

光学速调管结构喇曼自由电子 激光器研究

陈基忠 王明常 王之江 陆载通

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800

1989 年 11 月 27 日收到

本文提出光学速调管结构喇曼自由电子激光器总体实验设计, 采用一维单粒子模型对光学速调管结构自由电子激光器增益和效率的提高进行了研究.

PACC: 4255T; 4260

一、引 言

光学速调管 (optical klystron 简称 OK) 作为自由电子激光器 (Free Electron Laser 简称 FEL) 中的一种新型结构, 可望提高在可见光波段甚至紫外波段的激光增益和效率, 近年来已受到许多 FEL 物理学家的重视, 并取得了理论和实验方面的进展^[1,2]. 对于 5—6 MeV 能量的静电串列加速器, 激光输出的单次增益 $G_{\text{FEL}} = 1.21\% \text{A}^{-1}$, $G_{\text{OK}} = 72\% \text{A}^{-1}$, 波长 $\lambda_s = 14 \mu\text{m}$, 光学速调管结构比均匀摆动场 FEL 提高增益近 60 倍^[3]. 本文目的是研究在本所现有的这台喇曼自由电子激光器 (Raman FEL) 上进行 OK 结构原理性实验的可能性.

典型的 OK 结构如图 1 所示, 其三个基本组成部分是: (a) 入射区, 周期性摆动磁场与输入信号场对电子束进行能量调制; (b) 漂移区, 使电子束能量调制转化为密度调制; (c) 发射区, 使电子束能量转化为电磁波辐射. 这种结构实质上是运用了经典微波速调管中的预群聚思想, 使电子束在与摆动磁场和光波场相互作用前, 先进行预群聚, 使之达到最佳的人射相位^[4].

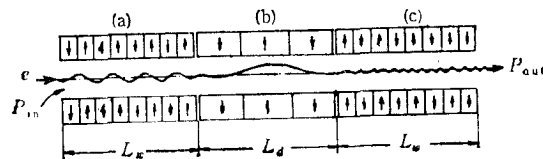


图 1 光学速调管结构原理图

(a) 入射区, 摆动磁场与输入信号 P_i 对电子束产生能量调制; (b) 漂移区, 将电子束能量调制转化为密度调制, 色散磁场增加有效的漂移距离; (c) 发射区, 将电子束能量转化为电磁波辐射

二、基本方程^[5]

电子在摆动磁场中的运动可由下列一维运动方程描述:

$$\frac{d\gamma}{dz} = -\frac{e_s a_w}{\beta(\beta+1)\gamma} \sin\phi, \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dz} = k_w - \frac{k_s}{\beta(\beta+1)\gamma^2} \left[1 + \frac{1}{2} a_w^2 - \frac{e_s a_w}{k_s} \cos\phi \right] + \frac{d\phi}{dz}, \quad (2)$$

$$\frac{de_s}{dz} = \frac{e}{mc^2} \frac{Z_0 a_w J_e}{\beta(\beta+1)} \left\langle \frac{\sin\phi}{\gamma} \right\rangle, \quad (3)$$

$$\frac{d\phi}{dz} = \frac{e}{mc^2} \frac{Z_0 a_w J_e}{\beta(\beta+1)} \frac{1}{e_s} \left\langle \frac{\cos\phi}{\gamma} \right\rangle, \quad (4)$$

式中

$$\phi = \int (k_w + k_s) dz - \omega_s t + \phi$$

为电子在有质动力势阱中的相位。前两式描述电子的运动状态,(3)式描述辐射电场的振幅变化,(4)式描述辐射场相位,有关参数见表1。

自由漂移空间 $a_w = k_w = 0$, 由(2)式得

$$d\phi/dz = -\frac{k_s}{\beta(\beta+1)\gamma^2}.$$

若电子漂移区长度为 L_d , 色散磁场强度为 B_d , 则电子实际漂移路径长度为

$$L_D = \frac{L_d^3}{48} (eB_d/mc)^2,$$

式中电子相位变化

$$\Delta\phi = -\frac{k_s}{\beta(\beta+1)\gamma^2} L_D.$$

(1)和(2)式可由哈密顿量

$$H(\gamma, \phi) = k_w \gamma + \frac{k_s}{\beta(\beta+1)\gamma} \left[1 + \frac{a_w^2}{2} - \frac{e_s a_w}{k_s} \cos\phi \right] + \gamma \frac{d\phi}{dz}$$

