

§ 1.3.10 光泵远红外激光器

(一) 基本原理

分子的转动能级是很密集的，能级间隔一般小于 kT ，只要分子的转动能级具有永久电偶极矩，则能级间可能产生跃迁，但由于其能量间隔很小，辐射波长大都在远红外或亚毫米波范围，不过，对这样密集的能级进行激励并在转动能级间建立粒子数反转很困难。早期曾有人采用放电激励而获得若干亚毫米波激光，如HCN的337微米激光。但后来采用光泵激励更为有效。后者需要光子能量与分子吸收能级相匹配的单色光源(即 $E - E_0 = h\nu$)。故直至高效率、频率可调的CO₂激光器问世以后，光泵亚毫米波激光器才取得了显著的进展。

能产生转动跃迁的分子众多，主要可分为对称与非对称极性分子两类。前者的部分能级如图1.3—79所示。图中描绘了两个振动能级，而每一振动能级根据转动量子数 J 、 K 的不同取值又可分为许多转动能级。上振动能级中的转动能级间由于热分布而产生的粒子数分布一般是微不足道的，所以能级 $(J' \cdot K')$ 与 $(J' - 1, K')$ 之间在单色光的泵浦下就很容易建立起粒子数反转分布，从而产生亚毫米波输出。此时跃迁的选择定则是： $\Delta J = -1$ ； $\Delta K = 0$ 。

