

自由电子激光器的一些改进方案*

陈建芳 王明常

(中国科学院上海光学精密机械研究所强激光光学开放研究实验室, 上海, 201800)

摘要: 自由电子激光器(FEL)能否充分发挥其优异特性而走向实用, 最终将取决于器件能否小型化。作者对现有喇曼自由电子激光器的控制系统及加速器部分进行了改进, 使其体积大为减小, 并对小型化 FEL 的设想进行了总体布局。

关键词: 控制系统 虚火花放电 Marx 发生器 小型化

Some improvement projects of free electron laser

Chen Jianfang, Wang Mingchang

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai, 201800)

Abstract: Whether the excellent properties of free electron laser can be brought into practice, it would ultimately depend upon the fact that the laser could be made compact. This paper proposed a improved and small scale control system and accelerator for FEL, and introduced the compact Raman FEL. In control system, a new designed three-channel time delay trigger utilized to trigger Marx generator to produce a high voltage pulse. The electron beam source is a key component in our system. We employed a pseudospark discharge device to substitute the diode. The device can obtain 10kA discharge current and current pulse half-width of 640ns at 300kV discharge voltage, the electron beam flow can achieve greater than 1kA.

Key words: control system pseudospark discharge Marx generator compact free electron laser

引 言

自由电子激光所具有的可宽带调谐、高功率等优异特性决定了它在医学、军事、科学研究及工业生产等各方面将具有十分广阔的应用前景。然而自由电子激光器的应用前景最终将取决于器件能否小型化, 现有的体积庞大、造价高昂的激光装置极大地限制了其使用范围。因而, 目前国际上研究自由电子激光器的热点已转向小型化和短波长两个方面。研制紧凑、实用的自由电子激光器装置则成为当前这一领域的工作重点。美国 Los Alamos 实验室于 1993 年首次实验成功的先进自由电子激光器(AFEL)就是为 FEL 向着小型化方向发展而研制的^[1]。它采用光阴极微波电子枪、高梯度驻波加速器、小周期永磁摇摆器以及紧凑型束流输运等先进技术, 综合为一台装置, 运行在 4~6 μm 波段, 输出峰值功率 10MW, 光阴极电子枪的亮度高达 $2 \times 10^{12} \text{A/m}^2 \text{rad}^2$, 实现了高质低能(17MeV)电子束产生中红外自由电子激光, 且整个装置占有较小的空间。从而使 FEL 向小型化和实际应用迈进了一大步。

上海光机所的毫米波喇曼自由电子激光器也正在进行小型化方面的尝试。可通过以下几

* 国家自然科学基金资助, 基金号 69337010。

种方法实现 FEL 的小型化: (1) 加速器小型化; (2) 控制系统小型化; (3) 采用小周期波荡器; (4) 利用高次谐波。虚火花放电电子束源和 $\lambda_w = 10\text{mm}$ 的双绕螺旋片小周期波荡器^[2] 的成功研制都是使 FEL 向小型化实用化方向发展的重要途径。但是加速器部分和控制系统的体积仍然很大, 阻碍了小型化的实现。必须对这两部分进行改进, 使其体积彻底减小, 才能真正实现小型化喇曼 FEL 的设想。

1 FEL 控制系统的改进

控制系统是整个激光器装置各部分协调运转的关键所在, 它主要由控制台和触发系统两大部分组成。上海光机所 FEL 实验室现有的两个控制台体积很大, 一台用于控制 Marx 发生器的电容电压的调节和加热电炉及水冷系统, 另一台则用于控制 wiggler 场和导引磁场的电容充、放电。触发系统由同步器、双路触发器、高压脉冲发生器及二次触发装置等组成, 连线繁杂。可见这套控制系统体积庞大、设备陈旧, 且各个控制部分较为分散、紊乱, 很难与小型化自由电子激光装置相匹配。因而有必要对其进行改进, 设计出一套新的控制系统, 以最终完善自由电子激光器的小型化。