及其正则方程

$$\frac{d\gamma}{dz} = -\frac{\partial H}{\partial \phi}, \quad \frac{d\phi}{dz} = \frac{\partial H}{\partial \gamma}$$

推出。

在计算过程中,哈密顿量应当保持常数,能量也应处处守恒,由此来检验程序的正确性。相互作用的关键是电子束,辐射场和摆动磁场同步。也就是电子束的纵向速度要与辐射电场保持同相位,称为同步或共振,对应的共振能量为

$$\gamma^2 \approx k_s / \beta(\beta+1)k_w.$$

电子共振速度为 $\beta_r = k_r / (k_r + k_w)$ 。为使增益和效率最佳化, 注入电子速度 β_i 需要高于共振值 $\beta_i = \alpha\beta_r$, 其中 α 为失谐因数, 它可表示频率偏离量 $\Delta\omega$ 与共振频率 ω_r 的关系 $\alpha = \Delta\omega/\omega_r + 1$ 。对于放大器, 增益为

$$G = 10 \log (P_{out}/P_{in}) \quad [\text{dB}],$$

其效率定义为

$$\eta = (P_{out} - P_{in})/P_b = (\gamma(0) - \langle \gamma(z) \rangle) / (\gamma(0) - 1),$$

式中 P_{in} 和 P_{out} 分别为辐射的输入和输出功率, P_b 为电子束功率, $\gamma(0)$ 为电子束的初始能量, $\langle \gamma(z) \rangle$ 为某作用距离处电子平均能量。

表 1

B_w, k_w	摆动磁场强度, 波数
E_r, k_r	辐射电场强度, 波数
$b_w = (e/mc)B_w$	归一化摆动磁场强度 (m^{-1})
$e_r = (e/mc^2)E_r$	归一化辐射场强度 (m^{-1})
$z_0 = 377 \Omega$	自由空间波阻抗
J_e	电子束流密度
ϕ	辐射场相位

三、电子自发辐射功率

估算在超辐射状态下的 Raman FEL 的自发辐射功率, 在计算增益过程中是必需的。我们知道, 只有当电子作加速运动时才对其辐射有贡献^[6]。对于 Raman FEL, 其自发辐射功率来源于二极管枪区电子的加速运动。由二极管枪的结构^[7], 可设电子在枪区的加速度 \dot{v} 和其速度 v 平行, 则单个电子辐射功率的角分布

$$\frac{dP(\theta)}{d\Omega} = \frac{e^2}{16\pi^2\epsilon_0 c^3} \cdot \frac{\dot{v}^2 \sin^2\theta}{(1 - \beta \cos\theta)^2}$$

设 α 为阴极中心对阳极出口所张的半角, 约 11.3° , 而在加速度 \dot{v} 的计算中, 均匀加速场距离 d 取为 10mm, 则 $\dot{v} = U_e/d_m = 7.036 \times 10^{16} \text{m/s}^2$, U_e 为电子加速电压, 约 0.4MV, 则电流 $I = 800\text{A}$ 所产生的有效辐射功率

$$P_{in} = \frac{I \Delta t}{e} \frac{e^2 \dot{v}^2}{16\pi^2\epsilon_0 c^3} \int_0^{2\pi} \int_0^\alpha \frac{\sin^2\theta}{(1 - \beta \cos\theta)^2} \sin\theta d\theta d\varphi$$

