距离的关系曲线如图 3(a) 所示, 波荡器的周期为 0.98 m 并保持不变。计算出的自由电子激光器输出效率与 z 轴距离的关系见图 3(b)。对应的饱和距离是 1.48 m, 最大输出效率为 17.6%, 与均匀波荡器相比有较大的提高, 且饱和点之后的效率降低不大(均匀波荡器在饱和点之后的效率减小

一半), 因此磁场增强波荡器确能减轻饱和, 提高自由电子激光器输出功率。

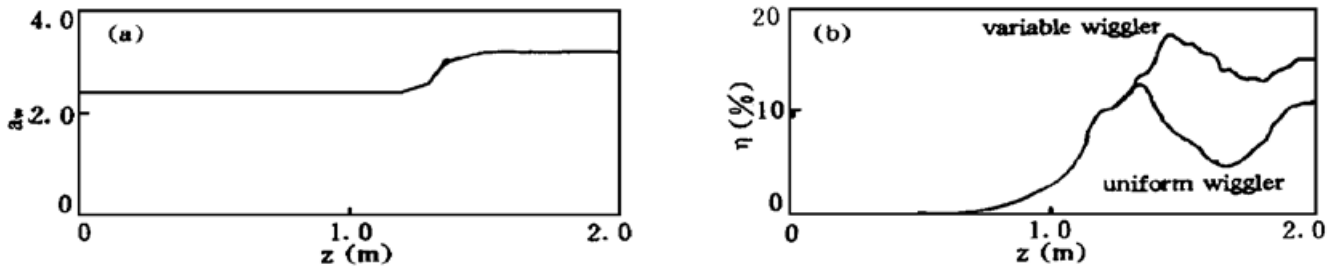


Fig. 3 (a) Wiggler field as a function of wiggler length in a magnetic field increasing wiggler; (b) FEL efficiencies as functions of wiggler length in a magnetic field increasing wiggler and a uniform wiggler

图 4 是磁场增强型波荡器的自由电子激光器在 $z = 1.288$ m、 1.344 m (均匀波荡器的饱和位置)、 1.40 m 及 1.48 m 处的电子能量相位图。正如前面的分析, 在图 4(a)、(b) 左下方的电子不再吸收光场能量, 能量仍然较低。图 4(c) 表明磁场增强后, 失去能量的电子能迅速越过 $-\pi \sim 0$ 区间, 进入 $0 \sim \pi$ 区间。据知在 $-\pi \sim 0$ 区间电子吸收光场能量, 而在 $0 \sim \pi$ 区间电子释放能量给光场。图 4(d) 是在 $z = 1.48$ m 处的电子能量相位图, 此时磁场增强型波荡器自由电子激光器出现饱和, 绝大多数电子都已集中在图的下部。

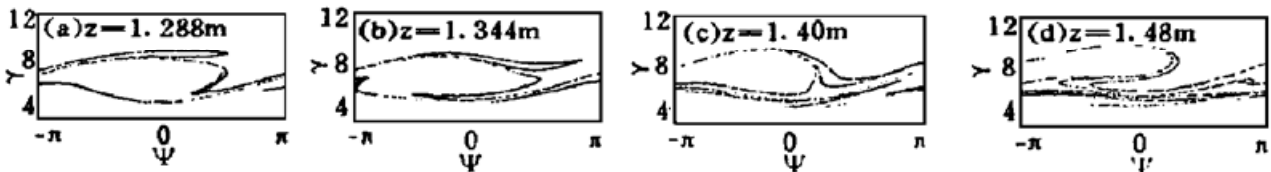


Fig. 4 Electron phase space at $z = 1.288$ m, $z = 1.344$ m, $z = 1.40$ m, and $z = 1.48$ m in a magnetic field increasing wiggler

3 磁场预增强的锥型波荡器

在锥型波荡器中, 通过降低波荡器磁场强度可以使被有质动力势捕获的电子团继续处于释放能量的状态。问题在于如何改变磁场强度来使更多的电子被有质动力势捕获并继续释放能量。在均匀波荡器的饱和位置, 即图 2(d) 中, 半数电子的能量已大大降低, 其它电子的能量则接近初始入射能量 γ_0 。电子的能量不集中, 若再采用锥型磁场来提高效率, 不利于电子的捕获。而在磁场增强波荡器的饱和位置, 即图 4(d) 中, 绝大多数的电子都已被抽取能量并且电子的能量比较集中, 如果从这点开始让磁场降低, 即整个波荡器的磁场先增强, 然后又减弱, 一方面能使电子继续被有质动力势捕获, 从而继续释放能量, 另一方面由于已经有相当可观的电子能量转变成光场能量, 有利于最终获得较高的输出效率。

