

Cherenkov 型自由电子激光器中 介电系数选择的研究*

赵东焕

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800)

摘要: 计算了 Cherenkov 型自由电子激光器中介质的介电系数的变化对激光器输出性能的影响, 结果表明, 偏大或偏小的介电系数不仅会降低效率, 而且对增益特性产生严重的影响.

关键词: 电子束相干辐射, Cherenkov 辐射, 自由电子激光, 增益效率.

引言

自由电子激光器理论预言其能量转换效率可高达 50% 以上^[1], 然而目前能运行的 Raman-Compton 型自由电子激光器效率还较低, 大部分器件的实验效率都在 10% 左右, 最好的 8 mm 相干辐射自由电子激光效率也只有 34%^[2].

一般 Raman-Compton 型自由电子激光实质上是利用 Wiggler 磁场驱动的电子束横向动能转换成辐射能. 而实验中实际运行的电子束横向速度很小, 约为纵向速度的 10%^[3], 大部分电子束纵向动能没有得到利用. 为提高自由电子激光能量转换效率, 我们提出了 Cherenkov 新型自由电子激光器辐射机理^[4,5], 其特点是既有电子束相干辐射, 又具有 Cherenkov 辐射, 可综合利用电子束横向动能和部分纵向动能转换成辐射能. 理论分析表明, 它有较强的激光器增益和效率^[6].

为实现这类新型高效率自由电子激光器, 先要深入研究其物理参量的变化对激光器输出性能的影响. 为此我们用计算机模拟计算各物理参量对激光器增益和效率的影响, 本文介绍介质的介电系数对激光器输出性能影响的计算结果.

1 辐射原理

Cherenkov 辐射是基于 Cherenkov 效应而产生的辐射, 这种效应是运动中的辐射波与介质的诱导电流次波相干的结果^[7]. Walsh 等^[8]利用这个辐射原理首先在实验中成功地实

本文 1993 年 4 月 2 日收到, 修改稿 1993 年 7 月 1 日收到.

* 国家自然科学基金资助项目.

现了功率为 1 MW、频率为 60 GHz 的相干辐射.

研究已经表明, 一种系统可同时实现两种不同机理的辐射^[9,10], 基于这种理论我们研制了 Cherenkov 新型自由电子激光器. 其结构由三部分组成: (1) 高质量的相对论电子束; (2) Wiggler 泵浦磁场; (3) 具有 Cherenkov 效应的慢波结构作用区. 这种结构与国外近期研制的 Cherenkov CARM 装置^[11]较为接近, 但两者有明显的区别.

图 1 是我们设想中的 Cherenkov 型自由电子激光器基本结构及其同步电子与波相互作用示意图. 由图 1 可见, 互作用结果比仅有电子束相干辐射的群聚力大得多^[5], 因而可形成更大的相干辐射.

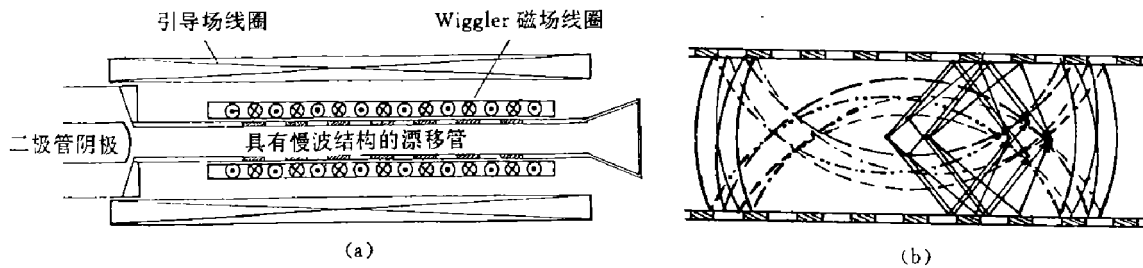


图 1 具有慢波介质 Cherenkov 型自由电子激光器的基本结构和电子与波相互作用示意图
(a) 基本结构图; (b) 作用于同步电子辐射波的等势位图

Fig. 1 The schemes of basic construction and interaction between electrons and waves in the Cherenkov FEL with slow wave dielectric
(a) The scheme of basic construction; (b) The equipotential figure of radiative wave to interact with synchronizing electrons

2 计算公式

为获得性能良好的慢波结构器件, 须对介质中介电系数 ϵ 的变化对激光器增益和效率的影响进行模拟计算.