$$\approx 0.062\text{W},$$

其 Δt 为均匀脉冲宽度, 约 30ns。

四、计算结果

模拟参数如下: 电子束能量 $\gamma = 1.78(0.4\text{MeV})$, 电流 $I = 800\text{A}$, 电子注半径 $R =$

3mm, 摆动磁场强度 $B_w = 0.08\text{T}$, 周期 $\lambda_w = 2.2\text{cm}$, 每段长度 $L_w = 0.4\text{m}$, 漂移区色散磁场强度 $B_d = 0.1\text{T}$, 长度为 0.4m , 辐射波长 $\lambda_r = 8\text{mm}$. 图 2(a), (b) 分别为不同输入信号 P_{in} 时, 光学速调管增益和效率曲线. $P_{in} \approx 0.5 \times 10^{-3}\text{W}$ 为一阈值 P_{th} , 当 $P_{in} < P_{th}$ 时, 几乎无输出; 当 $P_{in} > P_{th}$ 后, 进入小信号放大区域, 此时, 随着 P_{in} 的增加, 效率基本上呈线性增长, 当 $P_{in} \approx 0.07\text{W}$ 时, 效率达到峰值, 而增益曲线则一直缓慢下降. 当继续增加输入功率时, 进入非线性饱和区. 值得注意的是, 得到的 P_{th} , 对于本器件参数范围, 是无实际物理意义的, 因为电子束的自发辐射功率已远大于该阈值. 为了更好地观察增益和效率随不同输入信号 P_{in} 的变化规律, 图 3(a), (b) 表示 $P_{in} = 0.08 \times 10^{-0.2(L-1)}$, $L = 1, 5$ 时增益和效率随轴向距离 z 变化的关系曲线簇. 当 $L = 1, P_{in} = 0.08\text{W}$, 对应

