



# 气体激光

下册

上海人民出版社

# 气 体 激 光

(下 册)

《气 体 激 光》编 写 组

上 海 人 民 出 版 社

# 气 体 激 光

(下 册)

《气体激光》编写组

上海人民出版社出版

(上海 绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 10.375 字数 228,000

1976年2月第1版 1976年2月第1次印刷

统一书号: 15171·196 定价: 0.69 元

# 毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

通过实践而发现真理，又通过实践而证实真理和发展真理。

# 目 录

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| <b>第五章 原子气体激光器</b>        | <b>1</b>   |
| § 5-1 氦-氖激光器的工作原理         | 2          |
| § 5-2 氦-氖激光器结构及其制造工艺      | 4          |
| § 5-3 特殊结构的氦-氖激光器         | 26         |
| § 5-4 氦-氖激光器的工作特性与输出特性    | 31         |
| § 5-5 其它原子气体激光器           | 51         |
| <b>第六章 分子气体激光器</b>        | <b>59</b>  |
| § 6-1 普通二氧化碳激光器的工作原理      | 61         |
| § 6-2 普通二氧化碳激光器的结构        | 72         |
| § 6-3 普通二氧化碳激光器的工作特性和输出特性 | 80         |
| § 6-4 流动二氧化碳激光器           | 99         |
| § 6-5 二氧化碳气动激光器           | 104        |
| § 6-6 高气压二氧化碳激光器          | 140        |
| § 6-7 其它分子激光器             | 159        |
| <b>第七章 离子气体激光器</b>        | <b>167</b> |
| § 7-1 概况                  | 167        |
| § 7-2 氩离子激光器的激发机理         | 169        |
| § 7-3 氩离子激光器的结构           | 177        |
| § 7-4 氩离子激光器的工作特性         | 189        |
| § 7-5 其它离子激光器             | 211        |
| <b>第八章 共振腔反射镜膜层的制备</b>    | <b>221</b> |
| § 8-1 多层介质膜的反射率           | 221        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| § 8-2 金属膜的反射率 .....               | 227        |
| § 8-3 膜层制备工艺 .....                | 230        |
| <b>第九章 激光调制 .....</b>             | <b>253</b> |
| § 9-1 调制的概念 .....                 | 253        |
| § 9-2 激光调制的种类 .....               | 257        |
| § 9-3 电光调制 .....                  | 259        |
| § 9-4 声光调制 .....                  | 293        |
| <b>附录 I 部分气体激光器波长、跃迁一览表 .....</b> | <b>304</b> |
| <b>附录 II 几个气体动力学参数简述 .....</b>    | <b>317</b> |
| <b>附录 III 一些镀膜材料的有关参数 .....</b>   | <b>322</b> |

## 第五章 原子气体激光器

氦-氖气体激光器是在 1960 年成功运转的第一个气体激光器，这以后气体激光器获得了飞跃的发展。在中性原子气体激光器方面，获得大量的激光跃迁，特别是最初几年，在这方面做了很多工作。能产生激光的原子种类很多，有惰性气体（氦、氖、氩、氪、氙）；某些金属原子蒸气（铜、锰、铅、锌、镉、铯、锡、汞等）；卤素气体或蒸气（氯、碘、溴等）以及其它一些元素气体或蒸气（例如氮、硫、碳、氧等）。

惰性气体原子激光器的辐射波长大部分分布在红外区，为数不多的几条在可见光区。在可见光区与近红外区的典型输出功率为 10 毫瓦的数量级，波长在 10 微米以上的输出功率较低，在微瓦到毫微瓦的范围。在电激发过程中除少数应用共振能量转移效应外，其余大部分都是通过电子非弹性碰撞直接进行激发的。就输出方式说有连续的，也有脉冲的。在金属原子蒸气激光器中，激光多以脉冲方式输出，有许多波长分布在可见光区与近红外区。在卤素蒸气的原子激光跃迁中，近来利用  $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$  的光化学分解效应，使碘在 1.315 微米 ( $^2P_{1/2} \sim ^2P_{3/2}$ ) 的激光脉冲输出功率高达  $1.2 \times 10^9$  瓦，脉冲宽度仅为  $10^{-8}$  秒，估计以后还会有新的提高。

