

用反向渐变波导提高远红外 自由电子激光器效率

胡素兴 傅恩生 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(1995 年 6 月 15 日收到)

在高效率和低电流小信号范围内, 理论地分析了用反向渐变波导提高远红外波导自由电子激光器(FIR-FEL)效率的机理. 并用单粒子模型进行了一维数值模拟, 得到了令人鼓舞的结果.

PACC: 4255T; 2925E

1 引 言

自由电子激光器(FEL)由于其优越的可调谐及高功率特性, 在填补普通激光器波段空白方面极具潜力. 因而, 自 FEL 出现以来, 研究者就在努力把它向短波长(如紫外、X 射线等)和远红外波段拓展. 但人们越来越发现短波长 FEL 所需要的高能和高质量电子束在目前的实验条件下是难以达到的^[1]. 另外, 在可见光和微波波段已有了大量的激光器和微波辐射源^[2]. 因而, 红外和远红外 FEL 就格外受到人们的关注^[3,4]. 尤其远红外自由电子激光器(FIR-FEL)正逐渐成为 FEL 研究的一个极为活跃的领域^[5,6]. 因为它仅需要几兆电子伏的能量, 而且它对束质量的要求并不是很严格. 另外, 它是目前这一波段唯一能提供可大范围调谐的超短脉冲辐射源. 因而它是研究各种超快动力学现象不可缺少的工具^[7]. 高效率是任何激光器系统所追求的目标, 自由电子激光器也不例外. 许多提高 FEL 效率的方法已经被提出, 诸如渐变 wiggler^[8-10]、使用短脉冲电子束^[11]、chirping 电子束等^[12].

本文从理论上分析反向渐变波导提高 FIR-FEL 效率的机理. 并用一维单粒子模型进行数值模拟. 结果证实了在一定条件下反向渐变波导可有效地提高远红外自由电子激光器的效率.

2 理论分析

在远红外波段, 波导通常被用来减少束波之间的严重滑移. 从射频直线加速器(FR-Linac)出来的短脉冲电子束要跟波长较长的远红外波同步, 波导是必不可少的. 然而波导的引入并不改变束波的相互作用机制^[13].

由于 TE_{01} 模的低损耗及横场特性, 我们合理地假设在矩形波导中 TE_{01} 模优先被激发. 本文所讨论的反向渐变波导的间隙沿 z 轴逐渐变窄, 其间隙可近似为

$$b = b_0(1 - 2\alpha z), \quad (1)$$

其中 b_0 是在 wiggler 入口处正好使束波同步的均匀波导的间隙. α 是波导渐变的角度. 渐变波导被插入平面型 wiggler 的间隙中, 如图 1 所示.

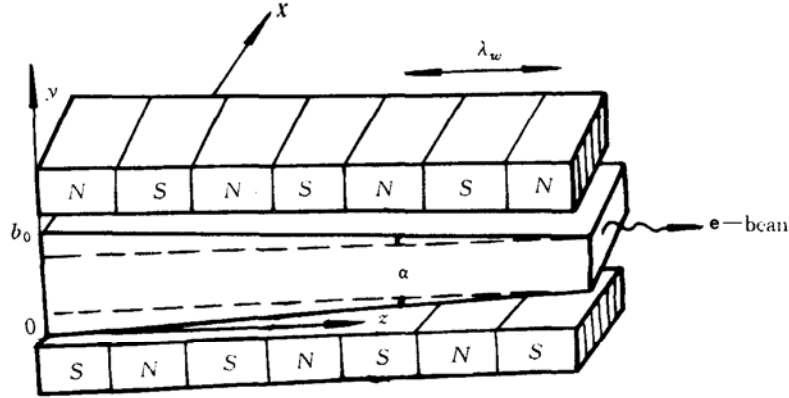


图 1 反向渐变波导的远红外自由电子激光器, 波导间隙沿 z 轴逐渐减少

值得注意的是反向渐变的波导将反射部分辐射波. 但由于这里波导的渐变角非常小, 因而反射系数可以忽略. 束波的谐振频率仍保持不变^[14]. 在代数推导中作一些合理的近似后, 得到了渐变波导中 TE_{01} 模的色散关系