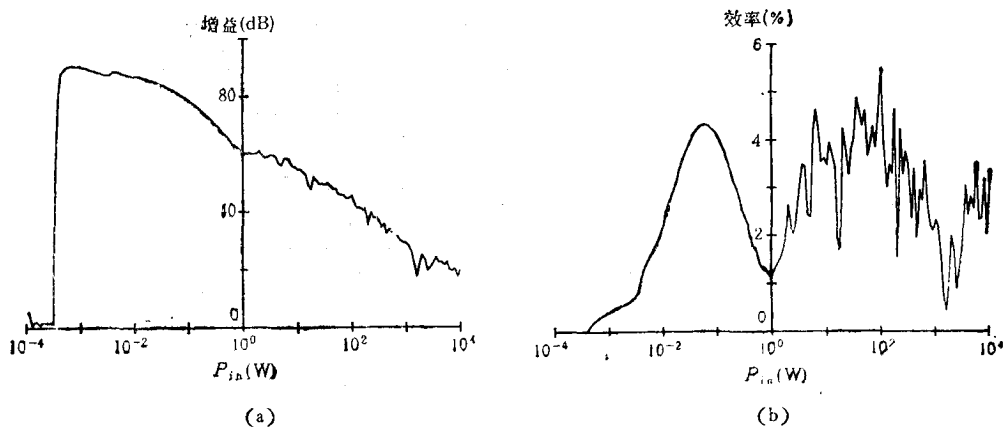


图 2 光学速调管增益和效率与输入信号 P_{in} 的关系曲线

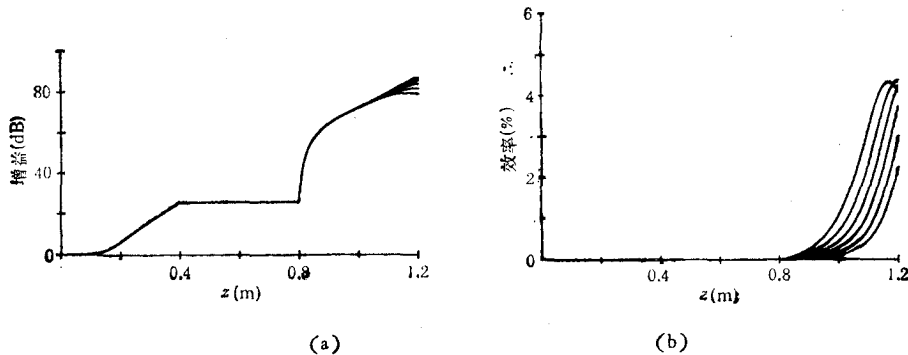


图 3 当 $P_{in} = 0.08 \times 10^{-0.2(L-1)}$, $L = 1, 5$ 时光学速调管增益和效率随轴向距离 z 变化的关系曲线簇, 左上方的曲线对应 $L = 1$; 右下方的曲线对应 $L = 5$

的是曲线簇左上方的那条曲线, 从其效率曲线可以看出, 它已达到峰值, 顶部开始下弯, 说明它已进入非线性饱和区. 本器件 $P_{in} = 0.062\text{W}$, 介于上条曲线与 $L = 2$ 曲线之间, 同时具有高增益 ($\approx 83\text{dB}$) 和高效率 ($\approx 4.2\%$). 图 4(a), (b) 为此时增益和效率随轴向距离 z 变化的关系曲线. 为了说明光学速调管结构对 FEL 增益和效率的提高, 计算了相同参数条件下均匀摆动磁场产生的增益和效率, 其结果见图 5(a), (b). 出口处增益 52dB , 效率

仅 0.056%, 明显低于光学速调管结构。从该图也可看出, 其增益和效率正处上升阶段, 因此模拟计算加长摆动磁场情况是有必要的。图 6(a), (b) 为对其模拟的结果, 当 $z = 1.19$ m 时, 增益近似为 83 dB, 效率近似为 4.5%, $P_{out} \approx 12.4$ MW, 此计算结果与我们近期完成的实验结果是接近的^[8]。若继续加长摆动磁场 ($z > 1.19$ m), 将不再有效。

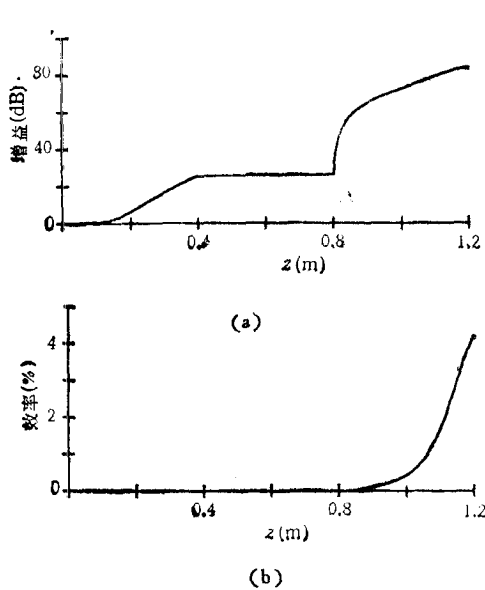


图 4 $P_{in} = 0.062$ W 时, 光学速调管增益和效率随轴向距离 z 变化的关系曲线 $L_w = 0.4$ m; $L_d = 0.4$ m

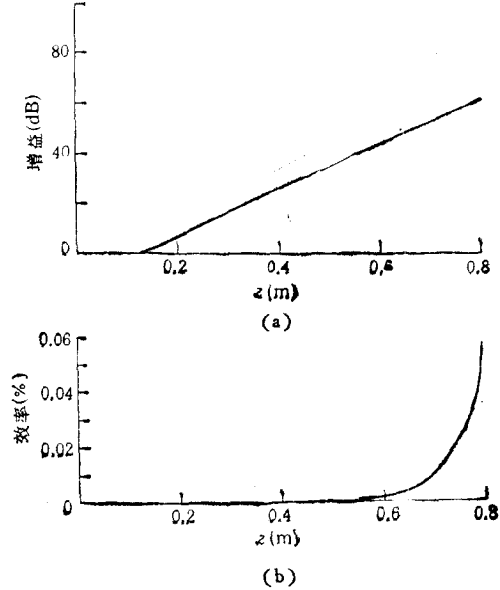


图 5 0.8 m 长均匀摆动磁场 FEL 增益和效率随轴向距离 z 变化的关系曲线 $P_{in} = 0.062$ W; $L_w = 0.4$ m; $L_d = 0$

