

# 远红外自由电子激光器的带宽扩展<sup>+</sup>

刘庆想\* 徐 勇 张世昌\*\*

(西南交通大学应用物理系, 成都 610031)

**摘 要** 本文研究了波导尺寸、电子束能量、摇摆器周期及磁场强度对波导型自由电子激光带宽的扩展作用. 文中给出了带宽约 400  $\mu\text{m}$  的远红外(工作波长 600~1000  $\mu\text{m}$ )自由电子激光振荡器的设计参数, 并对有关工程问题进行了讨论.

**关键词** 自由电子激光, 远红外, 带宽, 波导.

## 1 引 言

远红外自由电子激光器的工作条件比较复杂, 受到波导腔、电子束、摇摆器多种参数的影响和制约. 这类器件的频带应该足够宽, 才不至于因工程因素带来的影响(例如加工误差, 安装调整的不完备性, 等等)而使器件不能有效地工作. 可见, 扩展远外自由电子激光器带宽, 具有理论价值和实用意义. 先前, 主要用调整波导尺寸的方法来扩展带宽<sup>[1~4]</sup>. 本文将较全面地研究调整电子束能量、摇摆器周期和磁场强度对扩展带宽的作用. 与调整波导尺寸方法的对比计算表明, 后三种方法的效果同样显著.

考虑到器件小型化的重要性, 本文还就采用射频加速器和小周期摇摆器, 给出了远红外自由电子激光振荡器的设计参数, 并进行了讨论.

## 2 频率与增益特性

波导中只能存在色散波, 因此与自由空间中情况不同, 波导自由电子激光的频率特性. 粗略地讲, 可由真空波导模式和电子辐射模式的色散关系决定:

$$\left. \begin{aligned} (\omega/c)^2 &= k^2 + k_c^2 \\ \omega &= (k + k_\omega)v_z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $\omega$  为电磁波的圆频率,  $k_c$  为波导的截止波数,  $k$  为纵向波数,  $k_\omega$  为摇摆器的波数,  $c$  为真空中光速,  $v_z$  为电子束的纵向速度. 由(1)式得知有两个耦合频率:  $\omega_+$  与  $\omega_-$ , 它们的表达式由

<sup>+</sup>国家自然科学基金和国家高技术激光领域资助项目

\*现工作单位:成都市 517 信箱 50 分箱

\*\*中国高等科学技术中心(世界实验室)理论物理分中心.

收稿日期:1993年7月21日

(1)式联解得到

$$\frac{\omega_{\pm}}{c} = \beta_z \gamma_z^2 k_w \left\{ 1 \pm \beta_z \left[ 1 - \left( \frac{k_c}{\beta_z \gamma_z k_w} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2)$$

式中  $\beta_z = v_z/c$ ,  $\gamma_z = (1 - \beta_z^2)^{-1/2}$ . 上式表明: 当  $k_c = \beta_z \gamma_z k_w$  时, (1) 式中的两条曲线相切,  $\omega_+$  与  $\omega_-$  重合:  $\omega_+ = \omega_- = k_w \beta_z \gamma_z$ .  $k_c = \beta_z \gamma_z k_w$  称为掠射条件 (graze condition) 或零滑移条件 (zero slippage condition), 此时波的群速度与电子束纵向速度相同, 即  $v_g = v_g$ .

自由空间中的电磁波是非色散波, 即截止波数  $k_c = 0$ , 色散关系简化为  $\omega = kc$ . 这样, 它同电子辐射模的耦合频率只有一个, 如图 1 所示, 由  $\omega = kc$  与  $\omega = (k + k_w)v_z$  联解得到:

$$\omega_f = \frac{k_w v_z}{(1 - \beta_z)} \quad (4)$$

当  $\beta_z \lesssim 1$  时, 上式近似为

$$\omega_f = 2 \gamma_z^2 k_w v_z \quad (5)$$

由(2)式可知, 波导自由电子激光的最高频率发生在  $k_c = 0$ , 其值为  $2\beta_z \gamma_z^2 k_w$ , 与  $\omega_f$  相同. 实际上, 波导截止波数  $k_c \neq 0$ , 故  $\omega_-$  总低于  $\omega_f$ . 在掠射条件(或零滑移条件)下,  $\omega_+ = \omega_- = \omega_f/2$ . 器件在实际运行中, 电子束对真空波导模的色散产生实质性影响, (1)式中第一式须加上电子束的贡献. 这样, 波导模与电子辐射模的频率耦合关系发生变化, 从而影响到波导模增益对耦合频率的依赖性<sup>[5]</sup>. 波导自由电子激光的增益特性, 可用小讯号增益公式定量描述. 定义增益  $G$  等于电子束传递给波的动能  $\Delta W_L$  与电磁波在波导中的储能  $W_0$  之比, 即  $G = \Delta W_L/W_0$ .

由小讯号假设不难得到矩形波导  $TE_{mn}$  模的增益表达式为<sup>[4]</sup>

$$G = \pi \frac{(1 + K^2) K^2}{\beta_z^3 \gamma_z^5} \frac{\lambda_w^3 N^3}{\sum} \frac{I}{I_0} \left( k + \frac{2\pi}{\lambda_w} \right) g(\theta) \quad (6)$$

$$g(\theta) = \frac{d}{d\theta} \left[ \frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2} \right]^2, \quad \theta = [(\omega/v_z) - k - k_w]L \quad (7)$$

$$K = |e| A_w / (\sqrt{2} m_0 c^2), \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} \quad (8)$$

$$\sum = \frac{ab[(m/a)^2 + (n/b)^2]^P}{4(n/b)^2} \quad \begin{matrix} (m, n \neq 0, P = 1) \\ (m, n = 0, P = 2) \end{matrix} \quad (9)$$

式中  $a$ ,  $b$  和  $L$  分别为矩形波导的宽边尺寸、窄边尺寸和长度;  $A_w$ ,  $\lambda_w$  和  $N$  为摇摆器磁场的矢势幅值、波长和周期数目;  $m_0$  和  $|e|$  为电子静质量和电量;  $I_0$  为阿尔芬 (Alfvén) 电流;  $I$  为电子束流强度.

从增益公式可以得到下述增益特性:

1) 在增益  $\omega = \omega_{\pm}$  处 (包括相切情况, 即 6.3 掠射条件或零滑移条件), 因  $\theta = 0$ , 故  $G = 0$ .

2) 正增益的获得依赖于  $\omega$ , 且受到波导、电子束和摇摆器参数的影响和制约.

Doria 等人<sup>[4]</sup>分析了波导尺寸对增益的影响, 他们发现: 当  $\omega_+$  与  $\omega_-$  相离较远时, 正增益只发生在频率略高于  $\omega_-$  和略低于  $\omega_+$  的较窄范围内. 通过改变波导尺寸,  $k_c$  及  $\omega_{\pm}$  发生相应的

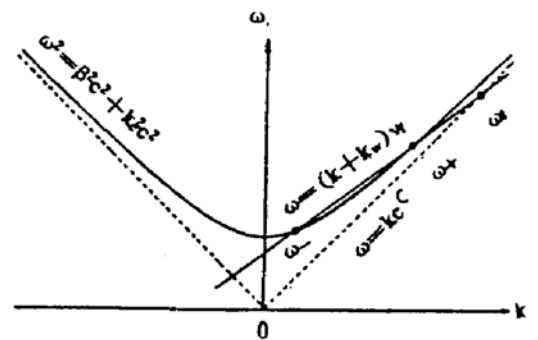


Fig. 1 Dispersion curves of a waveguide free-electron laser

变化,使  $\omega_+$  和  $\omega_-$  靠近,这时,正增益区域逐渐衔接.当接近掠射条件或零滑移条件, $\omega_+$  与  $\omega_-$  进一步靠近,正增益区域联成一片,正增益的频率得到扩展.这种调整波导尺寸来扩展带宽度的方法,已得到原理性实验证实<sup>[6]</sup>.