$$k'_{//}{}^2 = \omega^2/c^2 - \pi^2/b_0^2 - 4\alpha\pi^2 z/b_0^2, \quad (2)$$

$k'_{//}$ 是渐变波导中 TE_{01} 模的径向波数. 将方程(2)与均匀波导中 TE_{01} 模的色散关系 $k_{//}^2 = \omega^2/c^2 - \pi^2/b_0^2$ 相比, 可以清楚地看到渐变对波数的影响为 $k'_{//} = k_{//} - 2\alpha\pi^2 z/b_0^2 k_{//}$. 这意味着波群速 $k'_{//}c^2/\omega$ 将比均匀波导的情况略为降低. 这样波导的反向渐变对电子相位的影响可写为

$$\Psi' = \Psi - \Delta\Psi, \quad (3)$$

其中 $\Psi = (k_{//} + k_w)z - \omega t$ 是均匀波导中的电子相位, 电子相位附加项 $\Delta\Psi = 2\alpha\pi^2 z^2 (b_0^2 k_{//})^{-1}$ 即是波导的稍微倾斜所带来的影响, 它将沿 z 轴不断变化.

在低电流小信号 FEL 中, 辐射场相位可以通过解波方程得到. 而且我们假设渐变波导对场相位的影响可以忽略, 即

$$\Phi' = \Phi = j(2\sin v_0\tau - v_0\tau(1 + \cos v_0\tau))v_0^{-3} + \dots, \quad (4)$$

其中无维电流密度 $j = 8N(e\pi a_w (J_0(\xi) - J_1(\xi))L)^2 n_e (\gamma^3 mc^2)^{-1}$, $J_0(\xi)$, $J_1(\xi)$ 是线性 wiggler 磁场中的贝赛耳函数, 其参量 $\xi = a_w^2/2(1 + a_w^2)$. 无维磁场矢量 $a_w = eB_0\lambda_w/2\sqrt{2}\pi mc^2$, 电子的归一化起始相速度 $v_0 = [(k_{//} + k_w)\beta_z - \omega/c]L$, 无维时间变量 $\tau = z/L$, 这里 z 是电子在 wiggler 中的坐标位置.

根据 Colson 的方法, 可以写出渐变波导中单电子沿 z 轴的能量演化方程^[15]

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{\omega a_w a_s [J_0(\xi) - J_1(\xi)]}{\beta_z \gamma c} \cos(\Psi' + \Phi'), \quad (5)$$

其中 γ 是电子的相对论能量因子, β_z 是电子的径向相对论速度, a_s 是辐射场的归一化矢量. 分别将电子和辐射场的相位代入方程(5)中, 进一步得到渐变波导中电子能量沿 z 轴变化的解析表达式

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{\omega a_w a_s (J_0(\xi) - J_1(\xi))}{\beta_z \gamma c} [\cos(\Psi + \Phi) + \Delta\Psi \sin(\Psi + \Phi)]. \quad (6)$$

上式等号右端方括号内第二项即是波导反向渐变所带来的结果.

很明显 $\Delta\Psi$ 总是一个正数项. 在均匀波导中, 通过解小信号 FEL 中电子运动的摆方程, 可以得到电子的位相为

$$\Psi(z) = \Psi_0 + \frac{v_0 z}{L} - \frac{a_0}{v_0^2} \left[\cos(\Psi_0 + v_0 z/L) - \cos\Psi_0 + \frac{v_0 z}{L} \sin\Psi_0 \right] + \dots, \quad (7)$$

其中 Ψ_0 是电子在 wiggler 入口处的起始相位, 它可以由注入条件来决定. 在小信号 FEL 中, 起始辐射场是非常弱的, 即归一化场 $a_0 \ll 1$. 在 $v_0 = 2.6$ 时小信号 FEL 达到最大增益, 于是得到均匀波导中电子的相位可近似为 $\Psi(z) \approx \Psi_0 + 2.6z/L$.