Cherenkov 型自由电子激光器的增益关系式可以从洛仑兹力运动方程和能量方程中导出^[6], 即

$$G = G_c + G_r + G_{rc}, \quad (1)$$

式 (1) 中 G_c 和 G_r 分别为电子束 Cherenkov 辐射增益和相干辐射增益, G_{rc} 是这两种辐射的互作用增益, 它们分别为

$$G_c = g_0 \frac{\Omega_0^2 \Omega_c^2 (K_0 + K_c)}{\omega_0 \Delta \omega_{0c}^3} \left(\frac{2}{\omega_c} + \frac{1}{\omega_0} \right) \left[1 - \cos \Delta \omega_{0c} t - \frac{1}{2} \Delta \omega_{0c} t \sin \Delta \omega_{0c} t \right], \quad (2)$$

$$G_r = g_0 \frac{\Omega_0^2 \Omega_r^2 (K_0 + K_r)}{\omega_0 \Delta \omega_{0r}^3} \left(\frac{2}{\omega_r} + \frac{1}{\omega_0} \right) \left[1 - \cos \Delta \omega_{0r} t - \frac{1}{2} \Delta \omega_{0r} t \sin \Delta \omega_{0r} t \right], \quad (3)$$

$$G_{rc} = g_0 \frac{4 \Omega_r^2 \Omega_c^2 (K_r - K_c)}{\Delta \omega_{rc}^3} \left(\frac{2}{\omega_r} - \frac{1}{\omega_c} \right)^2 \left[1 - \cos \Delta \omega_{rc} t - \frac{1}{2} \Delta \omega_{rc} t \sin \Delta \omega_{rc} t \right], \quad (4)$$

式中 $g_0 = \frac{8\pi m_0 \gamma_s \rho_e u^3}{\epsilon c^2 E_0^2}$, 其中辐射波相速 $u = \frac{C}{\sqrt{\epsilon \mu}}$, ϵ 和 μ 分别为系统中介质的介电系数和导磁系数, ρ_e 为电子束密度; $\omega_0 = K_0 u$, $\omega_c = K_c u$, $\omega_r = K_r u$; K_c 、 K_r 和 K_0 分别为 Cherenkov 辐射波数、相干辐射波数和 Wiggler 磁场波数.

$$\Omega_c = \frac{|e|E_{c0}}{\gamma_s m_0 u}; \quad \Omega_r = \frac{|e|E_{r0}}{\gamma_s m_0 u}; \quad \Omega_0 = \frac{|e|B_w}{\gamma_s m_0} \quad (5)$$

式 (5) 中 E_{c0} 和 E_{r0} 分别为 Cherenkov 辐射电场振幅和相干辐射电场振幅. γ_s 是电子与波相互作用前相对论能量因子. 自由电子激光器效率为^[6]

$$\begin{aligned} \eta = 1 - \frac{\gamma_0^2}{(\gamma_0^2 - 1)\gamma^2} \left\{ \gamma^2 - 1 - \frac{\gamma^2 e^2}{C^2 \gamma_s^2 m_0^2} \left[\frac{4E_{c0}^2}{\omega_c^2} + \frac{4E_{r0}^2}{\omega_r^2} + \frac{B_w^2 u^2}{\omega_0^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{8E_{c0}E_{r0}}{\omega_c \omega_r} \cos(\Delta\omega_{rc}t + \theta_{rc}) - \frac{4E_{c0}B_w u}{\omega_c \omega_0} \sin(\Delta\omega_{0c}t + \theta_c) \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{4E_{r0}B_w u}{\omega_r \omega_0} \sin(\Delta\omega_{0r}t + \theta_r) \right] \right\}; \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta\omega_{0c} = (K_c + K_0)v_z - \omega_c; & \theta_c = (K_c + K_0)Z_0 + \psi_c; \\ \Delta\omega_{0r} = (K_r + K_0)v_z - \omega_r; & \theta_r = (K_r + K_0)Z_0 + \psi_r; \\ \Delta\omega_{rc} = (K_r - K_c)v_z - (\omega_r - \omega_c); & \theta_{rc} = (K_r - K_c)Z_0 + \psi_r - \psi_c; \end{cases} \quad (7)$$

