

磁场逐渐增强的摇摆器^{*}

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)

J. K. Lee

(Department of Physics, Pohang Institute of Science and Technology, Pohang 790-600)

(1996 年 2 月 27 日收到; 1996 年 5 月 10 日收到修改稿)

研究了用磁场增强摇摆器来提高自由电子激光器效率的机制. 采用 KMR 方程, 考虑空间电荷效应, 模拟计算发现自由电子激光器的效率有了很大的提高, 而且电子束能散度越大, 对提高自由电子激光器效率越有帮助. 因此采用磁场增强摇摆器能充分利用加速器的能量来获得更高的自由电子激光器能量.

PACC: 4255T

1 引 言

自由电子激光器(FEL)具有高功率、高效率及波长可调谐等特点, 在科学研究、医学和军事上都有很好的应用前景. 为了提高输出功率和获得短波长, 必须提高 FEL 的电子转换效率. 早在 1983 年, 我们曾研究过用磁场逐渐变弱的摇摆器提高 FEL 放大器的效率^[1]. 1985 年, LLNL 采用磁场变弱摇摆器, 获得波长为 8mm、功率为 1GW、效率高达 34% 的辐射输出^[2]. 以上的变参数摇摆器都是所谓的锥型摇摆器, 其尾部的磁场是逐渐减弱的. FEL 的共振关系式为 $\lambda_s = \lambda_w(1 + a_w^2)/2\gamma^2$, λ_s 是激光波长, λ_w 是摇摆器周期, $a_w = eB_w/(k_w mc)$, B_w , k_w 是摇摆器的磁场和波数. 当 FEL 接近饱和时电子能量 γ 降低, 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. 采用锥型摇摆器只是提高 FEL 效率的一种办法, 下面将会看到, 在 FEL 接近饱和时, 增强摇摆器的磁场也能提高效率. 我们知道, 一部分电子在有质动力的作用下产生群聚, 把能量传递给光场而使光场得到放大, 自己变成低能电子; 低能电子还会从光场中吸收能量, 而其他的电子在有质动力的作用下继续释放能量, 当这两者达到平衡时, FEL 的能量不再增加, 产生饱和. 对强流型 FEL, 电子的能散度较大, 在沿摇摆器传输过程中, 由于与光场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. 当 FEL 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. 锥型摇摆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. 我们看到, 这些电子的能量较低, 能提供光场的能量不多. 如果在 FEL 接近

^{*} 国家自然科学基金资助的课题.

饱和处, 逐渐提高摇摆器磁场, 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 FEL 的能量. 为了研究磁场增强摇摆器对 FEL 能量的影响, 我们采用 KMR 方程, 考虑空间电荷效应, 对采用线极化摇摆器的相对论强流型 FEL 进行数值模拟. 为了简化物理模型, 我们忽略了电子的发射度, 假定电子都沿摇摆器轴心入射, 并且不考虑电子的 Betatron 运动.

2 对均匀摇摆器的分析

根据 KMR 理论, 电子的能量 γ 和相位 Ψ 由以下方程组描述^[3],

$$\frac{d\gamma}{dz} = -\frac{k_s a_s a_w}{\gamma} \sin \Psi - a_z, \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi}{dz} = k_w - k_s F + \frac{d\varphi}{dz}, \quad (2)$$

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; $a_w = eB_w/(k_w mc)$, B_w 和 k_w 是摇摆器磁场和波数; $a_z = 4\kappa k_s \{ \langle \sin \Psi \rangle \cos \Psi - \sin \Psi \langle \cos \Psi \rangle \} / (k_s + k_w)$ 代表空间电荷力, $\kappa = \omega_p^2/(2k_s c^2)$, ω_p 是等离子体频率, $\langle \cdots \rangle$ 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 是光场的相位.

光场的方程为

$$\frac{da_s}{dz} = a_w \kappa \left\langle \frac{\sin \Psi}{\gamma} \right\rangle, \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{a_w}{a_s} \kappa \left\langle \frac{\cos \Psi}{\gamma} \right\rangle - \kappa \left\langle \frac{1}{\gamma} \right\rangle. \quad (4)$$

我们采用如下一组参数进行模拟, 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 $-\pi \sim \pi$, 电子束流 $I = 850\text{A}$, 采用线极化摇摆器, 周期为 98mm , 磁场强度为 0.372T , 入射微波源波长为 8mm , 功率为 5kW .