在低电流情况下, $j \leq 1$. 因此从方程(4)可以看到在一次通过 wiggler 过程中辐射场的相位变化不大. 这样

$$\Psi + \Phi = \Psi_0 + 2.6z/L + j \left(\frac{2\sin 2.6z/L - 2.6zL^{-1}(1 + \cos 2.6z/L)}{2.6^3} \right) + \dots \quad (8)$$

由此可以看到, 当电子的位置坐标 z 从 0 变化到 L 的过程中, 只要选择合适的电子束的注入条件使电子在 wiggler 入口处的起始相位满足条件 $0 < \Psi + \Phi < \pi$, 也即方程(8)的值在 $0 - \pi$ 的范围内, 那么方程(6)等号右端方括号内第二项将是一正项, 即 $\Delta\Psi \sin(\Psi + \Phi) > 0$. 换言之, 这意味着在反向渐变波导中电子沿 z 轴丢失能量的速度将快于均匀波导的情况. 这样 FEL 的效率 $\eta(z) = [\gamma(0) - \gamma(z)]/\gamma(0)$ 将会得到显著提高.

3 数值模拟

尽管方程(6)已经给出了清楚的物理意义, 但为了证明理论分析的可靠性, 在实验之前进行适当的数值模拟是必要的. 选择如表 1 所示的 FIR-FEL 参数, 按下列方程组进行一维单粒子模型的数值模拟:

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{\omega a_w a_s (J_0(\xi) - J_1(\xi))}{\beta_z \gamma c} [\cos(\Psi + \Phi) + \Delta\Psi \sin(\Psi + \Phi)], \quad (9)$$

$$\frac{da_s}{dz} = \frac{a_w (1 + a_w^2) e^2 (J_0(\xi) - J_1(\xi)) L^2}{2N\gamma^3 mc^2} e^{-i(\Psi + \Delta\Psi + \Phi)}. \quad (10)$$

参考表 1 的 FIR-FEL 参数, 为确保方程(9)等号右端方括号内第二项一直为正值在模拟中选择电子的起始相位为 0.

表 1 模拟中的远红外自由电子激光器参数

物理量	取值
电子能量因子 γ	6.0
峰值电流 I/A	10
wiggler 峰值场强 B_0/T	0.6
周期 λ_w/cm	2.5
长度 L/m	0.5
辐射波长 $\lambda_s/\mu m$	650
均匀波导间隔 b_0/mm	6
波导渐变角 α/rad	2×10^{-3}

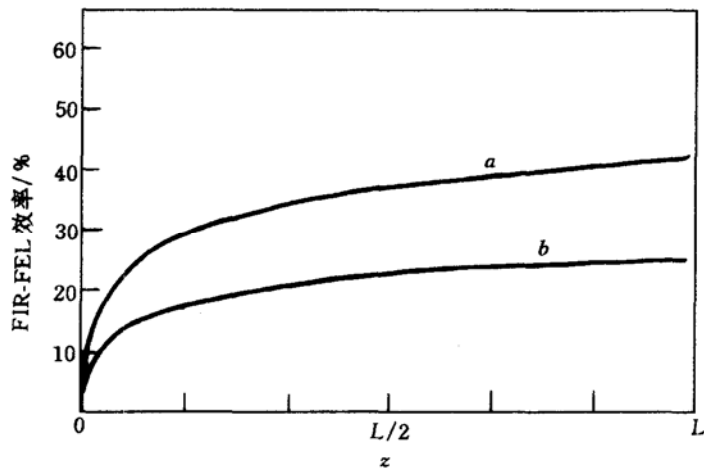


图 2 FIR-FEL 效率与平面 wiggler 长度的依赖关系 曲线 a 为渐变波导情况;
曲线 b 为均匀波导情况

模拟结果如图 2 所示,图 2 中曲线 a , b 分别是反向渐变波导和均匀波导情况下,在 wiggler 中不同位置处的 FEL 效率曲线.从图 2 中可以看出反向渐变波导将表 1 中 FIR-FEL 的最大效率从 23 % 提高到 41 %.这一效率接近成倍提高是令人鼓舞的.