新设计的控制系统由控制台、三路延时控制器及充放电电容等组成。其主要功能如下: (1) 控制 Marx 发生器及整个加速器工作; (2) 控制 wiggler 的电容充、放电; (3) 控制导引磁场的电容充、放电。该套控制系统外形小巧, 且移动灵活, 连线简洁, 操作起来也更加简便。

控制台是控制系统的一个重要组成部分, 整个实验程序都是由操作员在控制台上进行的。为了防止高电压宽脉冲加上时多隙虚火花放电室(低气压室)产生室外闪络, 必须把虚火花放电室安装在高真空室内。以前是采用由 $2 \times Z-8$ 型高速旋片式真空泵和 KY-9 型油扩散泵组成的复合真空扩散泵将真空室内气压抽到低于 $3 \times 10^{-3} \text{Pa}$, 抽一次高真空所需时间较长, 且要通过控制台来控制扩散泵和电炉加热及水冷系统, 使操作过程较繁杂。对此, 我们进行了改进, 去掉复合真空扩散泵, 将变压器油作为绝缘介质充满原来的高真空室, 以使各电极间保持绝缘。该变压器油经过真空滤油处理, 绝缘强度达到 25kV/mm 。实验结果表明, 真空室内的绝缘性能有了进一步提高并能在长时间内保持稳定。由此, 控制台不必再设置启动和停止机械泵、扩散泵电炉及冷却水的功能键, 使操作过程大为简化, 且实验的连续性和灵活性得到很大改善。

我们重新设计了一个新的控制台以取代原来的两个体积庞大的控制台, 并将其功能合二为一。该控制台总体体积只有原来的 $1/3 \sim 1/4$ 大小, 具备功能为: (1) 给 Marx 发生器调节直流高压, 使电容器充电到所需高压; 2. 控制小周期 wiggler 及导引磁场设备的电压调节和电容充、放电; 3. 控制三路延时触发系统, 使之依次触发导引磁场、wiggler 及 Marx 发生器, 并最终产生激光。

一个三路延时控制器将取代原有的同步器、双路触发器、高压脉冲发生器及二次触发装置等设备而作为触发系统, 依次输出三路脉冲, 其中第一路脉冲(脉冲 1)用于触发引燃管以产生导引磁场; 第二路脉冲(脉冲 2)用于触发引燃管以产生波荡磁场; 第三路脉冲(脉冲 3)用于触发 Marx 发生器的球隙以产生高压脉冲, 再通过虚火花放电装置产生强流电子束。这样, 整个触发系统的体积将减小, 且连线简洁, 操作方便。改进以前的触发系统示意图见

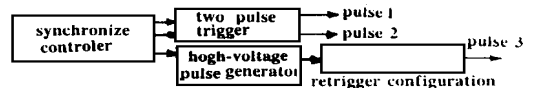


Fig. 1 The former pulse control system

图 1。

三路延时控制器的一路脉冲(脉冲 3) 直接去触发 Marx 发生器球隙。另两路脉冲分别去触发两个触发管, 使电容器组对线圈放电以产生 wiggler 场和导引磁场。wiggler 场的形成电路见图 2。该图中的电容器组由 36 只电容量为 200μF 的脉冲电容器并联而成, 以取代原来的 48 只 150μF 的电容器组, 由此, 可使其总体积减少到原来的 1/10 左右。该电容器组先由桥式整流后的直流高压充电到 U_0 , 一只微安表用于测量电容器组的充电电压大小。当用三路延时触发器的第二路脉冲(脉冲 2) 去触发引燃管后, 连接 wiggler 的回路导通, 36 只并联电容器组对一只一端相互连接的双绕螺旋线圈(小周期 wiggler) 放电, 于是两组螺旋线内产生方向相反的巨大电流 I , 从而在螺旋管内将产生作为泵浦源的周期性横向波荡磁场。轴线上横向磁场幅值可表示为^[2]:

$$B_w = \frac{8\pi I}{10\lambda_w} \left[\frac{2\pi r}{\lambda_w} K_0\left(\frac{2\pi r}{\lambda_w}\right) - K_1\left(\frac{2\pi r}{\lambda_w}\right) \right] \quad (1)$$

