

波荡器入口区绝热压缩磁场分布对自由电子激光输出功率和效率的影响*

张世昌** 王文耀 徐 勇

(西南交通大学应用物理系, 成都 610031)

提 要

本文对波荡器(Wiggler)入口区绝热压缩磁场分布对自由电子激光输出功率、增益、效率的影响,进行了非线性计算机模拟.结果表明:磁场幅值沿轴向按立方函数分布,比通常采用的正弦平方函数和平方函数这两种分布更好,更接近实验值.

关键词 自由电子激光, 波荡器, 非线性.

如所周知,波荡器是自由电子激光器中的主要部件之一,它起到一种能量耦合器作用,把激光场与电子束耦合起来,使两者之间产生能量交换.所以波荡器入口区绝热压缩磁场幅值沿轴向的分布,显得尤为重要.这是因为从电子枪发射出来的电子束,在进入波荡器相互作用区之前,如果不进行适当绝热压缩,电子束就不能很好地与激光场换能,严重时,电子束质量会变得很坏,甚至不能正常输运.从数学物理角度说,直接依赖问题的初始状态,而电子束进入互作用的初始状态,就是由波荡器入口区绝热压缩磁场的分布决定的

目前,国外一些文献采用正弦平方函数分布形式,相应的三维波荡器场为^[1]:

$$\begin{aligned} B_w = 2B_w(z) [I_1(k_w r) \cos(\theta - k_w z) e_r \\ - \frac{I_1(k_w r)}{k_w r} \sin(\theta - k_w z) e_\theta + I_1(k_w r) \sin(\theta - k_w z) e_z], \end{aligned} \quad (1)$$

$$B_w(z) = \begin{cases} B_w f(k_w z), & 0 \leq z \leq N_w \lambda_w \\ B_w, & N_w \lambda_w < z \end{cases} \quad (2)$$

$$f(k_w z) = \sin^2(k_w z / 4N_w) \quad (3)$$

式中 $f(k_w z)$ 为入口区绝热压缩磁场幅值分布函数, B_w 、 k_w 、 λ_w 为波荡器的幅值、波数和波长, I_1 和 I_1' 为一阶第一类变型贝塞耳函数及其对宗量的导数, N_w 为绝热压缩的波荡器周期数目.

为了定量地比较绝热压缩磁场分布对自由电子激光性能的影响,除对正弦平方分布进行非线性模拟外,还对平方分布及立方分布

收稿日期:1992年8月12日

* 国家自然科学基金和西南交通大学科研基金资助课题.

** 中国高等科学技术中心(世界实验室)理论物理分中心.

$$f(k_w z) = (k_w z / 2\pi N_w)^2, \quad f(k_w z) = (k_w z / 2\pi N_w)^3 \quad (4)$$

进行了非线性模拟. 上述三种函数对应的轴上磁场沿 $k_w z$ 的分布, 如图 1 所示.

本文非线性模拟针对自由电子激光放大器进行. 采样电子的动力学方程为

$$\frac{d(\gamma m_0 v)}{dt} = -|e|(E + \frac{1}{c}v \times B), \quad \frac{d(\gamma m_0 c^2)}{dt} = -|e|v \cdot E \quad (5)$$

电子束与波导模之间的换能关系, 遵从能量守恒定律, 即: 电磁波平均坡印廷矢量的增量等于电子束在单位时间流经单位面积时能量的减少. 经过一些数学处理后, 即可得到电子束与波之间的能量守恒方程

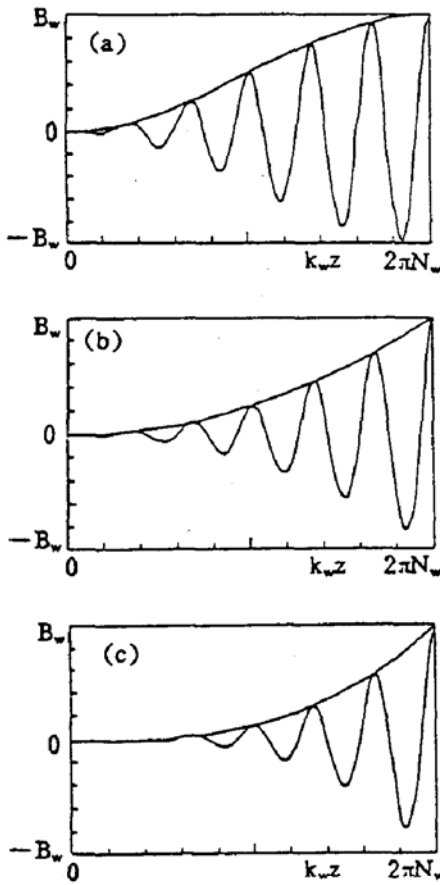


Fig. 1 Distribution of the adiabatic-magnetic-field at the entrance of wiggler on the axis:

- (a) $f(k_w z) = \sin^2(k_w z / 4N_w)$,
- (b) $f(k_w z) = (k_w z / 2\pi N_w)^2$,
- (c) $f(k_w z) = (k_w z / 2\pi N_w)^3$

