

# 具有等离子体背景的电磁泵浦 自由电子激光

刘永贵 钱宝良 李传胪

(国防科技大学应用物理系,长沙 410073)

(1994年3月8日收到)

用流体理论研究了等离子体背景对电磁泵浦自由电子激光的影响,得到了激光的色散关系式,求出了不稳定性增长率表达式。结果表明,等离子体背景的存在能够明显提高激光的增长率,从而说明在电磁泵浦自由电子激光器中加入等离子体背景具有现实意义。

PACC: 4255T

## 1 引言

目前许多高功率的相干辐射器件在加入等离子体背景后,其增益或效率都有明显的改善。例如 Kosai 等人在文献[1]中研究了等离子体背景对契伦柯夫自由电子激光的影响;而 Minami 等人在文献[2]中研究了充有等离子体的返波振荡器;与此同时,Pei 和 Chen<sup>[3]</sup>, Tripathi 和 Liu<sup>[4]</sup> 又先后研究了等离子体背景对静磁 Wiggler 自由电子激光的影响。他们的结果表明,加入等离子体背景对提高这些器件的增长率或效率都有很重要的意义。

电磁泵浦自由电子激光是当前许多学者在理论和实验上热心探讨和研究的课题之一<sup>[5-10]</sup>,其优点就在于有可能实现用中等能量的电子束获得短波长自由电子激光输出。我们小组于1989年也曾用动力学理论研究了引导场对这种自由电子激光的作用机制和增长率的影响<sup>[11]</sup>。但是以上所有电磁泵浦自由电子激光的研究都没有考虑加入等离子体背景,而且理论和实验都发现,当电磁泵浦自由电子激光向短波长发展时其增长率会变低。为了解决这一问题,本文试图在现有的电磁泵浦自由电子激光器中注入等离子体,并重点研究等离子体背景是否有助于提高这种自由电子激光器的增长率或效率。

## 2 基本公式

当一束平均密度为  $n_0$  的相对论电子以速度  $v_0 = v_0 \hat{z}$  通过电磁泵浦场

$$\mathbf{E}_i = \frac{i}{\sqrt{2}} \hat{z} - \frac{\omega_i B_i}{ck_i} \exp(i\phi_i) + \text{c.c.},$$

$$B_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \delta_{-} B_i \exp(i\phi_i) + \text{c.c.} \quad (1)$$

和平均密度为  $n_0$  的均匀等离子体背景时,由向后受激 Raman 散射机制,产生相干自由电子激光辐射

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{i}{\sqrt{2}} \delta_{+} \frac{\omega_s B_s}{ck_s} \exp(i\phi_s) + \text{c.c.}, \\ B_s &= \frac{1}{\sqrt{2}} \delta_{+} B_s \exp(i\phi_s) + \text{c.c.}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\phi_i = k_i z + \omega_i t$ ,  $\phi_s = k_s z - \omega_s t$ ,  $\delta_{\pm} = (\delta_x \pm i\delta_y)/\sqrt{2}$ , 而  $\omega_i$ ,  $k_i$  和  $\omega_s$ ,  $k_s$  分别表示泵浦场和激光场的角频率和波数, c.c. 表示相应量的复共轭部分. 在相互作用过程中,激光辐射、泵浦以及空间电荷波

$$E = E_0 \exp[i(kz - \omega t)] \delta_x \quad (3)$$

形成典型的三波相互作用过程,并满足如下相位匹配关系:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_s + \omega_i, \\ k &= k_s + k_i, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\omega$ ,  $k$  表示空间电荷波的角频率和波数.

