

图3 蓝绿激光二极管光谱特性曲线 (a) 注入电流小于阈值电流; (b) 注入电流大于阈值电流; (c) 近峰值扩展曲线

激光器能够实现连续而不是脉冲工作, 则离开实用化的阶段将不会太远。普渡大学的微电子教授 Gunshor 认为, 如果这种激光器能在一年内发展成为一种实用化器件, 并在高技术电子学和商用电子产品中出现, 将不是十分意外的事情。

目前, 人们正以极大的热情关注着今后这一领域的进一步发展。

- [1] G. T. Forrest, *Laser Focus World*, 26-1(1990), 17.
- [2] M. A. Haase et al., *J. Appl. Phys.*, 67-1 (1990), 448.
- [3] J. Ren et al., *Appl. Phys. Lett.*, 57-18 (1990), 1909.
- [4] M. A. Haase et al., *Appl. Phys. Lett.*, 59-13(1991), 1272.

自由电子激光及其新近发展

杜祥琬 丁武

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

本文指出, 70年代中期出现的自由电子激光是一种完全新型的相干光源。它的一些特点是其他相干光源不可比拟的。正是由于这些特点, 人们从微波到软X射线的广阔谱区内已经开始和正在设计它的应用。本文在简述了自由电子激光的原理之后, 着重介绍了自由电子激光发展中的新思想, 正是这些和以后出现的新的思想, 使它日趋成熟、完善和富有生命力。

Abstract

The free-electron laser which appeared in the mid-seventies is a novel coherent light source with certain inherent properties that other coherent sources cannot match. Due to these properties its applications are now appearing in a broad spectrum region from microwave to soft X-ray wave lengths. After outlining the principle of the free-electron laser an introduction is given of the recent new ideas which demonstrate the maturity and vitality of the development of this laser.

一、自由电子激光的特点和应用

1971年 Madey 从理论上正式提出了自由电子激光(FEL)的概念^[1]。70年代中期 Madey 和他的合作者建立了第一个运行在红外波长的装置,演示了自由电子激光是可能的^[2,3]。从此自由电子激光的实验和理论迅速发展起来,每年举行一次国际会议,每两年出一次专辑。自由电子激光的出现比普通激光大约晚15年,它是一种完全新型的相干光源。它的一些特点是其他激光不可比拟的。自由电子激光的特点可以概括为以下几点:

(1) 高功率:由于不存在通常激光工作介质的“击穿”问题,它不仅可以达到高峰值功率,而且可以达到高平均功率。通过增加电子束的电流强度和摇摆(wiggle)场强可以提高峰值功率,利用准连续电子束可以达到高平均功率。

(2) 高效率:采用锥形(taper)摇摆器^[4]或其他方法,可以使从电子束提取能量的效率达到30%以上。

(3) 激光波长连续可调:其他激光的波长取决于允许跃迁的原子或分子的能级间隔。自由电子激光没有这个限制,而有多多个可调参数,使激光波长具有可调谐性。

(4) 光束质量可达衍射极限:由于没有通常的“工作介质”因温升而引起的光束质量下降,自由电子激光的光束发散角可达衍射极限。

(5) 光脉冲宽度和结构可以精确控制,可实现皮秒级的脉冲。

(6) 高度可靠性:因为器件的主要部件是

加速器和摇摆器。

由于上述特点,人们从微波到软X射线的广阔谱区内,已经和正在设计它的应用。它首先被考虑用在国防上,作为定向能武器的候选器件。它在医学、生物学、光谱学、非线性光学、物理学、化学、材料科学等领域的应用有良好前景^[5]。并且人们已经考虑把它用在工业上^[6],例如在半导体工艺中的薄膜沉积,平板印刷术,蚀刻,掺杂质等以及在核工程方面的应用等。