下面即采用磁场预先增强, 然后又减弱的波荡器来进行模拟。采用的方程组同前。波荡器初始部分的磁场仍是均匀的, 在 1.2 m 后开始增强, 到 1.4 m 以后又开始减弱[如图 5(a)]。这个磁场和作用距离的变化曲线是经过反复计算→修改→计算获得的, 采用它自由电子激光器能得到最大的效率为 43.3%。祝家清通过研究提出自由电子激光的最大能量转换效率是 50%^[7], 此结果已经接近这个极限了。图 5(b) 是它的输出效率和 z 轴距离的关系曲线。饱和点的位置约 3 m, 比均匀波荡器和磁场增强型波荡器要长得多。这从一个侧面说明磁场增强型波荡器和磁场预增强的锥型波荡器提高效率的机制是不同的。

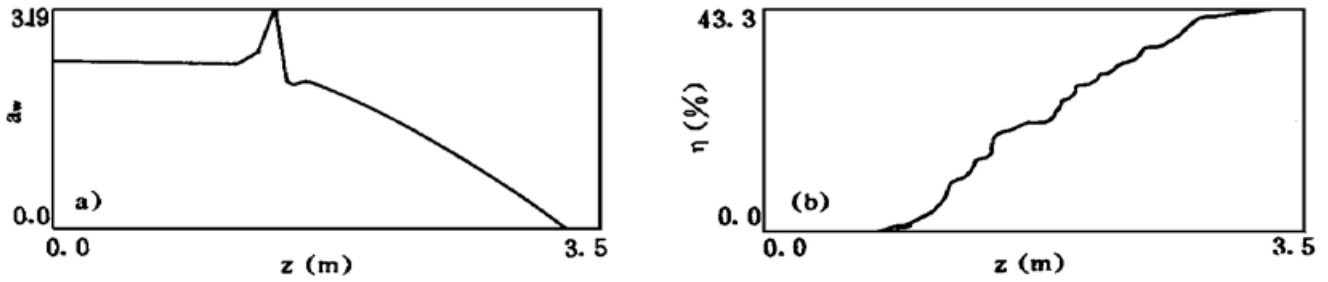


Fig. 5 (a) Wiggler field as a function of wiggler length in a tapered wiggler with pre-increased magnetic field; (b) FEL efficiency as functions of wiggler length in a tapered wiggler with pre-increased magnetic field

结 论 对磁场沿着轴向逐渐增强的波荡器进行了模拟计算, 使用该波荡器使自由电子激光器效率得到了提高。原因是提高波荡器磁场一方面能使能量大于 γ_0 的电子也加入释放能量的行列, 另一方面还能使已经释放能量的低能电子与有质动力失谐, 不再吸收光场能量。数值模拟还发现采用磁场预先增强而后再减弱的锥型波荡器能获得高达 43.3% 的输出效率。波荡器磁场的预增强部分不但能获得比均匀波荡器更高的自由电子激光器功率, 而且使电子俘获于有质动力势阱中, 在其后的锥型波荡器场中继续释放能量, 从而获得很高的输出效率。

参 考 文 献

- [1] S. L. Allen, Nonlinear absorption of high power free-electron-laser-generated microwaves at electron cyclotron resonance frequencies in the MTX tokamak. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **72**(9) : 1348~ 1351
- [2] 王明常, 周慧芬, 王之江, 非均匀 Wiggler 场自由电子激光器的模拟计算. *光学学报*, 1983, **3**(9) : 779 ~ 784
- [3] T. J. Orzechowski, B. R. Anderson, J. C. Clark *et al.*, High-efficiency extraction of microwave radiation from a tapered-wiggler free-electron laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**(17) : 2172~ 2175
- [4] P. G. O'Shea, S. C. Bender, Performance of the APEX free-electron laser at Los Alamos national laboratory. *Nucl. Instr. and Meth. (A)*, 1993, **331**(1) : 62~ 68
- [5] 王明常, 朱俊彪, 王之江等, 虚火花电子束源研制成功. *光学学报*, 1995, **15**(2) : 255
- [6] T. H. Chung, H. S. Kim, J. K. Lee, Simulation of tapered FEL amplifiers in millimeter and infrared regions. *Nucl. Instr. and Meth. (A)*, 1993, **331**(3) : 482~ 486
- [7] 祝家清, 自由电子激光的能量转换. *物理学报*, 1996, **45**(1) : 52~ 57

A Tapered Wiggler with Pre-Increased Magnetic Field

Huang Yu Wang Mingchang Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 29 October 1996; revised 19 December 1996)

Abstract The efficiency improvement of free electron laser (FEL) by increasing wiggler magnetic field is investigated. Numerical simulation shows that increasing wiggler field can increase FEL efficiency from 12.9% of uniform wiggler to 17.6%. It is interesting that if the wiggler field is tapered after being increased, a FEL efficiency as high as 43.3% can be obtained.

Key words free electron laser, tapered wiggler with pre-increased magnetic field.