式中 ψ_c 和 ψ_r 分别为 Cherenkov 辐射和相干辐射的初相位. v_z 为相对论电子束纵向速度.

$$\begin{aligned} v_z = \frac{\Omega_c \Omega_0 u}{\Delta\omega_{0c}} \left(\frac{2}{\omega_c} + \frac{1}{\omega_0} \right) [\sin(\Delta\omega_{0c}t + \theta_c) - \sin \theta_c] \\ + \frac{\Omega_r \Omega_0 u}{\Delta\omega_{0r}} \left(\frac{2}{\omega_r} + \frac{1}{\omega_0} \right) [\sin(\Delta\omega_{0r}t + \theta_r) - \sin \theta_r] \\ + \frac{2\Omega_r \Omega_c u}{\Delta\omega_{rc}} \left(\frac{1}{\omega_r} - \frac{1}{\omega_c} \right) [\cos(\Delta\omega_{rc}t + \theta_{rc}) - \cos \theta_{rc}], \end{aligned} \quad (8)$$

式 (6) 中 γ 可由下列微分方程确定

$$\frac{d}{dt} \gamma = \frac{d}{dt} \delta\gamma_1 + \frac{d}{dt} \delta\gamma_2, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \delta\gamma_1 = \frac{\Omega_c \Omega_0 u^2 \gamma_s}{C^2 \omega_0} \cos(\Delta\omega_{0c}t + \theta_c) + \frac{\Omega_r \Omega_0 u^2 \gamma_s}{C^2 \omega_0} \cos(\Delta\omega_{0r}t + \theta_r) \\ - \frac{2\Omega_r \Omega_c u^2 \gamma_s}{C^2} \left(\frac{1}{\omega_r} + \frac{1}{\omega_c} \right) \sin(\Delta\omega_{rc}t + \theta_{rc}), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt}\delta\gamma_2 = -\frac{\Omega_c\Omega_0u^2\gamma_s(K_0+K_c)}{C^2\omega_0}\sin(\Delta\omega_{0c}t+\theta_c)\delta z - \frac{\Omega_r\Omega_0u^2\gamma_s(K_0+K_r)}{C^2\omega_0}\times$$

$$\sin(\Delta\omega_{0r}t+\theta_r)\delta z - \frac{2\Omega_r\Omega_cu^2\gamma_s(K_r-K_c)}{C^2}\left(\frac{1}{\omega_r}-\frac{1}{\omega_c}\right)\cos(\Delta\omega_{rc}t+\theta_{rc})\delta z, \quad (11)$$

$$\delta z = v_z dt. \quad (12)$$

计算参量选择范围为 $\psi_c = \psi_r = 0; z_0 = 0; \gamma_s = \gamma_0 = 2.6$ (γ_0 为电子束初态能量因子), $E_{c0} = E_{r0} = E_0/2, B_w \approx E_0/u; e = 1.602 \times 10^{-19}c, m_0 = 9.1055 \times 10^{-31}kg, C = 2.998 \times 10^{10}cm/s, \rho_e = 6.4 \times 10^7cm^{-3}, \mu = 1, \epsilon = 1.2 \sim 3.0, B_w = 2 \sim 3kG, \Delta\omega \approx 10^4 \sim 10^8, \lambda_w = 0.8 \sim 9.6cm, L = \frac{\lambda_c}{\lambda_r} = 2 \sim 8, N = \frac{\lambda_w}{\lambda_r} = 3 \sim 1000, \lambda_w$ 为 Wiggler 周期长度.