二、自由电子激光原理简述

原子或分子激光是通过粒子数反转,能级间跃迁产生的相干辐射,可以说原子或分子激光是束缚电子激光,与原子或分子激光不同,自由电子激光是利用从加速器出来的相对论电子束通过一个摇摆场而产生的相干辐射。辐射的物理机制是电子束在联合的摇摆场和辐射场中受到轴向群聚,这种轴向群聚的电子束产生的辐射是相干的,如图1所示。

下面给出自由电子激光的参数:

(1) 波长:由共振条件(有质波的相速度与电子束的纵向速度分量接近相等),可以导出自由电子激光的波长:

$$\lambda_s = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} (1 + a_w^2), \quad (1)$$

其中 λ_s 是激光波长; $\lambda_w, a_w = eB_w\lambda_w/(2\pi mc)$ 和 B_w 分别是摇摆场的周期、无量纲和有量纲场强; e, m 和 γ 分别是电子的电荷、质量和相对论因子; c 是光速。

1) C.Yamanaka, Nucl. Instr. Meth., (1992), (待发表).

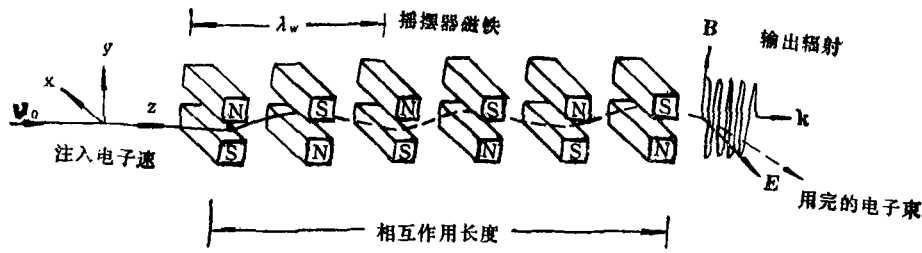


图 1 一种典型的应用绕极化摇摆场的 FEL 放大器构型

(2) 增益: 单位长度增益

$$g = \frac{1}{L} \ln \frac{|a_s(L)|^2}{|a_s(0)|^2}, \quad (2)$$

其中 L 是增益区的长度, $a_s = eE_s \lambda_s / (2\pi mc)$ 和 E_s 分别是辐射场无量纲和有量纲复数场强。

对于低增益,

$$g = -\frac{1}{2} \frac{(g_0 L)^3}{L} F_L^2 \frac{d}{d\theta} \left(\frac{\sin^2 \theta}{\theta^2} \right), \quad (3)$$

$$g_0 = \left(\frac{\omega_b^2 a_w^2 k_w}{2c^2 \gamma_0^3} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

$$\theta = \frac{L}{2} \Delta k_s, \quad (5)$$

$$\Delta k_s = k_w - k_s \left(\frac{1}{\beta_{||}^{(0)}} - 1 \right), \quad (6)$$

此处 $\beta_{||}^{(0)}$, $\omega_b^2 = n_0 e^2 / (\epsilon m)$, n_0 和 ϵ 分别是电子束初始纵向速度分量, 等离子体频率, 单位体积电子数和介电常数; $k_w = 2\pi/\lambda_w$ 和 $k_s = 2\pi/\lambda_s$ 分别是摇摆场和光场的波数; Δk_s 和 F_L 分别是电子和光场的相互作用失谐参数和耦合因子。

对于高增益,

$$g = \sqrt{3} g_0 F_L^{2/3} \left[1 - \left(\frac{\Delta k_s}{3g_0 F_L^{2/3}} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

利用(4)式, 可以求出

$$g_0 = 2.71 \times 10^{-2} \left[\frac{\lambda_s(M)}{\gamma_0} \right]^{1/3} \times \left[\frac{I(A)}{S_b(M^2)} \right]^{1/3} \frac{B_w^{2/3}(T)}{(1 + a_w^2)^{1/3}} \times (M^{-1}), \quad (8)$$

