

# 拉曼自由电子激光器\*

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** 文章介绍了拉曼自由电子激光器的应用, 概述了我们在拉曼自由电子激光器调谐、新型小周期波荡器、具有分布反馈谐振腔的拉曼自由电子激光振荡器和虚火花放电等方面的研究进展。

**关键词** 拉曼自由电子激光, 小周期波荡器, 分布反馈谐振腔

**Abstract** The potential applications of Raman free electron lasers (FEL) are introduced. An overview of new progress in FEL tuning with a new type of small period wiggler, a Bragg cavity resonator and pseudospark discharge is presented.

**Key words** Raman free electron laser, small-period wiggler, Bragg cavity

## 1 引言

自由电子激光器是 70 年代开始发展起来的新型强相干辐射源, 其原理是利用相对论电子束通过横向周期磁场(波荡器)产生电磁辐射, 它具有高效率、可调谐和高亮度等显著优点, 现在正走向实用阶段. 美国已建立了杜克大学、范得比尔大学、加州大学圣巴巴拉分校等几处自由电子激光用户设施, 广泛开展应用研究. 我们和航天部研究所合作, 于 1993—1994 年间进行了大功率毫米波在目标反射特性测量上的应用实验.

自由电子激光属于韧致辐射, 即是高能带电粒子急剧减速时产生的电磁辐射. 有两种运转方式: 一种是高电子能量、低电子密度的康普顿散射, 工作在可见和红外波段; 一种是低电子能量、高电子密度的受激拉曼散射. 输出在毫米和亚毫米波段, 即本文介绍的拉曼自由电子激光器. 除了利用自由电子动能通过周期磁场产生电磁辐射以外, 还有: 利用电子在磁场中做回旋运动产生的电子回旋共振辐射、电子束掠射通过金属光栅表面的史密斯-珀塞尔辐射、利用电子通过介质时的切伦科夫辐射.

图 1 示出拉曼自由电子激光器结构. 它由产生高能电子束的加速器, 产生周期磁场的波荡器和辐射等部分组成. 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.

中国科学院上海光学精密机械研究所于 1985 年建成了我国第一台 8mm 波段的拉曼自由电子激光器. 近几年来, 功率已提高到 14 MW. 本文介绍我们研制成功的小周期波荡器(它使拉曼自由电子激光器向短波调谐), 具有分布反馈谐振腔的拉曼自由电子激光振荡器和正在进行的虚火花放电源等几项自由电子激光新技术方面的理论和实验工作.

## 2 毫米波自由电子激光的应用

海湾战争引起人们对大功率微波研究的重视. 拉曼自由电子激光器填补了毫米波段缺少

\* 国家自然科学基金资助项目. 参加此项工作的本组人员还有陆载通、张立芬、周慧芬、冯诚士、陆宾、朱俊彪、黄羽、孟志葱、陈基忠、封碧波等同志.

1995 年 2 月 22 日收到.