3 结果与分析

图 2(a) 和图 2(b) 为不同参量 N 情况下计算所得增益 G, G_c 和 G_r 特性曲线图 (G_{rc} 很小可以忽略不计). 从这两图看出 G_c 比 G_r 大得多, 而且随参量 L 的增加, G_c 有明显的增大, 并更加接近于 G, G_c 与 G_r 之间差距随 L 参量增加而增大. 此外, 两图的纵坐标的量级有较大级差 (10^7 量级差), 增益 G 以及 G_c 和 G_r 随 N 增大而明显减小.

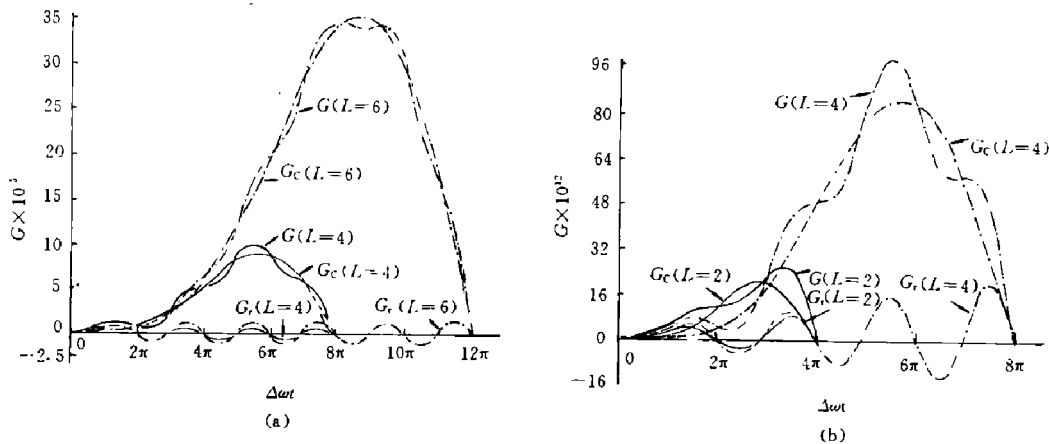


图 2 不同 N 参量下, 对应于 $\Delta\omega t$ 的增益 G, G_c 和 G_r 的特性曲线
 ($\lambda_w = 2.4cm, B_w = 2kG, \epsilon = 1.5$ 和 $L = 2$ 或 $L = 4$)
 (a) $N = 3; (b) N = 900$

Fig. 2 Characteristic curves of gains G, G_c and G_r vs. $\Delta\omega t$ under different parameters N

计算表明, 不同介电系数 ϵ 对激光器增益的影响是明显的 (见图 3), 从图 3 可见, 在其它参量给定条件下, 增益特性曲线峰值在一定范围内随 ϵ 的增大而增加. 但是 ϵ 参量选择偏大, 反而会影响增益特性曲线 (见图 4), 当 $L=2$ 时增益特性曲线还相当好, 且峰值也较大 (见图 4 中实线). 然而当 $L=4$ 时增益特性曲线 (见图 4 中虚线) 明显变坏, 在

特性曲线的正增益区中出现了负增益，而且整个增益曲线中负增益峰值相对大于正增益峰值，这说明在此组参量条件下不存在激光增长率。

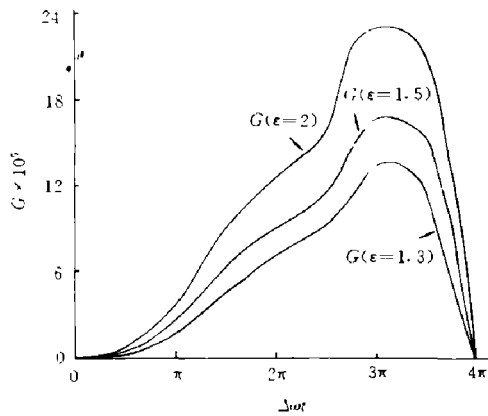


图 3 不同 ϵ 时增益 G 特性曲线
 ($\lambda_w = 4.8 \text{ cm}$, $B_w = 2 \text{ kG}$, $N = 4$ 和 $L = 2$)
 Fig. 3 Characteristic curves of gain G for different parameter ϵ