图 1 是模拟计算出的输出效率与 z 轴距离的关系, 在 $z = 1.34\text{m}$ 处 FEL 出现了饱和, 最大效率为 12.9% . 图 2 对应不同距离的电子能量相位图.

为了分析电子的运动, 我们来考察方程(1), (2). 方程(1)的等号右边第二项 a_z 是小量, 而且当激光能量较小时电子的相位是均匀分布在 $-\pi \sim \pi$ 的 $\langle a_z \rangle = 0$, 因此这一项可以忽略, 有

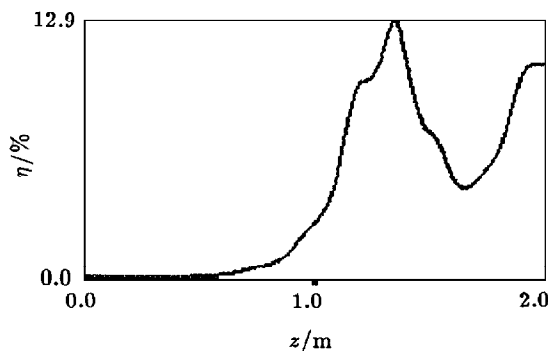


图 1 均匀摇摆器 FEL 的效率和摇摆器距离的关系

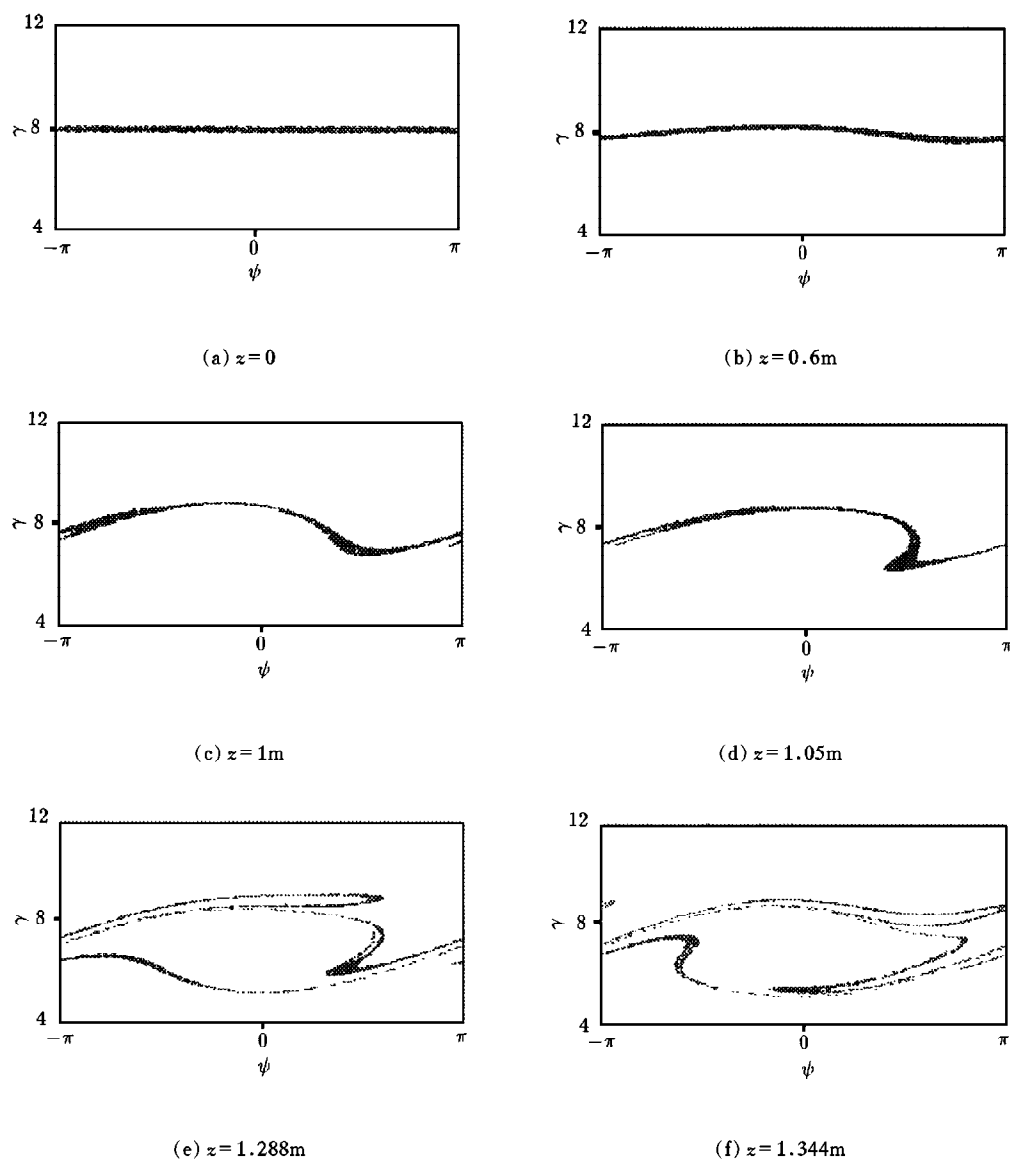


图2 FEL在 $z=0, 0.6, 1, 1.05, 1.288, 1.344\text{m}$ 处的电子能量相位图

$$\frac{d\gamma}{dz} = -\frac{k_s a_s a_w}{\gamma} \sin \Psi. \quad (5)$$

因此对于第 i 个电子来说, 当它的相位 Ψ 处于 $0-\pi$ 之间时, $d\gamma_i/dz < 0$, 此电子失去能量, 光场获得能量; 当它的相位 Ψ 处于 $-\pi-0$ 之间时, $d\gamma_i/dz > 0$, 电子获得能量, 光场失去能量。

再来看方程(2), $d\varphi/dz$ 是小量, 所以

$$\frac{d\Psi}{dz} \sim k_w - k_s \frac{1 + a_w^2 + a_s^2 - 2a_s a_w \cos \Psi}{2\gamma^2} \quad (6)$$

当激光能量较小时, $a_s \sim 0$, $a_w \sim 2.4$, $\gamma = 7.8$, 所以 $F \sim 1/18$. 由于 $k_s \sim 12k_w$, 因此 $\Psi' > 0$, 随着 z 的增大 Ψ 也不断增大(大于 π 时进入 $-\pi$ 到 0 的区间), 如图 2(a), (b).