### 3 扩展带宽方法的比较研究

从增益公式可知,除波导尺寸外,电子束能量  $\gamma$ 、摇摆器磁场强度幅值  $B_w$  和周期  $\lambda_w$ ,都会对增益的带宽有影响.下面,与 Doria 等人<sup>[4]</sup>的工作进行比较.选取矩形波导 TE<sub>01</sub> 模,  $N = 8$ ,  $l = 1A$ ,  $\gamma = 4.55$ ,  $K = 1$ , 增益曲线受  $b$  的影响情况,示于图 2(a).图中五条曲线分别对应  $b = 4.418, 4.368, 4.318, 4.268, 4.218$  mm.图 2(b)示出了固定  $b = 4.318$  mm 而改变相对论能量因子  $\gamma$  的情况,图中曲线分别对应于  $\gamma = 4.65, 4.60, 4.55, 4.50, 4.45$ .图 2(c)是固定  $\gamma = 4.55$ ,而改变摇摆器磁场强度的情况,分别取  $B_w = 0.63, 0.62, 0.61, 0.60, 0.59$  T.图 2(d)则是改变摇摆器周期的情况,取  $\lambda_w = 2.55, 2.52, 2.50, 2.48, 2.45$  cm.

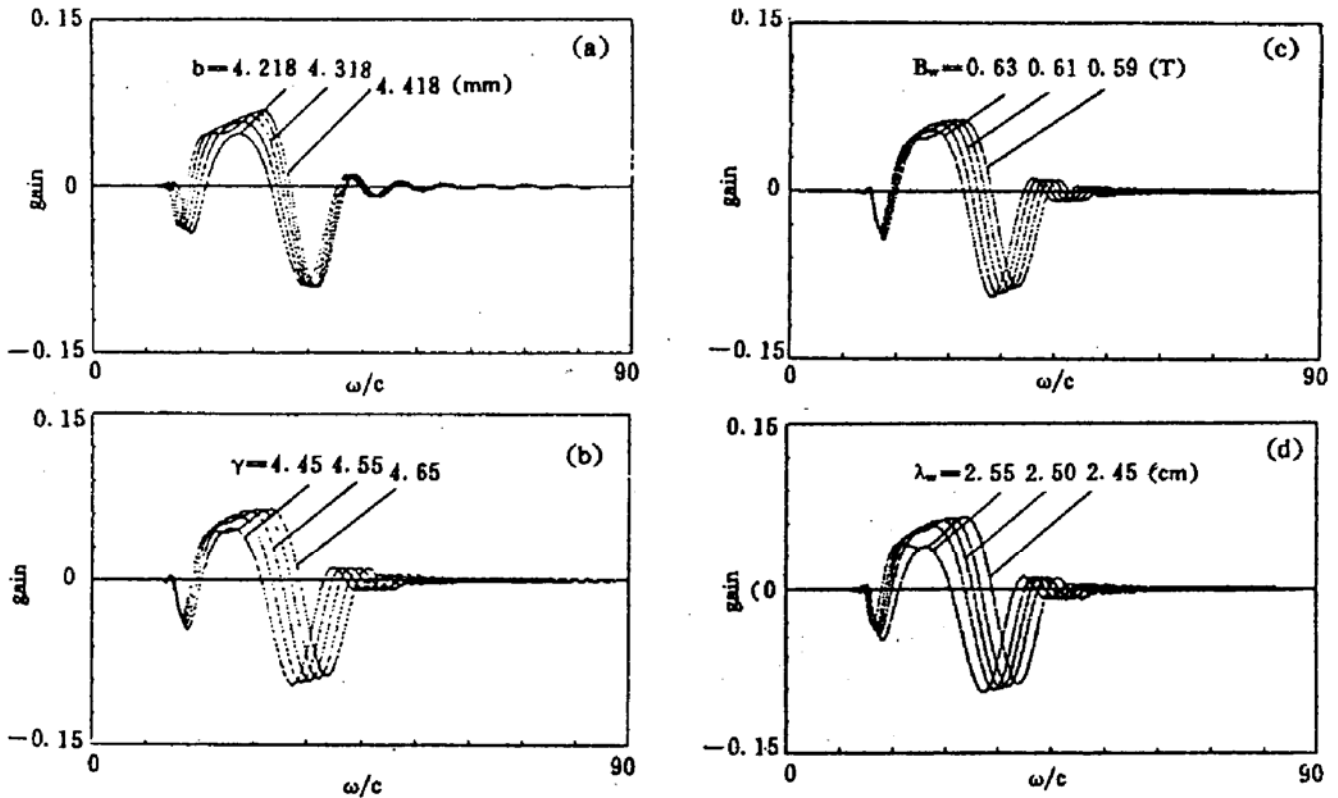


Fig. 2 Comparison of the methods (a) waveguide dimensions; (b) electron beam energy; (c) wiggler strength; (d) wiggler period