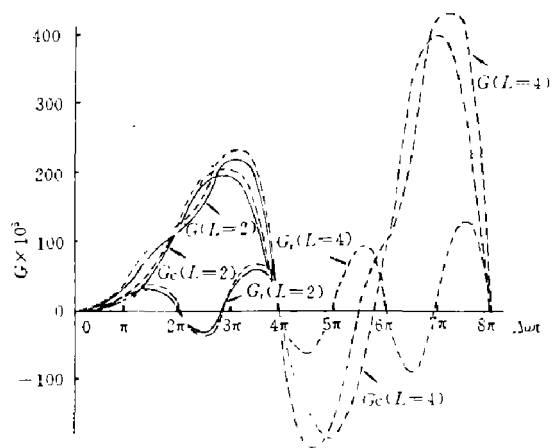


图 4 在参量 ϵ 较大情况下 ($\epsilon = 2.4$), 当 L 从 2 变为 4 时增益特性曲线
 ($\lambda_w = 4.8 \text{ cm}$, $B_w = 2 \text{ kG}$ 和 $N = 3$)
 Fig. 4 Characteristic curves of gains at L from 2 to 4 under the condition of larger parameter ϵ ($\epsilon = 2.4$)

同样，偏小的 ϵ 参量也对激光器增益特性曲线有影响，图 5 和图 6 给出了 $\epsilon = 1.2$ 时增益特性曲线由好变坏的过程。由此可见， ϵ 选择要适中，否则参量 ϵ 的偏大或偏小都会改变增益特性。但两者之间有所区别，在 ϵ 偏大情况下，增益特性曲线是随参量 L 的增大而由好变坏（见图 4）。而 ϵ 偏小情况下，增益特性曲线是随参量 N 的增大而由好变坏（见图 5 和图 6）。

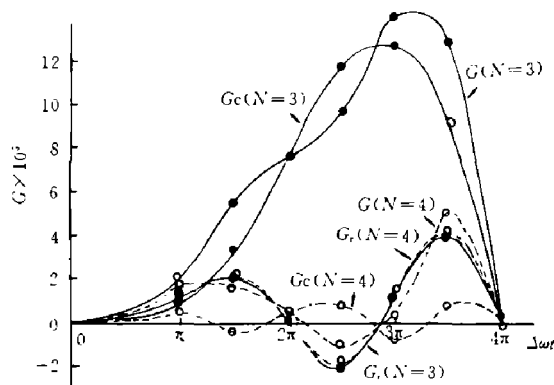


图 5 在参量 ϵ 较小情况下 ($\epsilon = 1.2$), 当 N 从 3 变为 4 时增益特性曲线
 ($\lambda_w = 4.8 \text{ cm}$, $B_w = 2 \text{ kG}$ 和 $L = 2$)
 Fig. 5 Characteristic curves of gains at N from 3 to 4 under the condition of smaller parameter ϵ ($\epsilon = 1.2$)

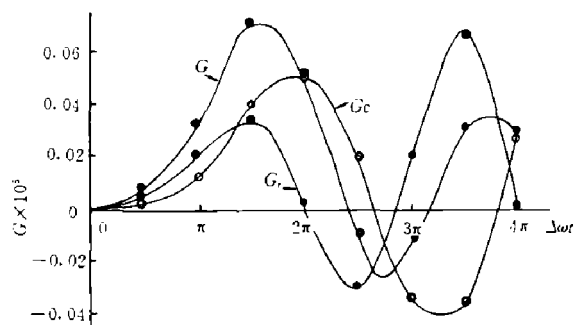


图 6 在图 5 参量情况下当 $N = 7$ 时增益特性曲线
 Fig. 6 Characteristic curves of gains for $N = 7$ under the condition of Fig. 5

介电系数对 Cherenkov 型自由电子激光器效率的影响是很复杂的. 为了便于比较, 我们把不同 ϵ 条件下不同 N 参量的所得的最大效率结果绘于图 7. 从图 7 中看出, 介电系数 ϵ 的改变对激光器效率的影响不仅对于不同的 N 和 L 参量是复杂的, 而且对于同等量级的 N 和 L 参量其影响也是复杂的.