目前在原子气体激光器中以氦-氖激光器应用得最为普遍，因此在其基本特性、器件寿命及输出频率稳定技术等方面，都做了大量研究工作。本章也着重介绍氦-氖激光器。

## § 5-1 氦-氖激光器的工作原理

在图 5-1 中画出了氦-氖激光器能级结构简图, 图中用 LS 耦合表示氦原子能级符号, 氖原子能级用帕邢表示法。氦原子最低的两个能级为  $1S_0$  与  $3S_1$ 。氖原子基态是  $(2p)^0$ , 激发态是  $1S$ 、 $2S$ 、 $3S$ 、 $\dots$  及  $2P$ 、 $3P$ 、 $\dots$  等。

氖的  $1S$ 、 $2S$ 、 $3S$ 、 $\dots$  态都是由四个子能级组成,  $2P$ 、 $3P$ 、 $\dots$  都是由十个子能级组成。 $2S$  态与基态有光学联系(主要指  $2S_2$

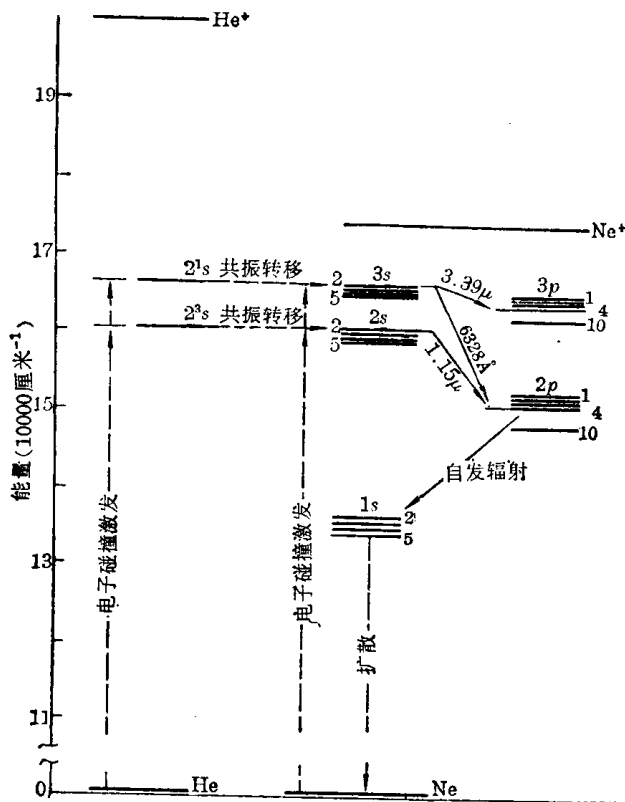


图 5-1 氦-氖激光器能级简图



与  $2S_4$ , 而  $2S_3$  与  $2S_5$  往基态跃迁一般是禁戒的), 但在气体压强不太低时, 在  $2S$  态与基态之间发生的共振俘获效应变得比较显著, 即当处于  $2S$  态的氦原子辐射跃迁到基态时, 它所发射的光子在未离开容器(例如放电管)之前, 又被另外的基态氦原子所吸收, 并被激发到  $2S$  态。共振俘获等效地延长了  $2S$  态的寿命, 因此  $2S$  态的寿命主要是由到  $2P$  态的跃迁速率所决定。在偶极跃迁近似下,  $2P$  态与基态无光学联系, 但  $2P$  态到  $1S$  态的辐射速率极快。根据测量结果, 我们把  $2S$  与  $2P$  的各子能级寿命列于表 5-1 中。由表显见,  $2S$  态各子能级寿命比  $2P$  态约高一个数量级。因此从能级寿命来看, 在  $2S$  与  $2P$  的子能级之间是有利于实现粒子数反转的。

表 5-1 氦( $2S$ )\*与( $2P$ )态的寿命(毫微秒)

| $2S_2$ | $2S_3$ | $2S_4$ | $2S_5$ | $2P_1$ | $2P_2$ | $2P_3$ | $2P_4$ | $2P_5$ | $2P_6$ | $2P_7$ | $2P_8$ | $2P_9$ | $2P_{10}$ |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| 96     | 160    | 98     | 110    | <8     | <10    | <13    | 12     | <11    | 13     | <13    | 16     | 17     | <20       |

\*  $2S$  值相应于 1 托压强的氦, 并且由于碰撞效应使  $2S$  值稍微短些( $\approx 30\%$ )。

$2S$  态的粒子数主要有以下几个来源:

第一个来源是所谓共振能量转移过程。由图 5-1 可看出, 氦的  $2^3S$  态与氦的  $2S$  态很接近, 仅相差  $0.04 \sim 0.15$  电子伏特。而氦的  $2^3S$  是一个亚稳态。在气体放电过程中, 处于  $2^3S$  的氦原子与基态氦原子碰撞, 由氦原子转移能量来激发氦原子到  $2S$  态的几率很大。而  $2P$  态与  $2^3S$  能量相差较多, 上述过程对  $2P$  态积累粒子数的贡献可以忽略。

第二个来源是气体放电过程中, 基态氦原子与具有一定动能的电子进行非弹性碰撞直接被激发到  $2S$  态, 而  $2P$  态与基态无光学联系, 因此直接由基态获得激发的几率很小。氦

气体中加进氦气时，放电的电子数目比纯氖气放电时大大增加，同时也提高了电子温度，这进一步增加了直接激发过程的速率。但是与共振能量转移过程相比，这种过程只占次要的地位。

第三个来源是串级跃迁，即原子从较高的能级依次跃迁到  $2S$  态，但同前述两种过程相比较，此过程的贡献比较小。

根据跃迁法则，在  $2S$  态与  $2P$  态之间有 30 种可能跃迁，相应的波长范围是  $0.89 \sim 1.7$  微米。实验尚未观察到全部的跃迁。在这些跃迁中，实验发现波长  $1.15$  微米的激光最强。

应当指出，氖的  $1S$  态是亚稳态，如果激光器运转条件不适当，例如放电毛细管内径太粗、氖气压强太高或放电电流太大等，会使  $1S$  态粒子数过于大，这就加强了在  $2P$  与  $1S$  之间的共振俘获效应；同时电子碰撞使从  $1S$  态激发到  $2P$  的速率也增加。结果是延长了  $2P$  态的寿命，降低了能级粒子数反转值，甚至使激光停止振荡。 $1S$  能级是通过扩散与容器壁碰撞把能量交给器壁而回到基态的，增益近似与放电管内径成反比的效应与此过程有关系。

$3S \rightarrow 3P$  与  $3S \rightarrow 2P$  的激光跃迁原理和  $2S \rightarrow 2P$  类似，这里不再赘述，但此时是靠氖原子  $2^1S$  能级共振能量转移实现的，它与氖的  $3S$  态能级极为接近。在  $3S \rightarrow 3P$  的一系列跃迁中，波长为  $3.39$  微米 ( $3S_2 \rightarrow 3P_4$ ) 的激光最强；在  $3S \rightarrow 2P$  的一系列跃迁中，最强的激光是  $6328$  埃 ( $3S_2 \rightarrow 2P_4$ )。

## § 5-2 氦-氖激光器结构及其制造工艺

### (一) 器件结构简介

这里我们仅介绍输出激光波长为  $6328$  埃的器件结构，其

它几个输出波长的器件结构与此相类似。激光器结构分三大部分,即放电管,共振腔和激发电源。根据使用要求的不同,具体结构形式是多种多样的,图 5-2 所示为常见的几种。图中,  $R_1$  与  $R_2$  是镀有多层介质膜的反射镜,组成共振腔;两片反射镜之间的部分是气体放电管(或称等离子体管),管内充有一定总气压和一定氮氦混合比的气体;  $D_1$  和  $D_2$  是电极。为简单起见,图中未画出激发电源。

在图 5-2 中的(一)(二)(六)中,组成共振腔的两面反射镜与放电管彼此分离,这种结构常称之为外腔式;在(三)(四)图中,反射镜密贴在放电管两端,常称之为内腔式;而在图(五)中,其左端为内腔式,右端为外腔式,常称之为半内腔式或半外腔式。