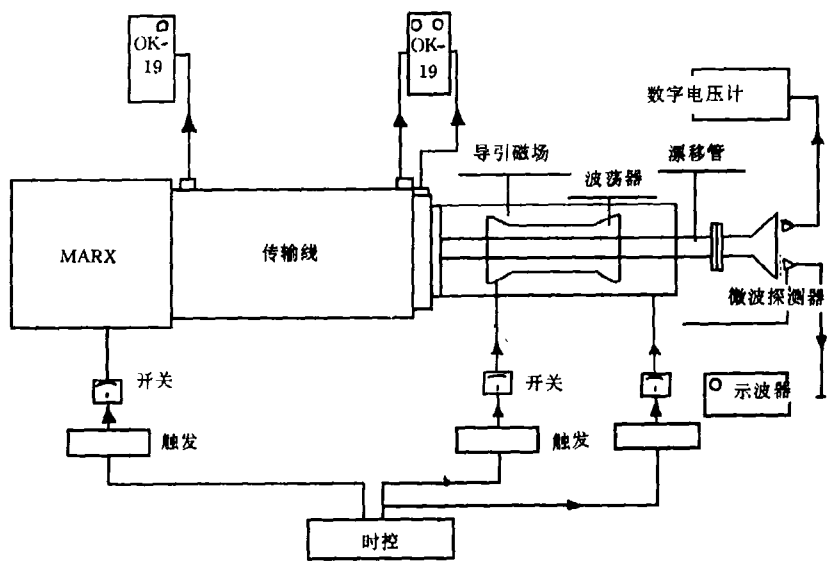


图1 拉曼自由电子激光器

强相干辐射源的空白。

高功率毫米波和亚毫米波在激光制盲、通信、毫米波雷达和目标反射特性测量等军事上有重要应用。在可控热核聚变中可应用于加热磁约束等离子体，它在脉冲时间 3s 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>。微波雷达要求高重复频率，拉曼自由电子激光器离此还有一段距离。在现代电子对抗战中，应用大功率拉曼自由电子激光制盲比较现实。向卫星、空间站等空间目标传送功率也在研究之中。

材料生产的工业应用要求光源能在近红外波段(2.5—100 μm)下工作，这是现有光源的空白。加州大学圣巴巴拉分校自由电子激光研究中心开展了固体物理、半导体非线性动力学和毫微秒结构的研究，其波段从 10 mm—40 μm。将远红外自由电子激光应用于测量共振沟道二极管本征弛豫和量子阱的能量弛豫(光学整流)；测量量子系统中非线性动力学(谐波产生)等。

还有应用拉曼散射谱测量技术的远红外光谱学。范得比尔大学在 1993 年报道首例自由电子激光应用<sup>[2]</sup>，利用自由电子激光在远红外区精密调谐特性，测量了 GaAs/GaAlAs 界面

导带的不连续性。

1993 年度自由电子激光获奖者 W. B. Colson 博士，在第 16 届国际自由电子激光会议开幕式上提出“今后五年可能是我们最好的时刻”口号，展望自由电子激光发展前景：远红外自由电子激光器价格将和电子显微镜一样，小于 100 万美元；自由电子激光器调谐特性将取代几种传统激光器，CEBAF(连续电子加速器设施)耗资 3000 万美元建造的 100 kW 紫外自由电子激光器，看来比某些准分子激光器便宜；自由电子激光器应该是同步辐射设施的一部分等。

马里兰大学 V. Granatstein 教授指出，高平均功率自由电子激光的典型参量是  $P_{av}/\lambda$ 。高功率自由电子激光可应用于加热等离子体，荷兰 FOM 大学在研制功率为 1—5 MW、波长为 2 mm 自由电子激光器；用于材料处理时，要求功率为 1—5 kW、波长为 8—20 μm 的自由电子激光器；用于向卫星传输功率时，要求功率为 100 kW—1MW、波长为 0.86 μm 的自由电子激光器<sup>[3]</sup>。

### 3 拉曼自由电子激光器调谐

自由电子激光器今后的方向是小型化和应  
物理

用. 研制紧凑、实用的自由电子激光器装置是当前这个领域工作的焦点. 一是要求设计先进的加速器, 产生高亮度电子束, 提高器件效率. 归一化亮度与电流  $I$  成正比,  $B_n = 2 I / (\pi \epsilon_n)^2$ . 其中,  $\epsilon_n$  为发射度; 二是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,  $\gamma$  是与电子能量有关的无量纲参量.

我们研制出新型小周期波荡器, 结构如图 2 所示. 它是由带铁芯的双绕螺旋片组成, 产生周期性圆极化磁场. 解决了以往平面磁隙较小, 限制电子束流传输的难题. 已将原 2.2 cm 周期缩短为 1 cm, 在周期与间隙比为 1:1.5 时, 测得波荡器磁场为 1.5 kGs. 波荡器磁场可通过外加电压调节, 实现拉曼自由电子激光调谐. 在相同电子束能量下, 总体实验输出波长从 8 mm 缩短至 3 mm<sup>[4]</sup>. 输出功率为 1 MW.

