

自由电子激光中自发辐射光 脉冲的自干涉现象*

王昌标 刘盛纲
(成都电讯工程学院, 成都)

摘要 本文用格林函数法, 计算了螺旋磁场自由电子激光中单脉冲电子注的自发辐射; 结果表明, 电子注的有限长度会引起自发辐射光脉冲的自干涉现象。

关键词 自由电子激光; 自发辐射; 自干涉

1. 引言

自从第一个自由电子激光实验成功^[1]以来, 人们一直非常重视对自由电子激光基本性质的研究。在研究中, 相继发现了边带不稳定性^[2]和短脉冲效应^[3]。短脉冲效应指出, 当单个电子注脉冲长度内的自发辐射的中心光波长数接近互作用区内的磁场周期数时, 自发辐射谱线形将被强烈地修正, 对振荡器的光输出功率将有很大影响。

本文通过求解一维波动方程, 计算了螺旋磁场自由电子激光中单脉冲电子注的自发辐射。计算结果表明, 在自由电子激光的自发辐射中, 不但存在短脉冲效应, 而且还存在长脉冲效应。长脉冲效应指出, 当单个电子注脉冲长度内自发辐射的中心光波长数比互作用区内磁场周期数足够大时, 自发辐射谱线形将出现多峰现象。

分析表明, 自发辐射中的短脉冲效应和长脉冲效应都是由自发辐射光脉冲的自干涉引起的。当电子注脉冲长度太短时, 互作用区有限长度对频谱的展宽远小于电子注有限长度对频谱的展宽, 这时自干涉现象不明显; 当电子注的脉冲长度接近 $N\lambda$ (N 为互作用区内磁场周期数, λ 为中心光波长) 时, 互作用区有限长度对频谱的展宽和电子注有限长度对频谱的展宽互相竞争, 引起自发辐射谱线形的强烈修正, 开始呈现自干涉现象; 当电子注的脉冲长度远大于 $N\lambda$ 时, 互作用区有限长度对频谱的展宽远大于电子注有限长度对频谱的展宽, 这时自发辐射谱线形具有多个峰值, 呈现明显的自干涉现象。

2. 模型

假定问题是一维的。外加的螺旋磁场和脉冲电子注内的速度分布可表示为

$$\mathbf{B}_w = B_{w0}(\hat{x} \cos K_w z + \hat{y} \sin K_w z) \quad (1)$$

$$\mathbf{v} = -v_{w0}(\hat{x} \cos K_w z + \hat{y} \sin K_w z) + \hat{z} v_{z0} \quad (2)$$

式中 $K_w = 2\pi/\lambda_w$, $v_{w0} = B_{w0}|c|/(m_0\gamma_0 K_w)$, B_{w0} 是磁场振幅, v_{z0} 是 \hat{z} 方向的不变速度, λ_w

是磁场的不变空间周期, e 是电子电量, m_0 是电子的静止质量. 相对论因子 $\gamma_0 = (1 - \beta_{w0}^2 - \beta_{z0}^2)^{-1/2}$, $\beta_{w0} = v_{w0}/c$, $\beta_{z0} = v_{z0}/c$, c 是真空光速.

假定相互作用区长度为 L , 脉冲电子注从 $z = -L/2$ 处进入, $z = L/2$ 处离开, 电子注脉冲的空间长度为 l , 如图 1 所示.

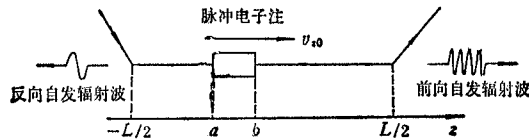


图 1 自由电子激光中的脉冲电子注

由于计算自发辐射时忽略辐射场对电子注的反作用, 因此我们认为电子注内的电荷密度 ρ_0 是不变的, 脉冲电子注的电流密度的空间分布可表示为

$$\left. \begin{aligned} J_x(z, t) &= -\rho_0 v_{w0} H(z, t) \cos K_w z \\ J_y(z, t) &= -\rho_0 v_{w0} H(z, t) \sin K_w z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} H(z, t) &= H(z + L/2)H(L/2 - z)H(z - a)H(b - z) \\ a &= -L/2 + v_{z0}t - l, \quad b = -L/2 + v_{z0}t \end{aligned}$$

$H(x)$ 是单位阶跃函数. 电子注的空间长度和位置完全被函数 $H(z, t)$ 所确定.

3. 自发辐射能谱

自发辐射场满足波动方程

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \left(\frac{n}{c} \right)^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] E_{x,y}(z, t) = \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} J_{x,y}(z, t) \quad (4)$$

式中 n 是介质折射率, μ_0 是真空中磁导率.

