

# 台式拉曼自由电子激光器建议\*

王明常 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 提出台式拉曼自由电子激光器的建议, 新型台式拉曼自由电子激光器由马克斯(Marx)发生器、虚火花放电电子束源和小周期波荡器等部分组成。外形尺寸将为传统的拉曼自由电子激光器的1/4至1/5。

**关键词** 小型化, 拉曼自由电子激光器, 虚火花放电。

## 1 引 言

高功率毫米波和亚毫米波广泛应用于通讯、雷达和等离子体加热等领域。在可控热核聚变中用于加热磁约束等离子体, 在脉冲时间3秒内需要平均功率20 MW, 拉曼自由电子激光是主要候选者之一<sup>[1]</sup>。应用于加热等离子体的高功率自由电子激光, 功率为1~5 MW, 波长为2 mm(荷兰FOM大学); 用于材料处理, 功率为1~5 kW, 波长为8~20  $\mu\text{m}$ ; 用于向卫星, 空间站等空间目标传输功率, 要求功率为100 kW~1 MW, 波长为0.86  $\mu\text{m}$ 的大功率自由电子激光都在研究之中。

自由电子激光器的发展方向是小型化和应用。研制紧凑、实用自由电子激光器装置是当前这个领域的工作重点。1) 要求设计先进加速器, 产生高亮度电子束, 提高器件效率。电子束归一化亮度与电流 $I$ 成正比,  $B_n = 2I/(\pi e_s)^2$ 。其中 $e_s$ 为发射度。2) 要求设计小周期波荡器, 可用低能量电子束产生短波长激光。辐射波长 $\lambda$ 与波荡器周期 $\lambda_w$ 成正比,  $\lambda = \lambda_w/2\gamma^2$ 。其中, $\gamma$ 是与电子束能量有关的无量纲参量。新型高亮度虚火花放电电子束源的研制成功, 使拉曼自由电子激光器的小型化和广泛应用成为现实。本文提出新的研制设想, 采用新技术将使新型拉曼自由电子激光器件结构尺寸减小到相当于计算机工作台大小。器件性能提高。

## 2 拉曼自由电子激光器结构

图1示出传统的拉曼自由电子激光器轮廓。脉冲线加速器产生出电压为0.5 MeV, 电流为800 A的强流电子束, 通过双绕螺旋线构成的, 周期为2.2 cm的波荡器, 产生功率为10 MW, 波长为8 mm辐射。

脉冲线加速器是由马克斯发生器, 脉冲形成线, 二极管和电子束漂移管等部分组成。导

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年4月17日

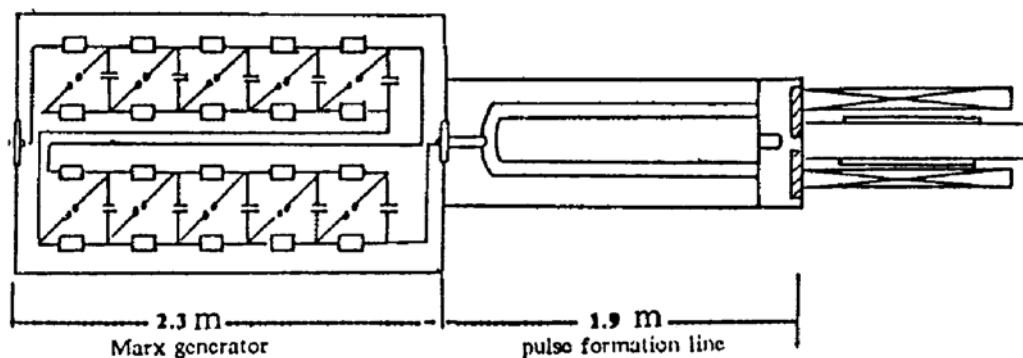


Fig. 1 The scheme of Raman FEL

引磁场线圈用以克服强流电子之间的库仑力，将电子束约束在漂移管中心。

马克斯发生器具有并联充电、串联放电特点，能产生脉宽为微秒、几十万伏的高压脉冲。高压直流电源通过水电阻对马克斯发生器的 10 级电容器（耐压 100 kV），并联充电到某一预定值，由高压脉冲触发马克斯发生器中的火花隙，使之导通，形成串联放电。原马克斯发生器最高可产生 0.5 MV 高压脉冲。整个发生器采用真空注油工艺，密封浸渍在耐压 35 kV 以上的变压器油中，不受外界环境条件的影响。

脉冲形成线用来对马克斯发生器产生的高压脉冲形状和宽度进行整形。本实验装置采用水同轴 Blumlein 传输线，主开关是小电极和内筒之间的弧面不锈钢体，开关间隔在 0~45 mm 可调。传输线内外筒之间充满电阻率大于  $1 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$  去离子水，在负载匹配条件下，传输线将产生形状良好，脉宽压窄，输出电压与输入电压相同的脉冲，脉冲宽度为 60 ns。