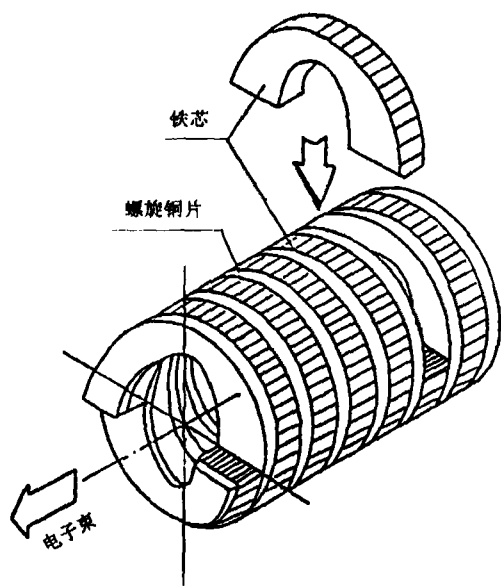


图 2 新型小周期波荡器结构示意图

#### 4 振荡器提高器件效率

普通拉曼自由电子激光器工作在超辐射状态, 输出激光能量分布在较宽频谱范围, 若不采用特殊的电子束偏转技术, 就很难利用传统的激光反射镜构成谐振腔来选择模式和提高效率

25 卷(1996 年)第 5 期

率.

我们研制成功具有分布反馈的谐振腔, 从而解决了振荡器中反射镜阻挡电子束同轴通过和大功率激光损伤两个关键技术难题. 图 3 为具有分布反馈谐振腔的自由电子激光振荡器结构示意图. 将漂移管内壁制成正弦形周期起伏波纹装结构, 满足分布反馈布拉格条件, 对特定模式的微波有强反射. 我们推导了正向和反向行波的耦合系数方程, 提出分布反馈腔的等效  $Q$  值概念. 全反射端等效反射率可达 99% 以上, 输出端透过率可调. 波纹波导作用如同反射镜, 同时具有高反射率和选频特性. 在两段波纹波导之间插入一段平滑波导, 以增加作用距离.

选用波纹的布拉格周期 4 mm, 波纹起伏幅度 0.6 mm, 进行了 8 mm 波拉曼自由电子激光振荡器实验<sup>[5]</sup>. 观察到光谱变窄, 功率增高的振荡效应. 实验结果和日本大阪大学结果在第 12 届国际自由电子激光会议上同时报道. 我们的输出功率为 6.6 MW, 日本为 0.6 MW.

图 3 包括了自制的微波光栅谱仪结构, 由铝反射光栅, 凹面反射镜和准直系统组成. 两只铝阶梯反射光栅, 闪烁角为 30°, 其光栅常数分别为  $d=7.5$  mm,  $d=3.5$  mm. 微波谱仪覆盖范围分别为 6-10 mm, 2.2-4.8 mm.

#### 5 虚火花放电电子束源

自由电子激光器中, 共振条件要求轴向速度发散  $\Delta v_z$  满足下式:  $\Delta v_z / c \ll \lambda / 2L$ . 其中,  $L$  为相互作用长度. 电子束质量受发射度限制, 给出波长极限:  $\lambda > (2\pi)^{1/2} \cdot \epsilon_n / \gamma$ .