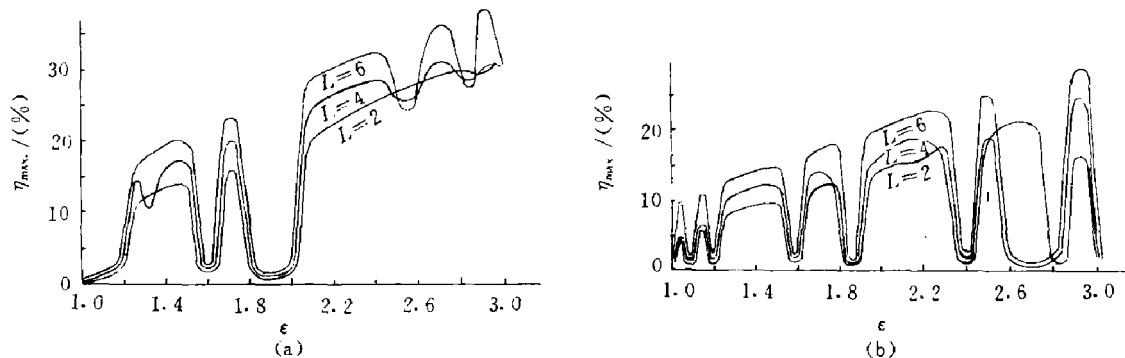


图 7 不同 N 和 L 时的最大效率 η_{\max} 与 ϵ 的对应曲线 ($\lambda_w = 4.8$ 和 $B_w = 2$ kG)
(a) $N = 3, L = 2, 4, 6$; (b) $N = 4, L = 2, 4, 6$

Fig. 7 The curves of calculated maximum efficiency η_{\max} vs. ϵ at $\lambda_w = 4.8$ cm and $B_w = 2$ kG under the condition of different parameters N and L

4 结语

本文用计算机模拟计算了不同参量情况下 Cherenkov 型自由电子激光输出特性. 研究了介电系数的变化对激光器增益和效率的影响, 其结果表明, 它对增益和效率都有较大的影响. 不合适的 ϵ 不仅会降低激光器效率, 而且对增益特性产生严重影响. 在我们选择的物理参量条件下, 较合适的 ϵ 范围大约在 2~2.4 之间, 但计算表明, ϵ 的选择范围还取决于其它参量条件.

参考文献

- 1 Coison WB. *Phys. Quan. Elecs.*, 1978;5:157
- 2 Orzechowski J et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1986;57(17):2172
- 3 刘盛纲. *强激光与粒子束*, 1990;2(2):131
- 4 赵东焕. *红外研究*, 1989;8(4):291
- 5 赵东焕. *量子电子学*, 1992;9(增刊):51
- 6 赵东焕. *红外与毫米波学报*, 1991;10(2):87
- 7 曹昌祺. *电动力学*, 北京:人民教育出版社出版, 1961, P227
- 8 Walsh JE et al. *Phys. Fluids*, 1977;20:709
- 9 Schneider S, Spitzer R. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1977;MTT-25(6):551
- 10 赫光生. *中国激光*, 1986;13(2):71
- 11 Cao HB et al. *SPIE*, 1988;1039:324

THE CHOICE OF PERMITTIVITY IN THE CHERENKOV FEL*

ZHAO DONGHUAN

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

Abstract: The effects of variation of permittivity in the Cherenkov FEL on the output property of laser were calculated. The results show that, smaller or larger values of permittivity not only decrease the efficiency of laser, but also greatly influence the gain property of laser.

Key words: coherent radiation of electron beam, Cherenkov radiation, FEL, gain efficiency.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China.