传输线输出毫微秒脉冲，通过预置开关加在磁场浸没型无箔二极管上，利用场致发射效应产生出强流电子束。二极管阴极为  $\varnothing 16 \text{ mm}$  的圆柱头，阳极采用中心开孔  $\varnothing 6 \text{ mm}$  的凹形板。输出直径为 6 mm 的实心柱状电子束。

导引磁场为一螺旋线绕线圈，磁场强度可达 1~2 T。

### 3 台式拉曼自由电子激光器设计

新型台式拉曼自由电子激光器是由马克斯发生器、虚火花放电电子束源，小周期波荡器等部分组成。

研制出的新型小周期波荡器，由带铁芯的双绕螺旋片组成，产生周期性园极化磁场。已将原 2.2 cm 周期缩短为 1 cm。在周期与间隙比为 1:1.6 时，测得 0.15 T 的波荡器磁场。总体实验输出波长从 8 mm 缩短至 3 mm<sup>[2]</sup>。图 2 为新型小周期波荡器结构。

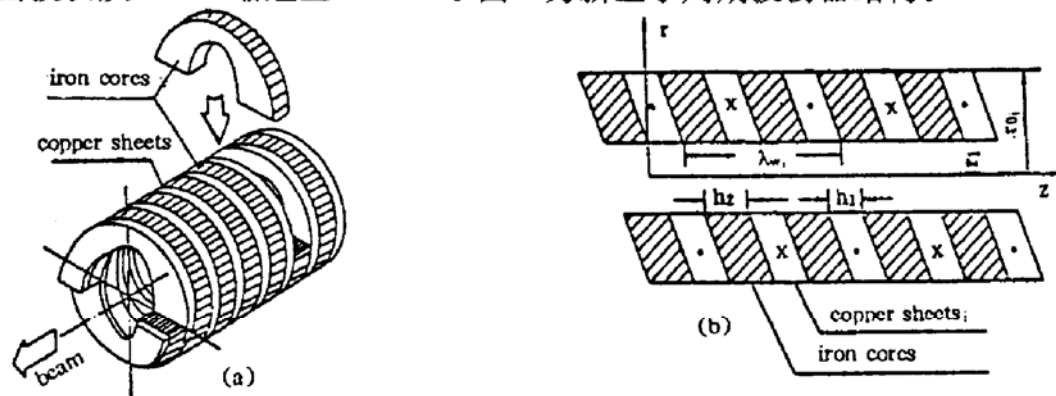


Fig. 2 The configuration of a small-period wiggler

标志电子束质量的重要参数是电子束亮度。虚火花放电可以产生极小束径( $\leq 1$  mm)、强电流密度( $> 10^4$  A/cm<sup>2</sup>)、极低的发射度( $\sim 15$  mm mrad)、高亮度( $\sim 10^{12}$  A/m<sup>2</sup> rad<sup>2</sup>)的磁自箍缩的电子束。正在研究由脉冲线加速器(400 kV, 10  $\Omega$ , 100 ns)驱动的,工作在低压气体( $\leq 100$  Pa)下,多隙虚火花放电电子束的产生机制及特性。

虚火花放电,是在虚火花放电室(PSC)中发生的轴对称高电压(几十千伏至几百千伏),低气压(1 Pa $\sim$ 100 Pa)的气体放电现象。放电室由具有共同中心放电通道的空心阴极,平板阳极和交替插入绝缘子和中间电极构成所谓多隙 PSC 组成,结构如图 3 所示。基于空心阴极效应和虚火花放电经验公式,可以确定空心阴极尺寸,多隙阴-阳极距离,以及工作气压范围<sup>[3]</sup>。

马克斯发生器(十级)由直流充电至高于 100 kV 的脉冲电压,触发放电后直接加到多隙虚火花放电室。工作在低气压的空心阴极由于正的空间电荷的注入与其内部的电子电离和电子雪崩,引起空心阴极效应发生,导致多隙逐级电压击穿。由于多隙电级的静电聚焦和加速作用,高功率、强流电子束射出阳极孔并进入漂移管。

#### 4 台式拉曼自由电子激光器尺寸性能

原型和新设计的马克斯发生器主要技术参数比较:

	新型	原型	
1. 直流充电电压:	100	100	kV
2. 级数:	5	10	
3. 每级电容量:	0.3	0.06 $\times$ 2	$\mu$ F
4. 每级电容尺寸:	74 $\times$ 15 $\times$ 5.5	74 $\times$ 30 $\times$ 5.5	cm <sup>3</sup>
5. 冲击电容量:	6	12	nF
6. 标称脉冲高压:	0.5	1	MV
7. 标称储能:	0.75	6	kJ
8. 倍压效率:	$\sim 85\%$	$\sim 85\%$	
9. 最高运行电压:	450	900	kV
10. 油箱尺寸:	1.2 $\times$ 0.8 $\times$ 0.7	2.3 $\times$ 0.8 $\times$ 1.4	m <sup>3</sup>