自由电子激光器小型化要求研制新型电子束源, 取代庞大的加速器. 自由电子激光性能提高, 也要求研制新型高亮度电子束源. 虚火花放电可以产生小束径 ( $\leq 1$  mm)、强流密度 ( $> 10^4$  A/cm<sup>2</sup>)、低发射度 ( $\sim 15$  mm mrad)、高亮度 ( $\sim 10^{12}$  A/m<sup>2</sup>rad<sup>2</sup>) 电子束. 正在研究由脉冲线加速器 (400 kV, 2 kA, 3  $\mu$ s) 驱动的, 工作在低压气体 ( $\leq 100$  Pa) 下, 由多隙虚火花放电产

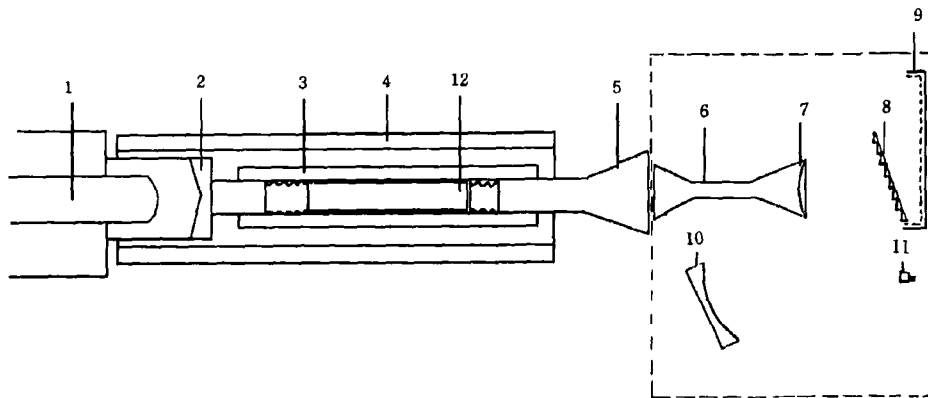


图3 具有分布反馈谐振腔的自由电子激光振荡器结构示意图

1. 阴极； 2. 阳极； 3. 波荡器； 4. 导引磁铁； 5. 输出天线； 6. 带波导的输入天线； 7. 微波透镜；  
8. 反射光栅； 9. 吸收材料； 10. 柱面反射镜； 11. 毫米波探测器； 12. 分布反馈谐振腔

生强流电子束的产生机制及特性。

虚火花放电,是在虚火花放电室中发生的轴对称高电压(几十 kV——几百 kV),低气压(1—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,平板阳极和在其之间插入多隙绝缘子和中间电极构成。整个放电过程可分为三个时期:预放电期,空心阴极期(即高能低流电子束期)和传导期(即低能强流电子束期)。

基于空心阴极效应和虚火花放电经验公式,确定了空心阴极,多隙阴-阳极距离,以及工作气压范围。提出利用虚火花放电产生高亮度电子束源的总体实验方案<sup>[6]</sup>。

虚火花放电室的设计如图 4 所示,马克斯发生器(十级)由直流充电至 100 kV 以上的脉冲电压,触发放电后经改进型脉冲线加速器直接加于多隙虚火花放电室。工作在低气压的空心阴极由于正在的空间电荷的注入与其内电子电离和电子雪崩,引致空心阴极效应发生而导致多隙逐级电压击穿。每个中间电极靠近放电间隙端装有绝缘子保护套,用以屏蔽放电通道内各种电离产生的辐射线和各种逸出粒子对绝缘子的照射和轰击而导致局部预放电。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进入漂移管。注入漂移管内的电

流由嵌入阳极法兰盘的儒可夫斯基线圈测出。漂移管中传输电子束的束流强度、束斑、发射度等等由装在可移动杆端的法拉第杯、酸敏纸以及发射度计测出。自动压强控制系统控制室内充气气压。