在外腔式放电管两

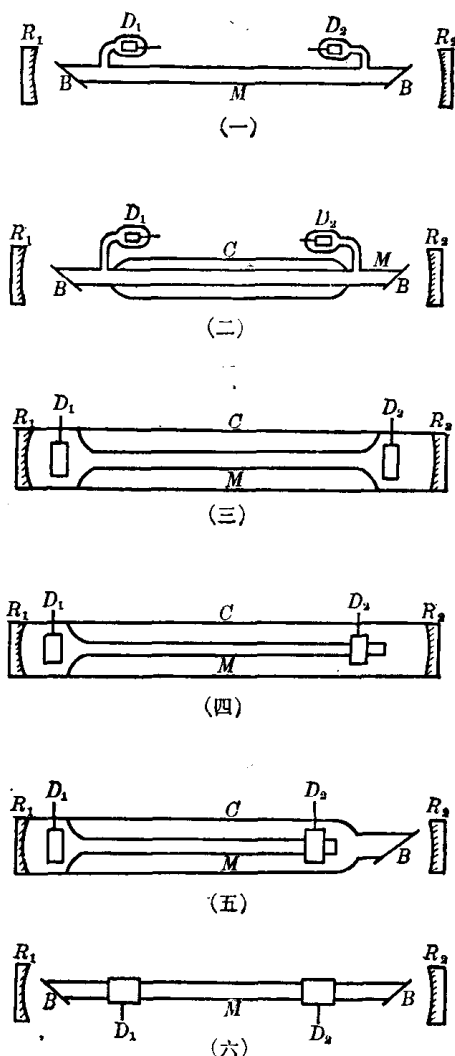


图 5-2 氮-氦 6328 埃气体激光器  
几种结构示意图

端或半外腔式的外腔一端,是用两块玻璃片依照一定角度(即布儒斯特角)把放电管密封起来的,如图 5-2 中 *B* 所示部分,并称为布儒斯特窗口。

图 5-2(六)的结构是由射频电源激发的器件,电极是包在放电管外部的一组金属片(图中仅画出两个),通过它们把频率为 30 兆赫左右的电磁场传输到管内部。此种形式的放电管称为外电极式;而图 5-2 所示其它放电管叫内电极式。

在图 5-2 的(三)(四)(五)中,电极与放电管同轴,称为同轴式电极;而在(一)(二)中,电极在放电管旁侧,称为旁轴式电极。图中前五种放电管,都可做成旁轴式电极或同轴式电极,视具体情况而定。

图 5-2 中 *M* 所示部分,即放电管中央的细管,常称它为毛细管,尽管在某些氮-氦激光器中,这根管内径可粗达 1 厘米,但习惯上仍称其为毛细管。套在毛细管外边较粗的管子,即图中 *C* 所示部分,称为储气管,图(一)(六)的结构是没有储气管的。

用交流电源激发放电时,通常采用如图(二)(三)的结构,使毛细管两端有两个喇叭口。如果用(四)(五)的结构,其毛细管一端是开放的,往往容易造成放电不稳定。

下边分别介绍各部分的构造。

### 1. 放电管

放电管相当于气体激光器的心脏,其好坏直接影响激光器输出特性与寿命,因此做好放电管是制造气体激光器的关键。

**放电管材料** 对放电管材料的要求一般有如下几个方面。第一要有很好的真空气密性能,这是维持激光器正常运转的首要条件;第二要有很好的化学稳定性,经得住气体放电的侵

蚀;第三要有较好的电学绝缘性能,同时易于和某些作为电极引出线的金属(例如钨)封接;此外还要求真空吸气和放气速率小、容易加工以及有一定的机械强度等。

玻璃是满足上述要求的一种比较常用的材料,但它也有一些缺点,例如较脆,经不起剧烈冲击等。

目前较常用的玻璃有熔融石英玻璃(简称为熔石英)与硬质玻璃,而硬质玻璃中应用最广泛的是GG17玻璃(简称为17料)与95玻璃(简称为95料)。几种常用材料的性能列于表5-2中。

表 5-2 几种玻璃材料的性能

| 名 称   | 线膨胀系数<br>(室温) $\times 10^{-7}$ | 软 化 温 度 | 骤变温度*     | 机 械 强 度 |
|-------|--------------------------------|---------|-----------|---------|
| 熔 石 英 | ~5                             | ~1500°C | >1000°C   | 最 好     |
| 17 料  | 28~32                          | ~820°C  | ~310°C    | 次于熔石英   |
| 95 料  | 37~41                          | 750°C   | 260~290°C | 次于17料   |
| 3C-11 | 36                             | 598°C   |           |         |

\* 系指材料骤冷骤热时破裂的温度。

熔石英的线膨胀系数较小,用它吹制的放电管制件一般情况下不必退火;而用硬玻璃时都需要退火,以消除吹制过程中形成的各种应力。但是熔石英成本较高,因此仅用于某些特殊用途的器件。射频放电激发的器件也常用熔石英做放电管的管壁材料。

电极 电极的好坏,在很大程度上影响着激光器的寿命。氦-氟激光器放电工作区域在辉光放电区,放电电流并不高,通常在100毫安以内,但是,在气体放电过程中,被电场加速的正离子轰击阴极,引起了阴极的溅射与蒸发,这些飞离阴极