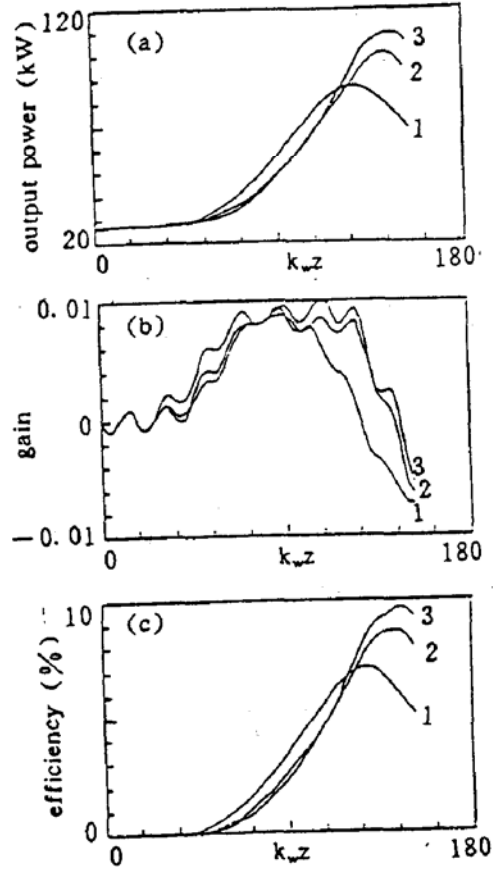


Fig. 2 Evolution of (a) output power, (b) gain, and (c) efficiency versus the axial distance $k_w z$, where curves 1, 2, and 3 correspond to $f(k_w z) = \sin^2(k_w z / 4N_w)$, $f(k_w z) = (k_w z / 2\pi N_w)^2$, and $f(k_w z) = (k_w z / 2\pi N_w)^3$, respectively

$$P_{out} - P_{in} = \pi R_b^2 n_0 v_z m_0 c^2 (\langle \gamma_0 \rangle - \langle \gamma \rangle) \quad (6)$$

$$P_{out/in} = \omega k_c R_w^2 A_{out/in}^2 / 8H_{in}, \quad H_{in} = k_c^2 R_w^2 / (k_c^2 R_w^2 - l^2) J_l^2(k_c R_w) \quad (7)$$

式中 c 为真空中光速, $|e|$ 、 m_0 为电子电量及静质量, l 为波的角向模式数, $P_{out/in}$ 分别表示输出及输入功率, $A_{out/in}$ 则表示波矢势的输出及输入幅值, ω 、 k_z 、 k_c 为波的角频率、纵向波数和截止波数, R_w 为波导半径, n_0 和 R_b 为电子束体密率和柱形实心束的半径, $\langle \gamma \rangle$ 为电子束中采样电子的

相对论能量因子的平均值, J_l 为 l 阶第一类贝塞耳函数. 模拟中对电子束用立体采样方法, 即在径向、角向、纵向全方位选择采样电子; 用四阶龙格-库塔法, 归一化迭代步长取 0.1, 相应算法误差为 10^{-4} 数量级. 模拟参数用如下一组实验数据^[2]: $\lambda_w = 3.3$ cm, $B_w = 0.0188$ T, $N_w = 6$; $R_b = 0.25$ cm, $\gamma_0 = 1.3$, 束流为 5.5 A; 导引场 $B_0 = 0.1512$ T; $f = 9.3$ GHz, $P_{in} = 28$ kW, 模式为园柱波导 TE_{11} 横电波, $R_w = 1.27$ cm. 并假设电子束为冷束. 采用前述三种绝热压缩磁场分布函数所得到的结果, 如图 2 所示.

从图 2 可以看到: 绝热压缩磁场采用正弦平方分布, 其饱和输出功率约 87 kW, 最大效率 7.2%; 采用平方分布的饱和功率为 102 kW, 最大效率 8.7%; 采用立方分布, 则可达到 110 kW, 对应的效率为 9.7%. 实验中测得的饱和功率为 107 kW, 最大效率约 10%^[2]. 由此可见, 绝热压缩磁场用立方分布, 比正弦平方分布及平方分布更好, 而且更接近实验值.

参 考 文 献

- [1] H. P. Freund, A. K. Ganguly, Nonlinear analysis of efficiency enhancement in free-electron-laser amplifiers. *Phys. Rev.*, 1986, **A33**(2):1060
- [2] J. Fajans, J. S. Wurtele, G. Bekefi *et al.*, Nonlinear power saturation and phase (wave refractive index) in a collective free-electron laser amplifier. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**(5):579

Influence of the adiabatic-magnetic-field distribution at the entrance of wiggler on the output power and efficiency in a free-electron laser*

ZHANG Shichang** WANG Wenyao XU Yong

(Department of Applied Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

(Received 12 August 1992)

Abstract

The influence of the adiabatic-magnetic-field distribution at the entrance of wiggler on the output power, gain, and efficiency in a free-electron laser is investigated in terms of nonlinear simulation. Results show that the distribution $f(k_w z) = (k_w z / 2\pi N_w)^3$ is better and closer to the measured data than both $f = \sin^2(k_w z / 4N_w)$ and $f = (k_w z / 2\pi N_w)^2$.

Key words free-electron laser, wiggler, nonlinear.

* Work supported by the National Natural Science Foundation of China, and the Scientific Research Foundation of Southwest Jiaotong University

** China Center of Advanced Science and Technology (world Laboratory)