虚火花放电结构简单,造价低廉,比光阴极更具实用价值。通过研究电子束在气体中传输特性,研究高电压气体放电中虚火花放电特性,

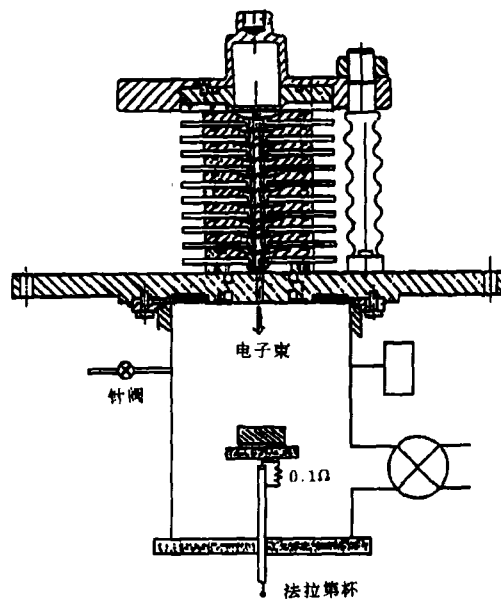


图4 虚火花放电室结构设计

研究空心阴极场致发射效率,为深入研究低气压强流放电物理打下基础,为拉曼自由电子激光器小型化和泵浦 X 射线激光的应用开拓新途径.

### 参 考 文 献

[1] H. P. Freund, T. M. Antonsen, Principles of Free-electron Lasers, Chapman & Hall, (1992), 26.

[2] R&D Magazine, February (1993)5.

[3] V. L. Granatstein, Chairman Speaking on High Power FEL's, 16 th Free Electron Laser Conf., Aug. 21—26 (1994), 187.

[4] 封碧波、王明常、王之江,物理学报,41-3 (1992),442.

[5] 王明常、陆载通、王之江等,光学学报,14-3 (1994),225.

[6] M. C. Wng, J. B. Zhu, Z. J. Wang et al, Nucl. Instr. & Methods, A358 (1995), 38.

## 全内腔绿光氦氖激光器\*

曾 明

(国防科技大学应用物理系,长沙 410073)

**摘 要** 全内腔绿光氦氖激光器的出现,使得有着广泛应用的普通氦氖激光器再造辉煌,又添许多新的重要用途.但是它的技术要求高,研制难度大.它的成功是现代高科技的结晶,也是衡量一个国家薄膜光学和激光器技术水平的一项重要标志.

**关键词** 氦氖激光器,全内腔,绿光 543 nm 谱线

**Abstract** Our successful development of a green internal mirror cavity He-Ne Laser is described.

**Key words** He-Ne laser, internal mirror cavity, green radiation at 543 nm.

### 1 氦氖激光器再造辉煌

30 多年前的一天下午,当氦氖激光器作为世界上第一台连续波激光器在贝耳电话实验室诞生的时候,它所引起的轰动效应决不亚于早它半年问世的红宝石固体激光器.它的研制者,来自伊朗的科学家阿里·贾范(Ali Javan)等人对气体情有独钟,开辟了利用气体放电实现粒子数反转,从而获得激光输出的新领域.由于气体的光学均匀性较好,所以气体激光器输出光束的质量(如单色性、相干性、方向性、模式等)好,波长性也好.氦氖激光器更兼有放电平稳、噪声低、结构简单可靠、方便实用、价格低廉等特点,因此在准直、定位、显示干涉计量、条码判读、教学演示等许多方面得到了广泛的应用,

几乎随处可见,以至于在过去很长的一段时期内,一些人把红光氦氖激光器当成了激光的化身.直到近些年来随着固体激光二极管的崛起,才有人预言氦氖激光器从此将黯然失色.不过这种估计可能有点过份.一方面,固体激光二极管这类半导体激光器是所有激光器中最小巧的一类,且效率较高,发展较快,同氦氖激光器相比,的确各有所长.但它的相干性较差,输出光束发散角大,像散也大,光斑不对称,而且产品性能的个体差异较大.因此,仅在光束质量相对于价格和便携性等显得不那么重要的场合,上述半导体激光器才可以取代氦氖激光器.如目前比较成熟的 AlGaAs 双异质结激光器,输出波长为 750—800 nm,已广泛用于激光打印、

\* 1995年2月27日收到.