的金属原子又沉积在附近的玻璃管壁上，导致了对部分工作气体的吸收或吸附，使放电管内的工作气体压强不断降低（有时称之为气体清除效应）。氦-氖激光器的工作气压本来就很低（一般是1托的数量级），这样一来就很容易使工作气压偏离最佳值。因此减小阴极溅射是提高氦-氖激光器寿命的重要工作。由于电子质量比正离子小得多，故由阳极造成的危害比阴极小得多。

初期的器件常用热阴极，例如钨钨阴极或氧化物阴极，后来逐渐被冷阴极所代替，只在有特别要求的器件中还使用热阴极。虽然冷阴极溅射现象比热阴极显著些，发射电流也不如热阴极那样稳定，但它有结构简单、加工容易、成本低以及不易损坏等特点，这比价格昂贵、使用麻烦、易于损坏的热阴极优越得多。冷阴极有几种类型，有直接使用放电溅射较小的金属制成的；有涂氧化物层的。前一类比较流行，下面主要介绍这类冷阴极的特性。

第三章我们介绍过，铝、镁、钽等金属溅射最弱。这是因为在其表面形成一层牢固的氧化膜，有效地防止了离子轰击造成的侵蚀。这些金属材料做成的电极在使用前通常先进行所谓“氧化”过程，即在放电管中充入几个托的氧气或空气，进行一定时间的放电，电流大小视金属种类与电极表面大小而定，通过此种手续使电极表面完全形成氧化膜。这三种金属的发射性能也较好，在阴极表面附近，由于正离子入射形成很高的电场梯度，这就使阴极电子易于穿过金属表面位垒（隧道效应）透过氧化膜发射出去。钽价格较贵，用得较少。镁的溅射虽小，但在接近 $400^{\circ}\text{C}$ 时即开始显著蒸发（熔点 $650^{\circ}\text{C}$ ），使电极的高频烘烤除气手续很难进行，这大概是镁不为人们重视的一个重要原因。目前用得较多的是铝，另外还有钼。

铝的电子发射性能较钼好,成本也很低。高级纯铝(含量由 99.5% 到 99.8%)的阴极溅射与蒸发比工业纯铝小得多。在真空中即使达到其熔点( $658^{\circ}\text{C}$ )也无显著蒸发。其缺点是熔点较低,使阴极高频烘烤除气较难掌握;另外铝之间及铝和其它金属之间的焊接工艺也较复杂。

钼的溅射现象虽比铝显著,但其熔点较高( $2625^{\circ}\text{C}$ ),在真空中到  $1900^{\circ}\text{C}$  以上蒸发现象才显著,因此较容易对冷阴极进行高频烘烤除气;另外钼与钼及其它金属之间的焊接工艺较铝容易,因此目前很多氦-氟激光器的冷阴极都采用钼。

冷阴极形状一般做成圆筒状,然后点焊上一根金属杆(常用钨)作引出线。圆筒大小与放电电流有关,但是通常做得稍大些,以减少放电溅射。在电流较小时(例如几个毫安),用钨杆本身作阳极即够了。钼筒可用厚 0.1 毫米左右的钼片点焊而成,然后点焊上直径约一毫米的钨杆作引出线。直接进行这些点焊较困难,往往用极薄的钼片或镍片做过渡料。我们把几种常用的金属材料的点焊情况列于表 5-3 中,以便读者应用查对。

因为钨杆膨胀系数(在室温为  $44 \times 10^{-7}$ )与 95 料接近,可以直接把二者封接起来,为保证密封性能,通常在钨杆与 95 料间加用一种膨胀系数介于二者之间的玻璃(例如钨玻璃)作过渡料。当钨杆直径小于 1 毫米时,可先磨光、清洗其表面,再稍加热使其表面氧化到显蓝绿色为宜,然后套一小段薄壁玻管于这段钨杆上,用火头从一端烧到另一端,使玻管以玻珠形状牢牢粘结在钨杆上,此时钨杆表面应呈橙黄色或金黄色(即为钨的氧化物溶于玻璃后生成的钨酸钠的颜色),若呈灰色则表示封接时温度太高了。因为钨杆有纤维状结晶结构,故在截断钨杆时不要用切割法,否则易形成纵向裂缝引起