在 $\pi/2 < \Psi < \pi$ 和 $-\pi < \Psi < -\pi/2$ 的区间, $\cos \Psi < 0$, F 的值较大, 而由前面的讨论知道, 在 $0 < \Psi < \pi$ 时 γ 是不断减少的, 因此 F 的值也减小, 由(6)式, 在 $\pi/2 < \Psi < \pi$ 处的 Ψ' 值最小. 随着沿 z 轴的不断运动, a_s 不断增大, $\pi/2 < \Psi < \pi$ 区间电子的 γ 值不断减小, Ψ' 也不断减小, 直到为零. 此时这个区间的电子相位随 z 的增加保持不变, 而 $\Psi < \pi/2$ 的电子的 $\Psi' > 0$, 相位会随着 z 的增加, 进入 $\pi/2 < \Psi < \pi$ 的区间. 因此 $\pi/2 < \Psi < \pi$ 这个区间的电子越来越多(如图 2(c), (d)), 而且不断失去能量, 使激光能量增加. 随着电子的 γ 减小, Ψ' 会减小到成为负数, 它们的相位 Ψ 开始减小, 进入 $-\pi < \Psi < 0$ 的区间, 在这里 $\gamma' > 0$, 电子吸收光场能量 γ 增大, 导致 Ψ' 也增大, 直到 $\Psi' = 0$. 所以这个区间的电子也越聚越多, 又不断吸收光场能量, 导致 FEL 出现饱和(如图 2(e), (f)).

由以上分析可看出, 出现饱和的原因之一是失去能量的电子相位停留在 $-\pi < \Psi < 0$ 的区间, 大量吸收光场能量. 如果在 FEL 接近饱和前, 也就是一部分电子刚失去能量进入 $-\pi < \Psi < 0$ 区间时, 增大摇摆器的磁场, 由(2)式可知, Ψ' 会减小, 适当地增大磁场, 可以使失去能量 $\Psi' < 0$ 的电子在 $-\pi-0$ 区间的 Ψ' 值不会增大到 0 . 因此这部分电子能迅速越过 $-\pi-0$ 区间, 进入 $0-\pi$ 区间, 能继续释放能量.