式中, K_0, K_1 分别为零阶和一阶贝塞耳函数。 λ_w 为波荡器周期, r 为双绕螺旋线的半径。最后, 通过控制继电器 J_2 使电容器上剩余的电荷通过电阻 R_{11} 放掉, 以保证实验室的安全。

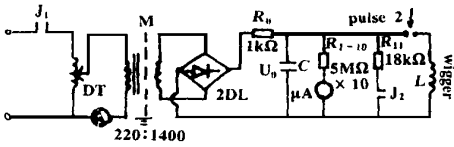


Fig. 2 Diagram of control circuit of wiggler

对三路脉冲之间的延时估算为: 根据图 2 可列出电容器组对 wiggler 线圈放电回路方程

$$U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad (2)$$

由(2)式推算出该放电电流为非周期性脉冲电流:

$$i(t) = (U_0/L) t e^{-t/\sqrt{LC}} \quad (3)$$

双绕螺旋线圈的电感 $L = 6\mu H$, $R = 0.058\Omega$, $C = 7200\mu F$, 则 $\alpha = (R/2) \sqrt{C/L} = 1$ 。

电流达到峰值的时刻为 $t_m = \sqrt{LC} \approx 0.2ms$,

又由 $i(t) = 0$, 可得 $t = 1ms$ 。

电流幅值 $I_m = U_0 \sqrt{C/L} e^{-1} \approx 12.7 U_0$ (4)

导引磁场是通过一组电容器向一只单绕螺旋线圈放电而产生的, 其控制电路原理与图 2 大致相同。导引场线圈的电感为 2.2mH, 电阻 0.135Ω。电容器组由 96 只电容量为 150μF 的脉冲电容器并联而成。通过计算得出 $\alpha = (R/2) \sqrt{C/L} < 1$ 。此时, 放电电流为衰减的周期性振荡电流:

$$i(t) = \frac{U}{\sqrt{1-\alpha^2}} \sqrt{C/L} e^{-\alpha t/\sqrt{LC}} \sin\left(\sqrt{1-\alpha^2} \cdot \frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad (5)$$

电流达到第一个峰值的时间为 $t_m = (\sqrt{LC}/\sqrt{1-\alpha^2}) \text{tg}^{-1}(\sqrt{1-\alpha^2}/\alpha) \approx 8ms$ (6)

令 $i(t) = 0$, 代入(5)式得出放电电流达到第一个零值的时间为 $t_1 = 18ms$ 。由(4)式和(5)式看出, 通过调节充电电压 U_0 可以改变 wiggler 及导引磁场的大小。

由第三路脉冲触发 Marx 发生器到产生强流电子束所需时间只有几个微秒, 它与以上计算出的毫秒量级的时间相比, 几乎可以忽略不计。由此可确定当脉冲 1 与脉冲 2 之间的延时 T_1 约为 8ms, 脉冲 2 与脉冲 3 之间的延时 T_2 约为 0.2ms 时, 电子束正好经过漂移管, 且此时导引磁场与波荡磁场均达最大值。我们设计符合以上要求的三路延时控制器, 依次输出三路脉冲, 并使 T_1 (脉冲 1, 2 之间的延时) 在小于 18ms 的时间范围内连续可调, T_2 (脉冲 2, 3 之间的延时) 在小于 1ms 的时间范围内连续可调。在实验中通过调试找到 T_1, T_2 的最佳值后, 再调节电容器组的充电电压来改变波荡器磁场和导引磁场强度, 并选取适当的数值, 则可获得自