表 5-3 几种金属的点焊性能

| 金属 II | 金 属 I                                           |     |      |     |   |   |                                                                 |      |                                                      |
|-------|-------------------------------------------------|-----|------|-----|---|---|-----------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------|
|       | 锆                                               | 铝   | 铜    | 可伐  | 镍 | 铂 | 钼                                                               | 钽    | 钨                                                    |
| 钨     | 2                                               | 4   | 4    | 3~4 | 2 | 2 | $\begin{smallmatrix} F \\ 3\sim 4\downarrow \end{smallmatrix}$  | 3~4S | $\begin{smallmatrix} F \\ 3\sim 4 \end{smallmatrix}$ |
| 钽     |                                                 | 3~4 | 3~4S | 2~3 | 2 | 2 | 3~4, S                                                          | 3S   |                                                      |
| 钼     | 2                                               | 4   | 4    | 3   | 2 | 2 | $\begin{smallmatrix} F' \\ 3\sim 4\downarrow \end{smallmatrix}$ |      |                                                      |
| 铂     |                                                 | 3~4 | 2    | 2   | 1 | 1 |                                                                 |      |                                                      |
| 镍     | 2                                               | 3~4 | 3    | 2↓  | 1 |   |                                                                 |      |                                                      |
| 可伐    |                                                 | 3~4 | 3~4↓ | 3↓  |   |   |                                                                 |      |                                                      |
| 铜     |                                                 | 4   | 3~4S |     |   |   |                                                                 |      |                                                      |
| 铝     |                                                 | 3   |      |     |   |   |                                                                 |      |                                                      |
| 锆     | $2\begin{smallmatrix} S \\ E \end{smallmatrix}$ |     |      |     |   |   |                                                                 |      |                                                      |

〔注〕 表中符号:

1—点焊极好; 2—点焊较好; 3—难点焊; 4—不良或不能点焊。

S—在保护液体下(例: 酒精、四氯化碳等)可能点焊。

E—在惰性气体下可能点焊。

F—有钽做过渡材料可以点焊。

↓—用闸流管电路能良好点焊。

‡—用闸流管-瞬时调整装置可焊接  $\phi 1.0$  毫米的金属丝。

漏气, 一般用磨削法截断, 亦用氢氧焰把有关部位烧成白炽状态后再割断或折断。当钨杆直径比 1 毫米大得多时, 通常先行高温除气(例如烧氢法)然后封接, 这样可防止由钨杆内部逸出的许多微小气泡附在其表面引起漏气。钨杆与 17 料封接时须加用膨胀系数介于二者之间的一种到两种玻璃作过渡料, 否则易形成裂缝使封接失败。

储气管 氦-氟激光器储气管直径在 2~5 厘米, 具体尺寸视毛细管几何尺寸而定。储气管与毛细管的气体是通过在毛



细管上开一个小孔或者使毛细管一端开放来连通在一起的。储气管的主要用途是稳定工作气压、稳定输出特性与延长激光器寿命。这很显然,如前所述,电极溅射、管壁吸收与吸附、气体扩散效应等使管内气压不断降低;另外在放电过程中,由于带电粒子对管壁的轰击,也会使气压在一定范围内波动。尺寸较小的激光器这些现象更显著些。第二个用途是起着支架毛细管的作用,使毛细管不易弯曲。在内腔式氦-氟激光器中(如图 5-2 所示),储气管还把反射镜与毛细管依照一定的排列精度固定起来,以维持激光器正常工作。

射频激发式氦-氟激光器也常加上储气管。但在这种情况下,储气管与毛细管往往并列连通在一起,其作用仍不外乎上面所述的那些。

**毛细管** 毛细管是产生激光增益的区域,毛细管的几何尺寸决定着激光器的最大增益。当  $gl \ll 1$  时(氦-氟激光器通常满足此条件),单程纯增益  $G = \frac{\Delta I}{I_0} \approx gl$ , 即单程纯增益正比于毛细管长度;根据实验结果增益系数又反比于毛细管内径。直径较细的放电管往往有较高的增益,但也不能选得太细,一方面内径太小给调节共振腔带来麻烦;另一方面,根据共振腔理论,毛细管太细时单程衍射损耗太大,因此最佳内径一般通过实验来选择。在表 5-4 中列出几个数据供参考。

表 5-4 毛细管几何尺寸表

| 毛细管长度(厘米) | 毛细管内径(毫米) |
|-----------|-----------|
| 5         | 0.5       |
| 15~20     | 1~1.5     |
| 30~40     | 2~3       |
| 70~80     | 4         |
| 100       | 5         |
| 150       | 7~8       |
| 500       | 10        |