高亮度虚火花放电电子束源近日研制成功,获得电子束电压 200 kV, 电流 2 kA, 束斑直径 1 mm<sup>[4]</sup>。在漂移管内,如果电子束满足空间电荷限制流条件和迅速达到空间电荷中和,则一个具极高束流强度,极小发射度的磁自箍缩电子束便可保持特性变化不大地传输较远的距离。可以取消庞大的约束电子束的导引磁场设备。电子束斑很小,可缩小波荡器间隙,提高磁场强度。提高器件效率。

虚火花放电电子束亮度可与光阴极相比拟。它还具有造价低、结构简单和易于制造等优点。马克斯发生器体积已缩小一倍。取消脉冲形成线,总体尺寸又缩小一倍。原型拉曼自由电子激光器主体总长度为 5.5 m, 新型器件长度为 2 m。器件宽度也减小一半。

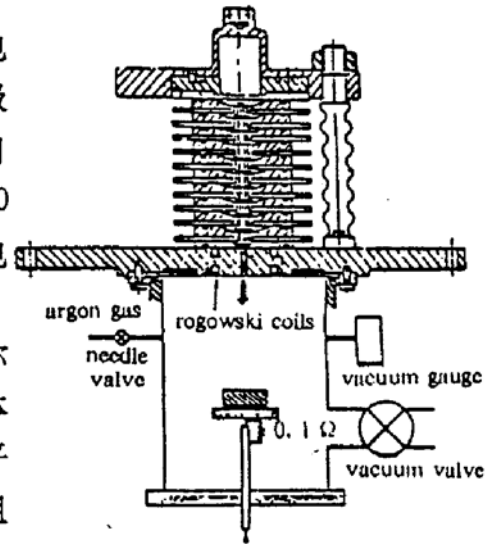


Fig. 3 The scheme of the pseudospark discharge

## 参 考 文 献

- [1] H. P. Freund, T. M. Antonsen, *Principles of Free-Electron Lasers*, Chapman & Hall, 1992: 26
- [2] 封碧波, 王明常, 王之江, 新型小周期波荡器的研制. *物理学报*, 1992, 41(3): 442~447
- [3] M. C. Wang, J. Zhu, Z. Wang, Design of the pseudospark discharge for raman FEL. *Nucl. Instr. & Meth.*, 1995, A358: 38~39
- [4] 王明常, 朱俊彪, 王之江等, 虚火花放电研制成功. *光学学报*, 1995, 15(2): 255

## A Proposal for Table Raman Free Electron Laser

Wang Mingchang      Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 17 April 1994)

**Abstract** A table sized Raman free electron laser (FEL) is proposed. The new FEL device is composed of a Marx generator, a pseudospark discharge and a small period wiggler. The outline dimension of the new FEL will be reduced to  $1/4 \sim 1/5$  of a traditional FEL.

**Key words** compact, Raman free electron laser, pseudospark discharge.

## 第四届压缩态与测不准关系国际会议 在太原召开

由山西大学光电研究所、美国马里兰大学和俄罗斯科学院列别捷夫研究联合主办的第四届压缩态与测不准关系国际会议于1995年6月5日至8日在山西省太原市召开。会议得到山西省政府、中国国家自然科学基金委员会、山西大学以及国际理论与应用物理联合会(IUPAP)、国际理论物理中心(ICTP)、美国宇航局、美国马里兰大学等单位的资助。来自澳大利亚、巴西、英国、加拿大、法国、中国、德国、匈牙利、印度、伊朗、意大利、日本、南朝鲜、墨西哥、波兰、俄罗斯、美国和越南等19个国家90多位代表参加会议, 其中国外代表60余人。会议共收到论文300余篇, 录用了其中110篇, 包括邀请报告28篇, 宣讲报告81篇和张贴1篇。论文议题涉及光场非经典态、测不准关系、量子起伏及量子测量、半导体激光器的位相噪声压缩、量子相干及其观测等方面。

会议由山西大学校长彭堃堃教授、美国马里兰大学 Y. S. Kin 教授和俄罗斯科学院列别捷夫研究所 V. I. Man'ko 教授共同主持。彭堃堃教授致开幕词。接着, 进行大学报告, 压缩态物理开拓者美国 H. P. Yuen(阮北康)教授、澳大利亚 G. J. Milbin 教授和我国北京大学曹昌祺教授等20余位中外压缩态物理学家就量子物理基本问题与量子光学前沿研究课题作了内容丰富的邀请报告。其中尤以马里兰大学的关于双光子干涉-衍射“鬼像”; 日本 Tamagawa 大学的量子干涉和量子极限之间的关系, 法国国家科学中心和山西大学光电研究所的半导体激光器的位相噪声压缩及中国科学院物理研究所的量子保密通讯等最新研究和实验结果引起与会代表极大兴趣。次日, 分三个会场同时宣讲报告和张贴报告进行学术交流。

这次会议论题的基本特点是理论与实验并重, 将量子物理的基础研究与现代量子测量及其可能应用等科学技术领域密切结合。会议学术气氛融洽、讨论热烈, 与会代表一致认为这是一次成功的国际学术交流会。会议论文集将由美国宇航局出版。

(黎凤)