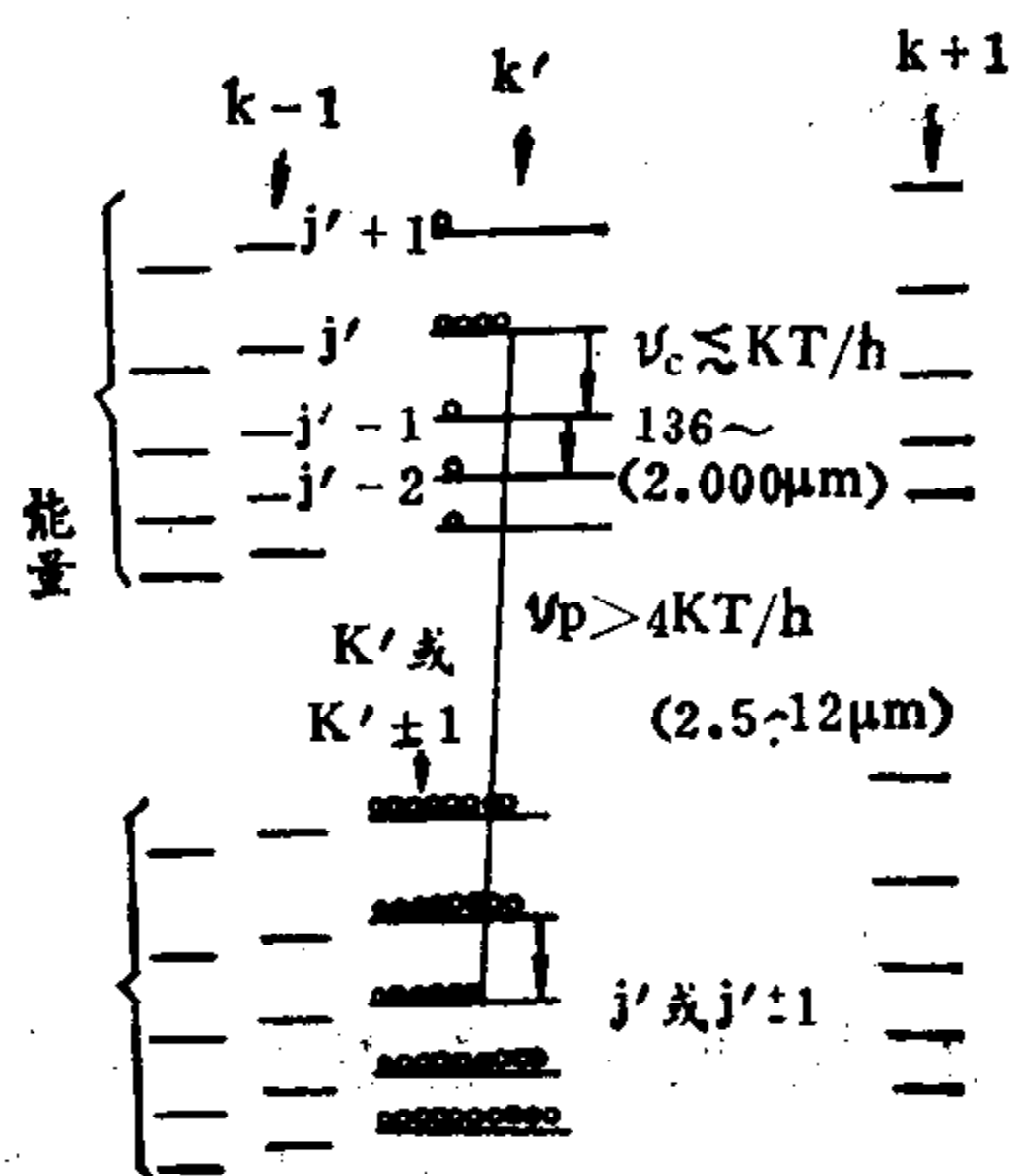


图1.3-79 对称分子部分振-转能级跃迁简图

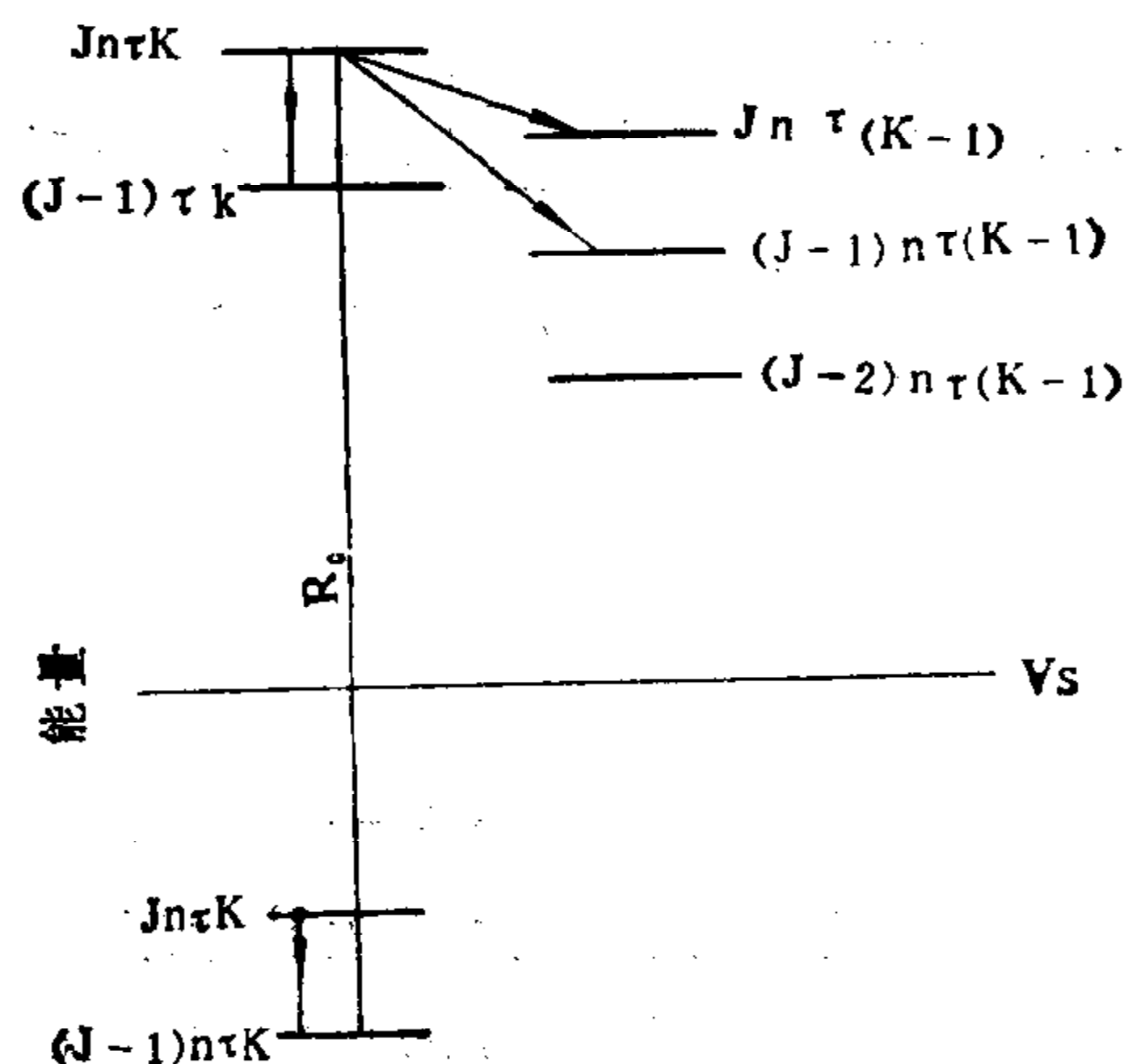


图1.3-80 甲醇分子部分转动能级跃迁图

在非对称极性分子中，情况就比较复杂。如甲醇(CH₃OH)共有12个振动模，但是只有振动模 ν_5 所包含的受阻内转动能级(OH群相对CH₃群的受阻内转动)集中在1033.9厘米⁻¹处，恰好与CO₂激光9.6微米的P支相匹配。内转动能级可用四个量子数 $J(n\tau K)$ 来表示。其中 $J \cdot K$ 表示自由转动量子数， $n \cdot \tau$ 表示受阻内转动量子数。与对称分子一样，受阻内转动能级间可以在CO₂激光的泵浦下建立粒子数反转分布输出远红外激光。跃迁的选择定则是：

$$\Delta J = 0, \pm 1; \Delta K = -1, J = 2 \sim 1, 3 \sim 2, 1 \sim 3;$$

$$\Delta K = +1, J = 1 \sim 2, 2 \sim 3, 3 \sim 3。$$

甲醇在CO₂激光P₃₀支的泵浦下产生远红外辐射的跃迁能级图示于图1.3—80。

光泵远红外(FIR)激光器的增益系数根据定义可表示为

$$g_0(\nu) = \sigma_{ji}(n_j - n_i g_j / g_i) \phi(\nu, \nu_{ji}) \quad (1.3-89)$$