另外, 由共振关系 $\lambda_s = \lambda_w(1 + a_w^2)/2\gamma^2$ 可以看到, 增大摇摆器磁场可以使还没有失去能量、且 $\gamma > \gamma_0$ 的电子(如图 2(d)–(f))也加入到失去能量的行列. 由(2)式可知 γ 越大, Ψ' 越大, γ 大的电子 Ψ' 很难降到 0 . 若增大摇摆器磁场, 可以减小 Ψ' , 当 $\Psi' = 0$ 时, $\gamma > \gamma_0$ 的电子就能把能量传递给光场, 使更多的电子为光场提供能量.

由此可以看出, 在 FEL 接近饱和的位置增大摇摆器的磁场能降低饱和程度, 提高 FEL 能量.

3 磁场增强摇摆器的结果及分析

通过以上讨论, 我们采用磁场增强型摇摆器对 FEL 进行模拟计算, 摇摆器磁场在初始的部分是均匀的, 所有参数和上一节完全相同. 当 FEL 快要接近饱和时, 磁场逐渐增大. 计算发现, 选择合适的摇摆器能使 FEL 输出能量增大. 选择的摇摆器磁场与距离的关系曲线如图 3(a), 摇摆器的周期保持在 0.98m 不变. 计算出的 FEL 输出效率与 z 轴距离的关系见图 3(b). 对应的饱和距离是 1.47m , 最大的输出效率为 17.6% , 与均匀摇摆器相比有较大的提高, 而且饱和点之后的效率降低不大(均匀摇摆器在饱和点之后的效率减小一半), 因此磁场增强摇摆器确实能减轻饱和, 提高 FEL 输出功率.

图 4(a)是磁场增强型摇摆器的 FEL 在 $z = 1.344\text{m}$ 处(即均匀摇摆器的饱和位置)的电子能量相位图. 正如上一节的分析, 磁场增强后, 失去能量的电子能迅速越过 $-\pi-0$ 区间, 进入 $0-\pi$ 区间, 如图 4(a)左下方的电子能量仍然较低; 而在均匀摇摆器的 $z = 1.344\text{m}$ 处左下方的电子已经吸收能量, γ 值变大, 使 FEL 产生饱和(如图 2(f)).