其中 S_b 是电子束横截面积。

(3) 效率: 利用锥形摇摆器, 在冷束假设下, 电子束能量被提取的效率几乎与锥形坡

度(共振能量的相对变化)相等, 即

$$\eta \approx \frac{\Delta \gamma_r}{\gamma_r}, \quad (9)$$

所以锥形坡度能设计到多少, 效率就可以达到多高。

(4) 线宽: 这里主要给出自由电子激光共振腔中谱线宽度, 它与自由电子激光的饱和特征紧密相关^[6]。

对于由存储环驱动的自由电子激光, 线宽为

$$\frac{\Delta \omega_s}{\omega_s} = \left[\frac{1}{2N} \frac{\lambda_s}{4\pi l_b} \right]^{1/2}, \quad (10)$$

即它是增益带宽 $1/2N$ 和变换极限线宽 $\lambda_s/4\pi l_b$ 的几何平均。此处 N 是摇摆场周期数, l_b 是电子束脉冲的均方根群聚长度。

对于直线加速器驱动的自由电子激光, 线宽为

$$\frac{\Delta \omega_s}{\omega_s} = \frac{\lambda_s}{4\pi l_b}, \quad (11)$$

即线宽只由变换极限确定。

对于直流电子束情况, 线宽为

$$\left(\frac{\Delta \omega_s}{\omega_s} \right)_{\text{FWHM}} = \frac{1}{2N} \frac{2\pi \Delta S}{P_{\text{gen}}}, \quad (12)$$

$$\Delta S = \int \frac{dS}{d\omega} d\omega, \quad (13)$$

$$P_{\text{gen}} = a P_s, \quad (14)$$

其中 ΔS 是总自发辐射功率, a 是光在共振腔中来回一次的总损失, P_s 是饱和功率。一般情况下, $2\pi \Delta S / P_{\text{gen}} = 10^{-6}$, 即直流电子束激光线宽比增益带宽 $1/2N$ 小 10^{-6} 倍, 但它需要较长时间(例如 10m 长的光腔需要一天)才能达到。

三、自由电子激光发展中的新思想

自由电子激光在 70 年代初作为一种新型激光出现后,在新颖而丰富的新物理思想推动下,不断得到发展和改进。首先提出的是变参数摇摆器^[4],以后有预群聚 FEL^[7]和载气 FEL^[8]等。目前自由电子激光在以下几个方面孕育着新的思想,正是这些和以后出现的新的思想使它日趋成熟、完善和富有生命力。

1. 自由电子激光装置的小型化

为了满足广大用户对自由电子激光装置的要求(尺寸小、简单和便宜)和提高自由电子激光与其他激光的竞争能力,自由电子激光装置必须小型化,现在已经提出了两种途径。

(1) 高次谐波放大

这种途径既缩短了波长又不增加电子束能量,即不增大加速器,从而相对地使装置小型化。目前已提出两种方法:(a) 对于短波长,需要两个摇摆器,或者利用光速调管构型产生超辐射,调节第二个摇摆器参数,使与超辐射中的高次谐波共振放大;或者利用较长波长的放大器 FEL 在指数增长区产生的高次谐波,调节第二个摇摆器的参数使其共振放大。(b) 对于长波长,激发波导管中的高阶横模。

(2) 提高单位长度的增益

由(1)和(8)式我们发现,对于给定的激光波长 λ_s ,为了提高 g_0 ,必须增加电子束的电流强度、摇摆器的场强和减小电子束的横截面积及摇摆器的周期。

电子束的参数除了能量 γ_0 (以 m_0c^2 为单位)、流强 I 和束半径 r_0 以外,还有束质量(包括能散度 $\Delta\gamma$ 和发射度 s_n),由此引出电子束亮度 B_n 的定义: $B_n = 2I/\pi s_n^2$ 。自由电子激光的增益是电子束亮度的增加函数。

由此我们得到,自由电子激光装置的小型化取决于两项技术进步:

(a) 产生高亮度和高电流密度的电子束直线加速器:目前具有光阴极的射频加速器可以实现这个目标。光阴极的亮度可达 $10^{12}\text{A}/\text{m}^2$ 。

rad²。

(b) 短周期和高场强摇摆器:这是提高 g_0 的最有效的途径。现在美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的微型摇摆器已经做到 $\lambda_w = 3 \times 10^{-3}\text{m}$, $B_w = 2\text{T}$, 预期可达到 $\lambda_w = 3 \times 10^{-3}\text{m}$, $B_w = 5\text{T}$ ^[1]。

2. 向短波长(紫外和软 X 射线谱区)方向发展

目前正在进行两种探索:

(1) 存储环光速调管 FEL

已出现三种方法:第一种如前所述,是利用预群聚产生的超辐射,调节第二个摇摆器的参数,使其与高次谐波共振放大;第二种是直接利用预群聚产生的超辐射;第三种是利用光速调管构型自发辐射放大。

(2) 两阶段 FEL

第一阶段是利用静磁场作泵浦源,第二阶段是利用第一阶段产生的自由电子激光作泵浦源。在这种构型中,第一阶段输出激光波长与电子束相对论因子的平方成反比减小,第二阶段输出激光波长与电子束相对论因子的四次方成反比减小。最近提出的新想法²⁾是由静电加速器产生高质量电子束和用波导管缩小第二阶段泵浦波的面积增加其强度。初步理论设计结果是: $E = 16\text{MeV}$, $I = 5\text{A}$, 激光波长 $\lambda_s = 100\text{--}500\text{\AA}$, 平均功率 $\bar{P} \approx 1\text{kW}$ 。

3. 降低对电子束质量的要求

(1) ρ 冷却技术^[9]

ρ 是 Pierce 参数,定义为

$$\rho = \frac{1}{\gamma_0} \left(\frac{a_w \omega_p}{4 ck_w} \right)^{2/3},$$

是基本的 FEL 参数。采用两个摇摆器 FEL 方案,当在第一个摇摆器中 FEL 运行到指数增长区产生相干谐波时,调节第二个摇摆器参数,使其不仅与某个高次谐波共振,而且使 ρ 增大,导致在第二个摇摆器中电子束有效能散度 $\Delta\gamma/\rho\gamma$ 减小。

(2) 射频束调节器³⁾

- 1) R. W. Warren, Nucl. Instr. Meth., (1992), (待发表).
- 2) L. R. Elias, Nucl. Instr. Meth., (1992), (待发表).
- 3) A. M. Sessler et al., Nucl. Instr. Meth., (1992), (待发表).

在加速器和激光器之间放一个装置,这个装置由聚焦的 FODO (为凸凹两种透镜中间隔以自由漂移段)通道和运行在 TM_{210} 模的合适位相的射频腔构成。利用 TM_{210} 模调节电子束,使束中粒子都具有相同的纵向速度,从而消除对电子束发射度的限制。

4. 扩大调谐范围

在自由空间中,自由电子激光各次谐波的波长由下式给出:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_w}{n2\gamma^2} (1 + a_w^2). \quad (15)$$

所以利用电子束能量,摇摆器的周期和场强及谐波的阶数可以调谐波长。

在波导管中,自由电子激光波长由下面公式给出,当 $\lambda_c/\lambda_w \ll 1$ 时,

$$\lambda_n = \frac{\lambda_c^2}{\beta_{||}^{(0)} \lambda_w} \left[1 \pm \beta_{||}^{(0)} \left(1 - \frac{\lambda_w^2 a_w^2}{\beta_{||}^{(0)2} \gamma^2 \lambda_c^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (16)$$

其中 λ_c 为截断波长。对于矩形波导的 TE_{01} 模, $\lambda_c = 2b$, b 是矩形波导管两个横向尺寸中较小的一个。所以除了用电子束能量、摇摆场周期,还可用波导管横向尺寸来调谐波长。