式中 n_j, n_i 分别表示激光上下能级的粒子数密度； g_j, g_i 表示上下能级的简并度； $\phi(\nu, \nu_{ji})$ 为

线型函数； σ_{ji} 为受激发射截面，其值为

$$\sigma_{ji} = 1.2498 \times 10^{-4} \mu_{ji}^2 / \lambda_{ji} \quad (1.3-90)$$

式中 μ_{ji} 为分子的永久偶极矩。由式(1.3—90)可知，在选用工作气体时应选择尽可能大的 μ_{ji} 值，因为它是平方关系，一般要求 $\mu_{ji} \approx 1$ 德拜以上。其次分子的吸收谱线频率与 CO_2 泵浦光源的辐射频率是否匹配也很重要，因为这一点关系到光泵的效率，一般要求两者的频率差在 ± 60 兆赫之内。

光泵远红外激光器的工作气压一般不高，约在0.01~1托之间。其主要原因是一方面极性分子的转动能级间碰撞平衡的速度随工作气压升高而升高，这样将破坏粒子数的反转分布；另一方面是气体下振动态的转动能级对亚毫米波的自吸收现象也随工作气压而升高。所以激光器只能在低气压条件下工作。由于工作气压很低，所以对光的吸收系数也比较低，一般只有0.001~0.00001 1/厘米。这样小的吸收系数，要求激光器有一定的功率输出，自然就存在结构的合理设计问题。

(二) 器件结构

图1.3—81是光泵激光器的一种结构。它主要由一个远红外的F-P共振腔组成，腔镜为平-凹系统。泵浦光束经聚焦后通过一个红外窗片和一个平面反射镜上的锥形孔进入共振腔。马达可用作谐振腔的精密调谐。远红外通过聚乙烯透镜射出腔外。管壳上并联接有充气 and 排气设备。