由电子激光器的最佳工作点,以期获得最大输出功率的自由电子激光。

2 电子加速器改进

自由电子激光装置能否出光,或装置运行质量的好坏,主要取决于电子加速器的运行质量和电子束的质量。目前运行的自由电子激光装置不仅造价昂贵,而且体积庞大,而加速器则是其主要部分,显然,这对自由电子激光的推广应用很不利。因此,探索加速器的小型化是我们主要研究任务之一。

传统的喇曼 FEL 采用的是脉冲线型电子加速器,它由 Marx 发生器、脉冲形成线及二极管等组成。图 3 给出了脉冲线型电子加速器的原理示意图。为了实现加速器的小型化,以下我们将对其各组成部分进行如下改进。

2.1 Marx 发生器的改进

Marx 发生器既是加速器的储能装置,也是前级脉冲高压电源。先由高压直流电源通过水电阻对 Marx 发生器的 n 个电容并联充电到 V_0 ,然后,触发火花间隙开关使多个电容器串联放电,从而可产生 nV_0 的输出电压。Marx 发生器中的开关是固定尺寸的充气(SF_6)火花间隙,其工作范围通过改变气体压力调节。利用 Marx 发生器可产生脉宽为微秒、幅值达几十万伏的高压脉冲。

现有的 Marx 发生器由 10 级电容组成,每级能提供的最电压为 100kV,电容为 0.12 μF ,总电容容量 $C_m = 12\text{nF}$,回路电感 $L_m = 5\mu\text{H}$ 。整个 Marx 发生器长约 2.3m,采用真空注油工艺,密封浸渍在耐压 35kV 以上的变压器油中,以免闪络。它在加速器中占有较大体积,因而必须对其进行改进。新设计的 Marx 发生器由 5 个 0.3 μF 的电容组成,每个电容器的尺寸减小到原来的 1/2,标称储能 0.75kJ,最高运行电压 450kV,整个油箱的体积减小至原来的 1/4 左右。这对于加速器的小型化是很有利的。

2.2 电子束源的改进

自由电子激光要求加速器提供相对论电子束,并在符合规定质量的前提下要求它具有一定的束流强度,而标志电子束质量的重要参数是电子束亮度。在小型化 FEL 的研制中,我们将用虚火花放电装置取代二极管而成为新的电子束源。

虚火花放电,是在轴对称虚火花放电室(PSC)中发生的高电压(10kV~1MV)、低气压(1Pa~100Pa)的气体放电现象,可以产生强电流密度、高亮度、低发射度的磁自箍缩的电子束。其结构如图 4 所示。美国马 里兰大学^[3]和上海光机所^[4]相继研制出虚火花电子束源,采用脉冲线加速器驱动虚火花放电获得了能量达 200kV,束流为 2kA 的强流电子束。上海光机所的虚火花放电装置最近在 300kV 的放电电压下获得高达 10kA 的高亮度电子束流,且较稳定,由此使电子束质量得到进一步提高。虚火花放电室的寿命也达到 100 炮以上。

虚火花放电装置产生的电子束亮度可与光阴极电子枪相比拟,且结构简单、造价低廉,

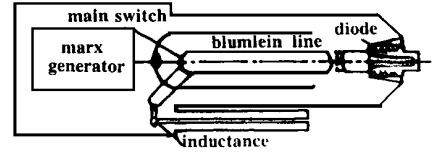


Fig. 3 The schematic diagram of pulse line electron accelerator

Table 1 Comparison of electron beam properties between pseudospark and diode

beam parameter	pseudospark	diode
voltage (kV)	200	400
current(A)	2000	800
diameter(mm)	1	6
emittance(mm mrad)	48	> 300
brightness($\text{A}/(\text{m}^2\text{rad}^2)$)	3×10^{11}	$< 10^9$