利用 Green 函数法, 方程(4)的解可表示为

$$E_{x,y}(z, t) = -\mu_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(z', t'; z, t) \frac{\partial}{\partial t'} J_{x,y}(z', t') dz' dt' \quad (5)$$

式中 Green 函数由下式给出:

$$\begin{aligned} G(z', t'; z, t) &= \frac{c}{2n} \left[H(z - z') H \left(t - t' - n \frac{z - z'}{c} \right) \right. \\ &\quad \left. + H(z' - z) H \left(t - t' - n \frac{z' - z}{c} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

对(5)式作 Fourier 变换并完成积分, 可以得到前向自发辐射波能谱, 即单位频率间隔内通过单位面积的能量

$$\frac{d^2 W}{d\sigma d\omega} = AM \left[\left(\frac{\sin u_+}{u_+} \right)^2 + \left(\frac{\sin u_-}{u_-} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} A &= (\rho_0 \beta_{w0} \beta_{z0} T)^2 c / (2\pi \epsilon_0 n K^2), \quad M = [\sin(Kl/2\beta_{z0})]^2 \\ u_+ &= (\omega_+ + \omega_0)T/2, \quad u_- = (\omega_+ - \omega_0)T/2 \end{aligned}$$

$$\omega_+ = (1 - n\beta_{z0})\omega, \quad \omega_0 = K\omega v_{z0}, \quad T = L/v_{z0}, \quad K = \omega/c,$$

ϵ_0 是真空中的电容率。

4. 物理结果

(7)式中的 M 是一脉冲调制因子。正是该因子,描述了自由电子激光中自发辐射光脉冲的自干涉现象。如图 2 所示,当电子注长度接近 $N\lambda$ 时,自干涉现象表现为短脉冲效应;当电子注长度为 $8N\lambda$ 时,自干涉现象表现为长脉冲效应。

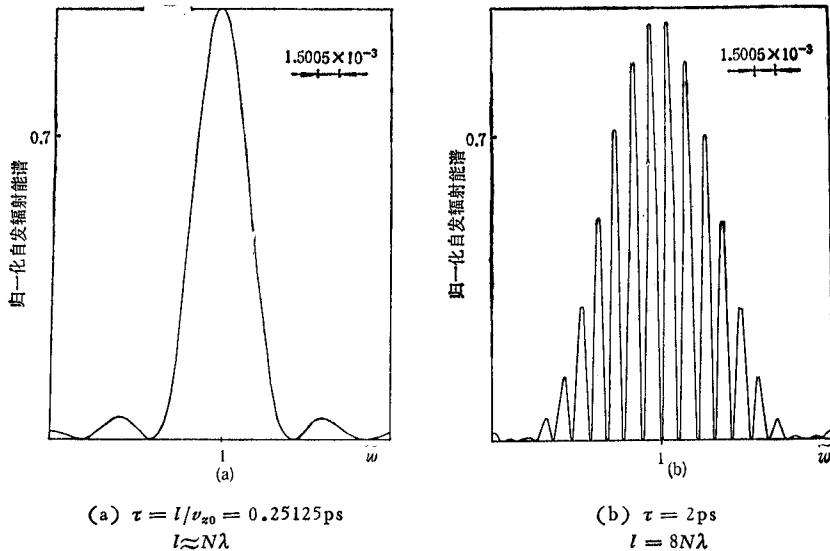


图 2 自发辐射能谱

计算参量: $n = 1, \gamma_0 = 131, \gamma_{z0} = 100, L = 1.5\text{m}, \lambda_w = 1.5\text{cm}, N = 100$

归一化角频率: $\tilde{\omega} = \omega(1 - \beta_{z0})/\omega_0$

根据 Madey 定理^[4],在小信号条件下,自由电子激光的增益谱和自发辐射能谱对电子初始能量的导数成比例。因此,长脉冲效应可以引起增益谱的多峰现象,这意味着不同频率的信号具有不同的增益,从而引起放大后的光脉冲的频谱结构和脉冲形状发生变化。

最后应该指出,对于太长的电子注脉冲,自干涉现象在实验上将难以观察到,这是因为振荡峰无限稠密的频谱又变成了连续谱。此外,对于质量太差的电子注,自干涉现象也将会消失。

参 考 文 献

- [1] L. R. Elias, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **31**(1976), 17.
- [2] N. M. Kroll, M. R. Rosenbluth, ONR Workshop on Free Electron Generators of Coherent Radiation, 2nd, Telluride, Colo., 1979, p. 147.
- [3] T. C. Marshall, *Free Electron Lasers*, Macmillan Publishing, 1985, p. 61.
- [4] J. M. J. Madey, *Nuovo Cimento*, **50B**(1979), 64.

SELF-INTERFERENCE OF SPONTANEOUS RADIATION IN FELs

Wang Cangbiao Liu Shenggang

(Chengdu Institute of Radio Engineering, Chengdu)

ABSTRACT Spontaneous radiation from a single pulse electron beam in a free electron laser (FEL) with a helical magnetic field is investigated by using Green's function. It is shown that there is self-interference caused by a finite length of the pulse beam.

KEY WORDS Free electron laser; Spontaneous radiation; Self-interference