4 结 语

至此我们已经在高效率和小信号的 FIR-FEL 中,理论地分析了沿 z 轴间隙逐渐变窄的反向渐变波导提高 FIR-FEL 效率的机理.并用一维单粒子模型进行了数值模拟,结果显示理论分析是可靠的,反向渐变波导将大幅度提高 FIR-FEL 效率.

反向渐变波导的作用在于逐渐地减小辐射波的径向群速度,使得不断丢掉能量而变慢的电子仍保持与辐射波同步(近谐振).这样有助于电子进一步把自己的能量传给辐射波,因而这机理是易于理解的.其实它与渐变波荡器没有本质上的差异,只是渐变 wiggler 相对麻烦一些,尤其对永磁波荡器更是如此,与之相反,渐变波导具有简易方便的优点,而且还可以进行实时调节.

对于既渐变 wiggler 又反向渐变波导的情况,我们将另文讨论.

感谢中国工程物理研究院刘庆想博士和束小建博士的有益讨论.同时感谢贵州新华激光照排印刷公司陈丽珊小姐打印原稿.

- [1] K.J. Kim, A. Sessler, *Science*, **250**(1990), 88.
- [2] D.D. Dlott, M.D. Fayer, *IEEE J.*, **QE-27**(1991), 2697.
- [3] HU Suxing and FU Ensheng, *Journal of Chinese Laser*, **B4**(1995), 396.
- [4] F. Ciocci, R. Bartolini, G. Dattoli *et al.*, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res.*, **A318**(1992), 165.
- [5] Y.C. Huang J. Schmerge, J. Harris *et al.*, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res.*, **A318**(1992), 765.
- [6] I. Boscolo, A. Dipace, E. Sabia, *IEEE J.*, **QE-31**(1995), 352.
- [7] HU Suxing and FU Ensheng, *Appl. Phys. Lett.*, **67**(1995), 3373.
- [8] N.M. Kroll, P.L. Morton, M.N. Rosenbluth, *IEEE J.*, **QE-17**(1981), 1436.
- [9] HU Suxing, FU Ensheng, *Acta Physica Sinica (Overseas Edition)*, **5**(1996), 31.
- [10] D.A. Jaroszynski, R. Prazeres, F. Glotin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995), 2224.
- [11] D.A. Jaroszynski, D. Oepts, J.M. Ortega *et al.*, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res.*, **A318**(1992), 582.
- [12] G.T. Moore, J.C. Goldstein, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res.*, **A318**(1992), 176.
- [13] A. Doria, G.P. Gallerano, A. Renieri. *Opt. Commun.*, **80**(1991), 417.
- [14] E. Borie and O. Dumbrajs, *Int. J. Electron.*, **60**(1986), 143.
- [15] W.B. Colson. in "Laser Handbook", edited by W.B. Colson, C. Pellegrini and A. Renieri (North Holland, Amsterdam, 1990), Vol. 6, chapter 5.

EFFICIENCY ENHANCEMENT OF FAR INFRARED FREE ELECTRON LASER BY USING A REVERSE TAPERING WAVEGUIDE

HU SU-XING FU EN-SHENG XU ZHI-ZHAN

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

(Received 15 June 1995)

ABSTRACT

In the high efficiency and small signal region, we investigate theoretically the efficiency enhancement mechanism of far infrared free electron laser (FIR-FEL) with a reverse tapering waveguide. The numerical simulation with single particle model suggests that this kind of waveguide whose gap is gradually narrow along z axis substantially heightens the FIR-FEL efficiency.

PACC: 4255T; 2925E