我们用流体模型来处理自由电子激光的相互作用过程,并且假定背景等离子体的始态是空间均匀分布且离子不动,从电子束满足的连续性方程和运动方程可以求得束流密度的线性响应分量为

$$\begin{aligned} j_{bi} &= \frac{e^2 n_{b0}}{m\gamma_0 c k_i} B_i, \\ j_{bs} &= -\frac{e^2 n_{b0}}{m\gamma_0 c k_s} B_s, \\ j_{bE} &= -\frac{e^2 n_{b0} \omega}{im\gamma_0^3 (\omega - kv_0)^2} E \end{aligned} \quad (5)$$

以及非线性响应分量

$$\begin{aligned} j_{bi}^{NL} &= \frac{e^3 n_{b0}}{im^2 \gamma_0^2 c k_i} \frac{\left(k - \frac{v_0}{c^2} \omega\right)}{(\omega - kv_0)^2} E B_i^*, \\ j_{bs}^{NL} &= \frac{e^3 n_{b0} \omega}{m^2 \gamma_0^2 c^2 k_i k_s} \frac{\left(k - \frac{v_0}{c^2} \omega\right)}{(\omega - kv_0)^2} B_i \cdot B_s \delta_x, \end{aligned} \quad (6)$$

其中下标  $b_i$ ,  $b_s$  和  $bE$  分别表示电子束对泵浦场、激光辐射以及空间电荷波的响应分量.  $\gamma_0 = (1 - v_0^2/c^2)^{-1/2}$  表示电子相对论因子,  $c$  表示真空中的光速,  $-e$  和  $m$  分别表示电子的电荷值和静止质量.

同样,从背景等离子体所满足的连续性方程和运动方程也可以求得背景等离子体电流密度的线性响应分量

$$j_{oi} = \frac{e^2 n_{e0}}{mc k_i} B_i,$$

$$j_{ei}^L = -\frac{e^2 n_{e0}}{mck_i} B_i, \quad (7)$$

$$j_{eE}^L = -\frac{e^2 n_{e0}}{im\omega} E$$

和非线性响应分量

$$j_{ei}^{NL} = \frac{e^3 n_{e0} k}{im^2 c k_i \omega^2} E B_i^*, \quad (8)$$

$$j_{eE}^{NL} = \frac{e^3 n_{e0} k}{m^2 c^2 k_i k_r \omega} B_i \cdot B_r^*,$$

其中下标  $ei, es$  和  $eE$  分别表示背景等离子体对泵浦场、激光辐射以及空间电荷波的响应分量。

### 3 激光的色散关系式和增长率

当考虑电子束和背景等离子体的非线性响应分量时, 我们可以给出描述三波过程的耦合色散关系式。

将(5)–(8)式一起代入 Maxwell 方程, 可以求出

$$D(\omega_i, k_i) X(\omega, k) = \frac{Q_i^2}{2k_i^2} \left[ \frac{\omega_{pb}^2 \left( k - \frac{v_0 \omega}{c^2} \right)}{\gamma_0^2 (\omega - kv_0)^2} + \frac{\omega_{pe}^2 k}{\omega^2} \right]^2, \quad (9)$$

其中

$$D(\omega_i, k_i) = \omega_i^2 - c^2 k_i^2 - \omega_{pb}^2 / \gamma_0 - \omega_{pe}^2, \quad (10)$$

$$X(\omega, k) = 1 - \frac{\omega_{pb}^2}{\gamma_0^2 (\omega - kv_0)^2} - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}, \quad (11)$$

而  $Q_i = eB_i/mc$  是与泵浦场幅值有关的量, 且

$$\omega_{pb} = \left( \frac{4\pi e^2 n_{b0}}{m} \right)^{1/2}, \quad \omega_{pe} = \left( \frac{4\pi e^2 n_{e0}}{m} \right)^{1/2}.$$