从以上比较计算的结果可以发现,四种扩展增益带宽的方法中,改变摇摆器磁场强度与改变波导尺寸同样有效,而改变电子束能量和摇摆器周期的影响更为显著.因此精确地选定这些参数,对于波导自由电子激光器运行是至关重要的.

### 4 宽频带远红外自由电子激光振荡器设计参数及讨论

以上各节讨论的是放大器情况.对于振荡器,可视为正向波与反向波相干迭加的结果,因此,以上的分析仍可推广到振荡器情况.众所周知,采用小周期摇摆器,是使自由电子激

光器小型化的关键技术之一, 国内外已开展了这方面的理论及实验研究<sup>[7~11]</sup>. 根据以上的分析和计算, 本文用小周期摇摆器, 设计了两组参数, 把工作波长推进到远红外区域, 如表 1 所示. 相应的增益曲线示于图 3. 作为比较, 在表 1 和图 3 中给出了意大利 ENEA 小组的研究结果<sup>[6]</sup>.

Table 1 Design parameters of for-infrared FEL oscillators with broad band

parameter	I (ENEA <sup>[6]</sup> )	I	II
electron energy [MeV]	1.8	2.1	3.0
energy factor $\gamma$	4.55	5.2	7.0
accelerator frequency [GHz]	3.0	3.0	3.0
$I_{\text{peak}}$ [A]	4.0	10.0	10.0
energy spread (%)	1.0	1.0	1.0
micropulse (ps)	15	10	10
macropulse ( $\mu\text{s}$ )	4	4	4
wiggler period (cm)	2.5	1.5	1.8
wiggler length (cm)	20.0	16.5	16.2
wiggler magnetic field (T)	0.61	0.68	0.85
wiggler parameter k	1.0	0.67	1.01
waveguide gap b (cm)	4.32	1.88	2.0
operation wavelength (cm)	2.43	0.82	0.80
gain (%)	26 37	43	
oscillator cavity length (cm)	29.34	24.32	24.47
oscillating number	2000	2400	2400
mode	TE01	TE01	TE01