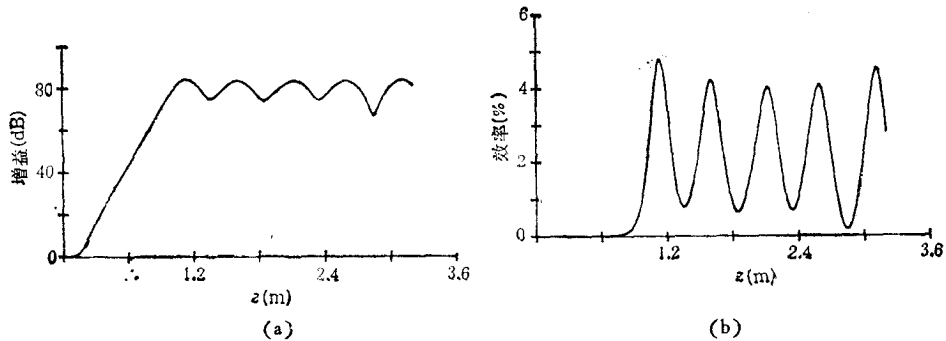


图 6 加长均匀摆动磁场 FEL 增益和效率随轴向距离 z 变化的关系曲线 $L_w = 1.6$ m; $L_d = 0$; $P_{in} = 0.062$ W

通过比较图 4, 图 5, 图 6, 可以认为: 光学速调管对增益和效率的提高, 实质上是由于漂移空间对电子群聚相位调制而使其非线性饱和区超前出现了。也即在给定的电子束及摆动磁场条件下, 通过调整光学速调管参数, 可望同时获得高增益和高效率。这种特性对于已工作在高增益区的喇曼自由电子激光器, 效果也许并不显著, 因为我们可以通过改变参数, 包括摆动磁场强度及长度, 使之达到近饱和功率输出。然而对于工作在短波长(红外或更短的波段)低增益区的康普顿自由电子激光器, 采用光学速调管结构, 将可能成

为提高其增益和效率的一条有效途径。

- [1] S. Baccaro, F. Demartini and A. Ghigo, *Opt. Lett.*, **7**(4), (1982), 174.
- [2] P. Elleaume, *J. Phys. (Paris)C*, **1-44**, 333.
- [3] A. Gover, A. Friedman, *Proceedings of CLEO'89*, p.412.
- [4] V. Stagno, G. Brautti, T. Clauser and I. Boscolo, *Nuovo Cim.*, **56B**(1980), 219.
- [5] M.C. Wang, V.L. Granatstein, B. Levush, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **16**(1988), 172.
- [6] 相对论电子学, 刘盛纲, 科学出版社, (1987), 367 页.
- [7] 褚成、胡煜, 中国激光, **12**, (1985), 330.
- [8] 陆载通、张立芬、陈基忠, 王之江等, 光学学报, **9**(1989), 9.

STUDIES OF RAMAN FREE ELECTRON LASER BY AN OPTICAL KLYSTRON CONFIGURATION

CHEN JI-ZHONG WANG MING-CHANG WANG ZHI-JIANG LU ZAI-TONG
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai, 201800

(Received 27 November 1989)

ABSTRACT

A design of an over-all experiment of Raman free electron laser with an optical klystron configuration is put forward. The gain and efficiency improvement of free electron laser by an optical klystron configuration has been studied by one dimensional single-particle model.

PACC: 4255T; 4260