不需要高真空度,使用寿命也很长。从表 1 可看出,虚火花产生的电子束的质量比冷阴极产生的好得多,在小于原二极管正常工作电压情况下,束流强度高一个量级,束斑减小 1/6,束流密度提高 2 个数量级,发射度低 1 个数量级,且亮度极高。不用引导场,即可在低压中性气体中传输 20cm,全部束特性都出现数量级上的提高,显然有利于大幅度提高效率,发展短波长、小型化喇曼自由电子激光器。

2.3 虚火花放电高压电源的改进

Blumlein 脉冲形成线也是 FEL 电子加速器中体积较大的一部分。它长约 1.6m,内外筒之间充满电阻率大于 $1\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 的去离子水。实验与计算模拟都表明:虚火花整个放电过程的持续时间约为 $1\mu\text{s}$ 。于是由 Blumlein 脉冲线输出的曾用于驱动冷阴极二极管且脉宽为 60ns 的脉冲电压便不足以驱动虚火花放电,必须使驱动电压的脉宽加大。改进后的脉冲形成线输出脉冲较宽,但它不再压缩 Marx 发生器的输出脉冲,而只是用作一条水同轴电缆。为此,我们对虚火花放电高压电源进行改进^[2],去除在整个装置中占有较大体积的脉冲形成线,让虚火花一端直接与 Marx 发生器相接,使 Marx 发生器输出的脉宽宽于 $1\mu\text{s}$ 的高的脉冲电压经触发放电后直接加到多隙虚火花放电室,驱动虚火花放电以产生强流电子束。这样,加速器的体积将大为减小。理论计算结果表明:虚火花放电高压电源改进后,当 Marx 发生器输出峰值电压 V_m 为 300kV 时,虚火花开关放电电流最大可达 10kA,电流脉冲半高宽为 640ns,电子束流可达 1kA 以上。

3 小 结

通过以上对控制系统及电子加速器的一些改进,我们将着手研制一台小型化喇曼自由电子激光器,它由新 Marx 发生器、虚火花放电电子束源、小周期波荡器及控制系统等部分组成,见图 5。其外形尺寸将只有传统喇曼 FEL 的 1/4~ 1/5 大小。

在毫米波段, FEL 是唯一有效的强相干信号源,在受控核聚变、毫米波激光雷达、反隐形军事目标和激光致盲等研究中具有不可替代的重要应用价值。而小型化喇曼 FEL 的建成则将使毫米及亚毫米波自由电子激光器逐步走向实用化,这对于毫米波技术的广泛应用是很有意义的。

参 考 文 献

- 1 杜祥瑞,丁 武,董志伟. 强激光与粒子束, 1995; 7(1): 1~ 9
- 2 Feng B B, Wang M Ch, Wang Zh J. Rev Sci Instr, 1992; 63(8): 3849~ 3851
- 3 Destler W W, Segalov Z, Rodgers Jet al. A P L, 1993; 62(15): 1739~ 1741
- 4 Wang M Ch, Zhu J B, Wang Zh Jet al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1995; A358: 38~ 39
- 5 陈建芳,王明常,张立芬 et al. 中国激光, 1997; A24(6): 501~ 504

作者简介:陈建芳,女,1973年4月出生。硕士。现主要从事自由电子激光器件方面的研究。

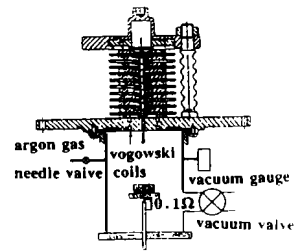


Fig. 4 Configuration of the pseudospark discharge

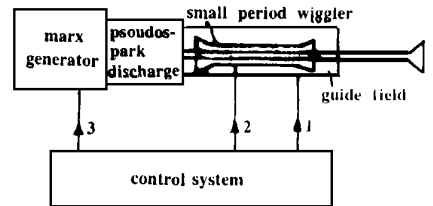


Fig. 5 General structure diagram of compact Raman FEL