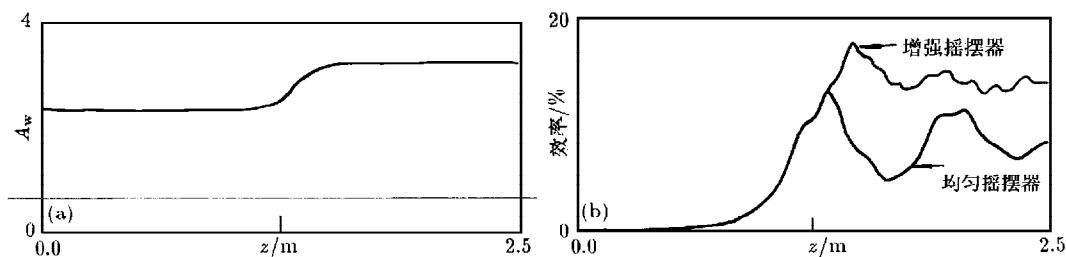


图3 (a)磁场增强摇摆器的磁场和距离的关系;(b)采用磁场增强摇摆器及均匀摇摆器的 FEL 效率和摇摆器距离的关系

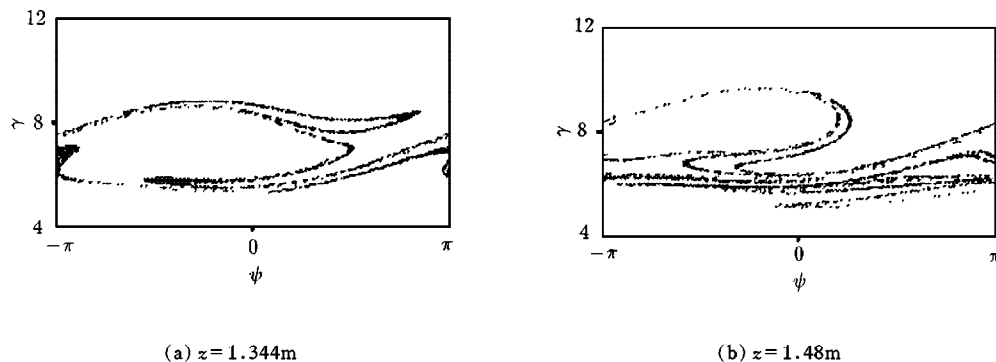


图4 磁场增强摇摆器 FEL 在 $z = 1.344$ 及 1.48 m 处的电子能量相位图

在 $z = 1.48$ m 处, 磁场增强型摇摆器 FEL 出现饱和, 图 4(b) 是此时的电子能量相位图. 在 $\gamma = 7.8$ 附近的电子几乎没有了, 绝大部分电子都集中在图的下部. 而在 $-\pi < \psi < 0$ 处的电子随着距离的增加, 能量还是逐渐增大, 最后在 $z = 1.48$ m 处产生饱和.

图 5 是对于不同电子束能散度, 采用两种摇摆器的 FEL 输出效率的变化. 均匀摇摆器受能散度的影响很大, 随能散度的增大效率很快减小, 所以对束的要求很高, 对强流加速器要滤掉能散度和发射度大的“劣质”电子束, 留下能散度和发射度较小的高质量电子束来做 FEL 实验, 文献[2]的实验中只让占束流 1/5 的优质电子束进入摇摆

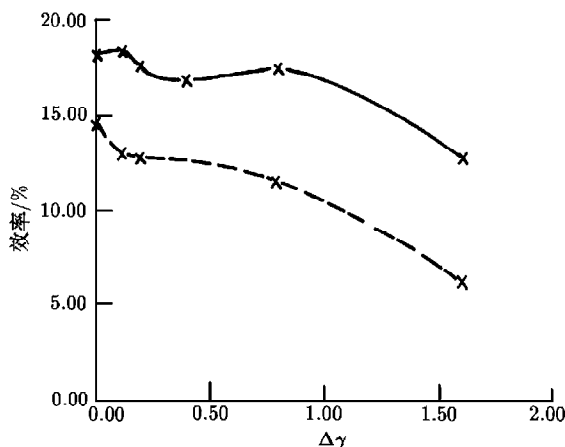


图5 FEL 效率和电子束能散度的关系 实线对应磁场增强摇摆器, 虚线对应均匀摇摆器

器. 而对磁场增强摇摆器, 能散度很大时, 仍有高效率, 在 $\Delta\gamma/\gamma \approx 20\%$ 时, $\eta = 12.9\%$, 而均匀摇摆器为 6.24% , 提高一倍以上. 因此用磁场增强摇摆器, 所有电子束都可以用于 FEL, 能大大提高 FEL 的功率. _

4 结 论

本文探讨了用磁场沿着轴向逐渐增强的新型变参数摇摆器来提高 FEL 效率的可能性, 发现它与用传统的锥型摇摆器提高效率的机制有所不同. 模拟计算发现, 磁场增强摇摆器最大能把 FEL 效率提高到均匀摇摆器的两倍以上, 而且电子束能散度增大对 FEL 效率影响并不大. _

中国科学院上海光学精密机械研究所的蒋友山、丁彦华为编程提供了帮助, 深表谢意. _

- [1] 王明常、周慧芬、王之江, 光学学报, **3**(1983), 779.
- [2] T. J. Orzechowski, B. R. Anderson, J. C. Clark *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 2172.
- [3] T. H. Chung, H. S. Kim and J. K. Lee, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A331**(1993), 482.

MAGNETIC FIELD GRADUALLY INCREASING WIGGLER

HUANG YU WANG MING-CHANG WANG ZHI-JIANG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

J. K. LEE

(Department of Physics, Pohang Institute of Science and Technology, Pohang 790-600)

(Received 27 February 1996; revised manuscript received 10 May 1996)

ABSTRACT

FEL efficiency improvement with magnetic field increasing wiggler has been investigated. Numerical simulation with KMR equations considering space charge effect we find that FEL power increase greatly. It is interested that the larger the energy spread is, the greater the FEL power increasement is. Therefore the whole electron beam of the accelerator can be used for FEL and higher power can be gotten with magnetic field increasing wiggler.

PACC: 4255T