5. 发展远红外 FEL, 填补空白

远红外激光在材料科学、生物学和医学等方面有很多应用。由于在远红外谱区(波长 $\lambda_c = 100-1000 \mu\text{m}$),电子束能量不太高,对电子束质量要求适中(发射度与波长成正比),因此装置可以做得小而且便宜,并且在这个谱区很少有其他高亮度相干光源,因此发展远红外 FEL 可以填补空白。由于波长较长,光束的衍射效应和光束与电子束之间的滑移效应都较为严重。解决的办法是采用波导管。用调节波导管横向尺寸,不仅可以减小光束的横向面积,而且可以使光束与电子束之间没有滑移。

6. 提高 FEL 的效率

提高 FEL 效率的办法除了采用锥形摇摆器以外,还提出用微波场在 FEL 相互作用区对电子束加速,使其继续保持与光共振来提高效率^[10]。这种办法与锥形摇摆器相比,没有牺牲小信号增益的缺点,但它需要一个附加的微波源。此外,不久前由于一个偶然的发现引

导场反向^[11]可以提高效率。

7. 自由电子激光理论的新发展

在用经典理论解析地研究自由电子激光过程中已发展了单粒子方法^[12,13]和动力学方法^[13]。单粒子方法还被广泛地应用在数值模拟上。最近于敏教授提出了一种新方法^[14],这种方法具有两个明显的特点:一是统一性,它可以描述自由电子激光各种纵模的物理机制;二是物理概念明晰。新方法认为,自由电子激光产生的物理机制——电子束被轴向群聚,是电子在由光场与摇摆场构成的有质势阱中的位相被调制。这种调制是通过改变电子的纵向速度分量来实现的。我们利用这种方法已经研究了预群聚^[15]、自群聚和伴群聚产生的各种受激辐射和超辐射,还研究了锁模^[16]和模的竞争与饱和^[17]等,证明它是解析地研究自由电子激光物理的一种强有力的手段。

此外,用于自由电子激光的加速器物理和技术也不断有所创新。光阴极的问世使射频加速器跃居优势地位,最近又提出了场效应控制的阴极的思想,其亮度有可能与光阴极媲美。

- [1] J. M. J. Madey, *J. Appl. Phys.*, **42** (1971), 1906.
- [2] L. R. Elias et al., *Phys. Rev. Lett.*, **36** (1976), 717.
- [3] D. A. G. Deacon et al., *Phys. Rev. Lett.*, **38** (1977) 892.
- [4] N. M. Kvoll et al., *IEEE J. Quan. Elect.*, **QE-17-8** (1981), 1436.
- [5] Kwang-Je Kim et al., *Science*, **250** (1990), 88.
- [6] Kwang-Je Kim, *Phys. Rev. Lett.*, **66-21** (1991), 2746.
- [7] D. B. Mc Dermott et al., *Int. J. Electron.*, **64** (1988).
- [8] A. S. Fisher et al., *Nucl. Instr. Meth. A*, **272** (1988), 89.
- [9] R. Bonifacio, *Opt. Comm.*, **81-5** (1991), 311.
- [10] A. H. Ho et al., *IEEE J. Quan. Elect.*, **QE-23-9** (1987), 1545.
- [11] M. E. Cende et al., *Phys. Rev. Lett.*, **67-22** (1991), 3082.
- [12] W. B. Colson, *Phys. Lett. A*, **64** (1977), 190.
- [13] P. Sprangle et al., *Phys. Rev. A*, **21-1** (1980), 293.
- [14] 于敏, 强激光与粒子束, **3-2** (1991), 127.
- [15] 丁武, 强激光与粒子束, **3-2** (1991), 179.
- [16] 丁武, 杜祥琬, 强激光与粒子束, **4-1** (1992), 47.
- [17] 丁武, 强激光与粒子束, **3-4** (1991), 421.