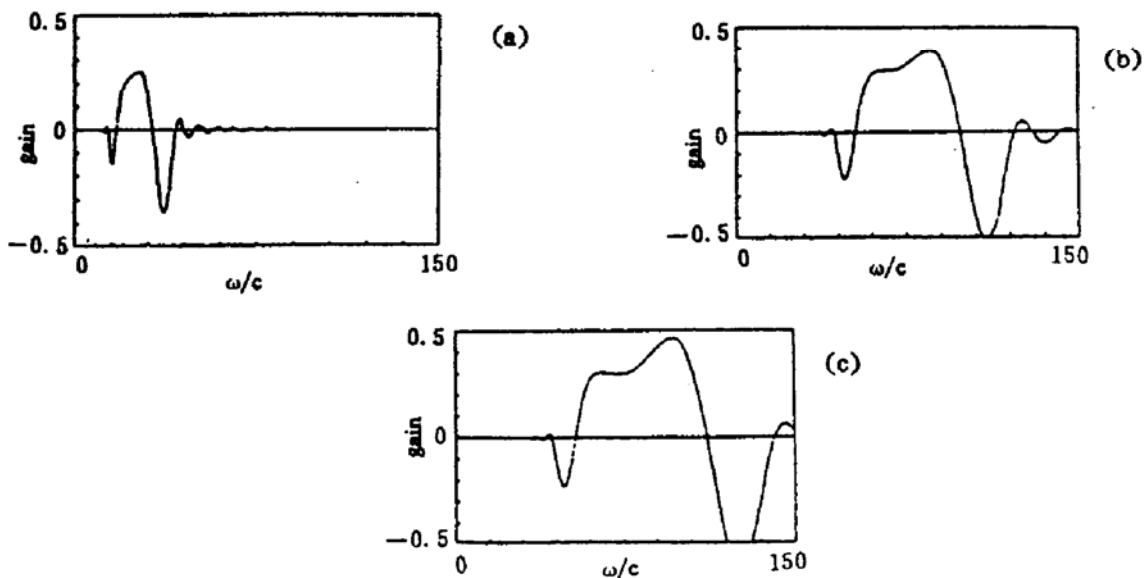


Fig. 3 Gain curves of a far-infrared FEL oscillator with broad band, where the parameters of (a), (b), and (c) correspond to the ones of group I, II and III in table 1, respectively

下面讨论表 1 设计参数的可行性. 因 ENEA 所运用的参数已实验成功<sup>[6]</sup>, 因此, 只需择其与

ENE A 参数不同之处进行讨论. 从表 1 可知, 本文采用了 10 A 的峰值束流, 高于 ENE A 设计的 4 A 值, 但从斯坦福大学 Pantell 研究小组<sup>[12]</sup>报导的情况来看, 射频加速器是可以提供 10 A 峰值电流的, 不会有不可越逾的技术困难. 此外, 本文设计的摇摆器磁场虽然较高, 但从最近的研究结果来看, 也是可实现的<sup>[11]</sup>.

由于采用了小周期摇摆器, 并从五十余组参数中进行了充分的优化计算, 使得本文的设计参数比 ENE A 的设计参数具有下述优点: 一是把工作波段从毫米波推进到远红外区域; 二是增益有所提高; 三是相对带宽提高了近一倍左右; 四是振荡次数更多.

### 参 考 文 献

- [1] S. K. Ride *et al.*, Reducing slip in a far-infrared FEL using a parallel waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57** (8): 1283~1285
- [2] W. J. Golightly *et al.*, Spontaneous emission and gain in a waveguide FEL. *IEEE J. Quan. Electron.*, 1991, **QE-27**(12): 2656~2666
- [3] R. Bartolini *et al.*, Theoretical and experimental aspects of a waveguide FEL. *Nucl. Instru. & Meth. Phys. Res.*, 1991, **A 304**(2): 417~420
- [4] A. Doria *et al.*, Kinematic and dynamic properties of a waveguide FEL. *Opt. Commun.*, 1991, **80**(5/6): 417~424
- [5] S. C. Zhang, Z. Zhang, Influence of transverse dc self-fields of the equilibrium beam on the dispersion relation in a FEL with an axial magnetic field. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8): 3463~3466
- [6] F. Ciocci *et al.*, Operation of a compact FEL in the millimeterwave region with a bunched electron beam. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(7): 828~931
- [7] V. L. Granatstein *et al.*, Small period electromagnetic wigglers for FEL. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**(6): 643~645
- [8] J. C. Gallardo, Random error in iron-dominated microwigglers. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(3): 1115~1120
- [9] 封碧波, 王明常, 王之江, 新型小周期 wiggler 的研制. *物理学报*, 1992, **41**(3): 442~447
- [10] Q. Liu, C. Zhou, Z. Hui, Hybrid micro-wiggler experiment. *Nucl. Instru. & Meth. Phys. Res.*, 1992, **A 318** (4): 811~812
- [11] 刘庆想等, 强磁场混合型短周期摇摆器. *强激光与粒子束*, 1993, **5**(2): 265~271
- [12] R. H. Pantell *et al.*, Interferimeter mirror with holes on axis. *Nucl. Instru. & Meth. Phys. Res.*, 1990, **A 296** (3): 638~641

## Extension of the Bandwidth for a Far-Infrared Free-Electron Laser

Liu Qingxiang      Xu Yong      Zhang Shichang

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

(Received 21 July 1993)

**Abstract** Extension of the bandwidth is investigated for a waveguide free-electron laser (FEL) by adjusting the waveguide dimensions, or the electron beam energy, or the period and strength of the wiggler. A far-infrared FEL oscillator with the bandwidth of 400  $\mu\text{m}$  is designed.

**Key words** free-electron laser, far-infrared, bandwidth, waveguide.