(9)式便是我们要研究的激光的色散关系式, 在相互作用过程中, 激光辐射和空间电荷波将以共同的增长率增长。其中值得注意的是, 束-等离子体双流不稳定性将构成与自由电子激光不稳定性竞争的对象, 为了避开双流不稳定性, 在实验中可以把电子束与等离子体进行空间隔离<sup>[4]</sup>。这里假定  $\omega > \omega_{pe}$ , 则参与相互作用过程的电荷波的线性色散关系式为  $\omega - kv_0 = -\omega_{pb} / [\gamma_0^{3/2} (1 - \omega_{pe}^2 / \omega^2)^{1/2}]$ , 它是一支负能波, 于是由(9)式给出的激光的增长率表达式为

$$\Gamma = \text{Im}(\delta\omega_i) = \left[ \frac{Q_i^2 \omega_{pb}}{2\omega_i \gamma_0^{3/2}} \right]^{1/2} \frac{1 + (\gamma_0 - 1) \omega_{pe}^2 / \omega^2}{(1 - \omega_{pe}^2 / \omega^2)^{3/4}}, \quad (12)$$

其中  $\delta\omega_i$  表示相互作用过程引起的本征频率  $\omega_i$  的频移。(12)式是具有等离子体背景的 Raman 区电磁泵浦自由电子激光的增长率。从表达式可以看出, 它与背景等离子体密度密切相关。

## 4 结 论

用流体模型研究了充有等离子体的电磁泵浦自由电子激光的相互作用过程, 导出了 Raman 区不稳定性增长率表达式(12), 得出如下结论:

1. 当不存在等离子体时,  $n_0 = 0$  ( $\omega_{pe} = 0$ ), (12)式将转化为文献[7]和[11]中的结果, 因此, (12)式是一种推广了的结果。

2. 增长率随电子束的密度 ( $\omega_{be}^2 \propto n_{be}$ ) 和泵浦场的幅值 ( $Q_i \propto B_i$ ) 的增加而提高; 而当泵浦频率或电子束能量提高时, 增长率反而下降。这些结论与无等离子体背景的情况非常类似。

3. 从(12)式可以明显看出, 对于  $\omega > \omega_{pe}$ ,  $\Gamma(\omega_{pe} \neq 0) > \Gamma(\omega_{pe} = 0)$ , 亦即等离子体背景的存在可以提高激光的不稳定性增长率。特别重要的是, 背景等离子体密度越高, 增长率亦越高。

4. 从(12)式还可以看出, 当  $\omega_{pe}$  接近  $\omega$  时, 不稳定性增长率会大大提高。这对改善电磁泵浦自由电子激光的性能具有重要参考意义。

- [1] H. Kosai, E. P. Garate and A. Fisher, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **PS-18** (1990), 1002.
- [2] K. Minami *et al.*, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **PS-18** (1990), 537.
- [3] Weng-bing Pei and Ya-shen Chen, *Int. J. Electron.*, **65** (1988), 551.
- [4] V. K. Tripathi and C. S. Liu, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **PS-18** (1990), 466.
- [5] H. P. Freund and R. A. Keks, *Phys. Rev.*, **A34** (1986), 2007.
- [6] A. Goldring and L. Friedland, *Phys. Rev.*, **A32** (1985), 2879.
- [7] Yoonho Seo, *Phys. Fluids*, **B3** (1991), 797.
- [8] T. M. Tran *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23** (1987), 1578.
- [9] Y. Carmel *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **51** (1983), 566.
- [10] R. A. Keks *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **60** (1988), 279.
- [11] 钱宝良、刘永贵、李传庐, *光学学报*, **9**(1989), 225.

## ELECTROMAGNETICALLY PUMPED FREE-ELECTRON-LASER LOADED WITH A PLASMA

LIU YONG-GUI QIAN BAO-LIANG LI CHUAN-LU

(Department of Applied Physics, National University of Defense and Technology, Changsha 410073)

(Received 8 March 1994)

### ABSTRACT

The effects of background plasma in an electromagnetically pumped free-electron-laser are investigated. The dispersion relation is derived, and the growth rate is formulated for the Raman regime. The results show that the growth rate can be efficiently enhanced at a high plasma density, so the background plasma is significant for the realistic devices of electromagnetically pumped free-electron-laser.

PACC: 4255T