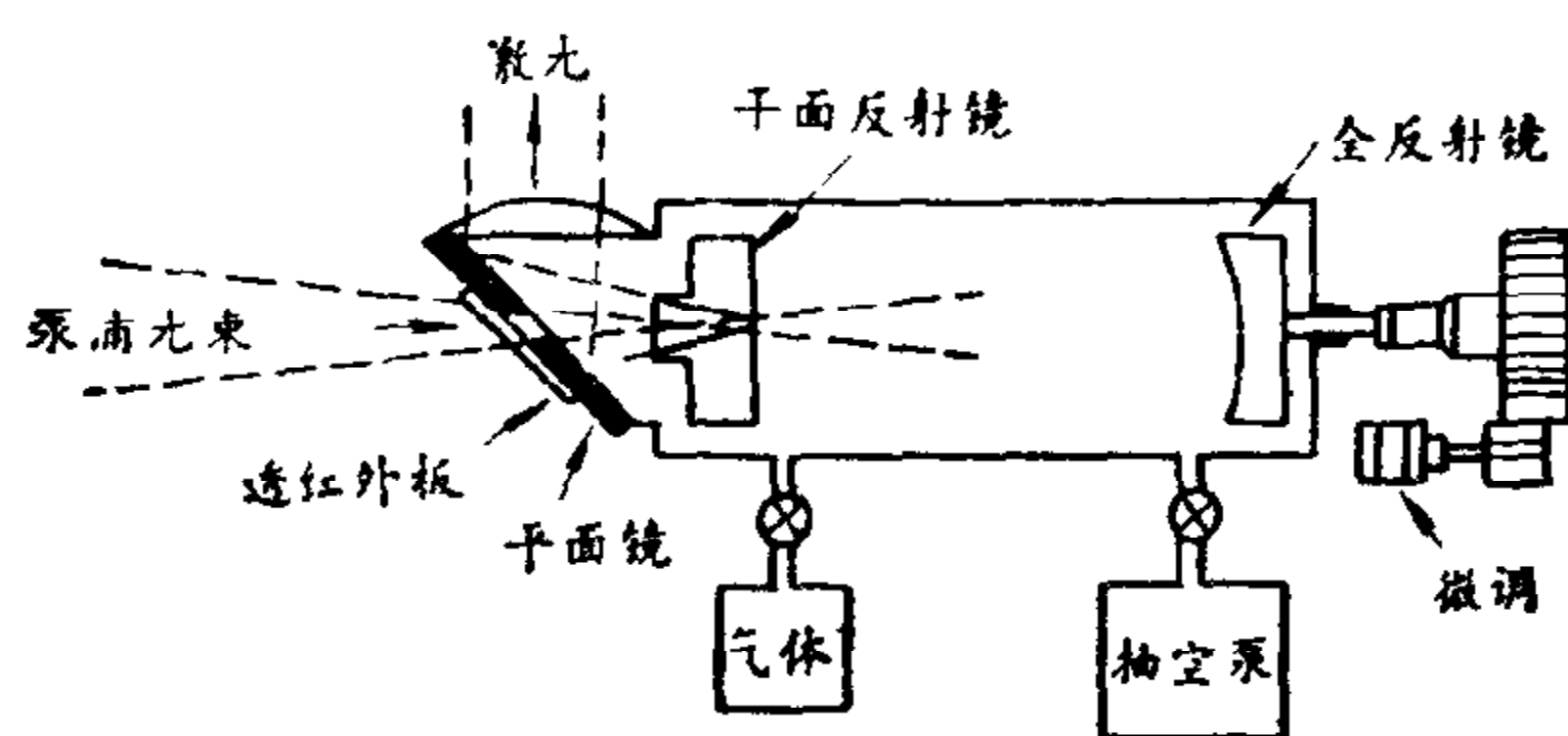


图1.3—81 光泵远红外激光器结构图

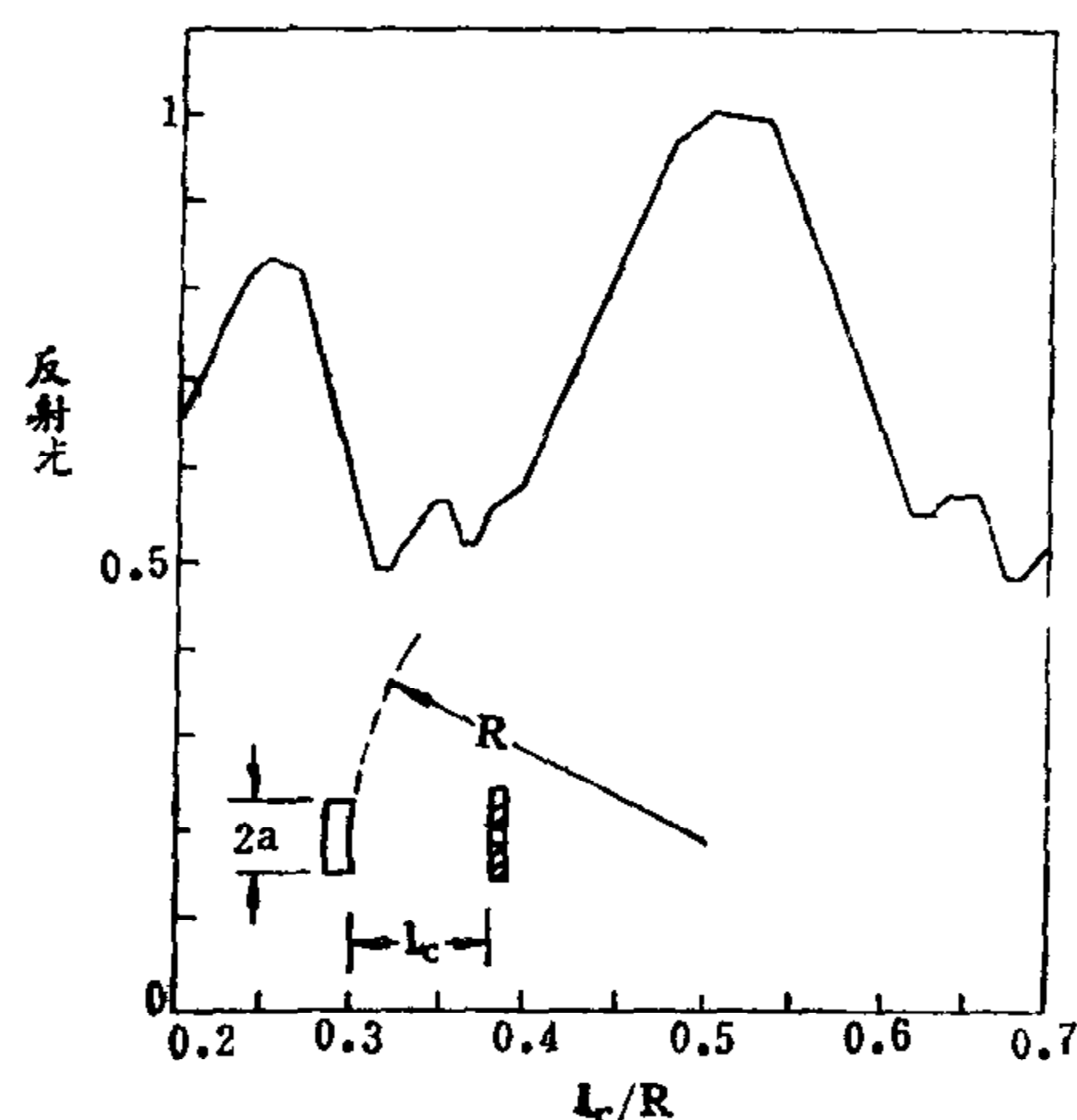


图1.3—82 耦合孔反射特性与 L/R 的关系

为了提高工作气体对泵浦光的吸收，通常的作法是反射镜的内表面上镀有一层对两种光波都是高反射的膜层（金膜或多层介质膜），使泵浦光束由锥形孔射入后能往返传播以增加吸收效果。这时必需很好的选择谐振腔的参数 L/R （ L 为腔长、 R 为镜的曲率半径），否则有可能使泵浦光束只在腔内经过一次往返就原路反射出去。耦合孔反射（对泵浦光入射而言）特性与 L/R 之间的关系如图1.3—82所示。由图中曲线可看出最大吸收发生在 $L/R = 0.3 \sim 0.4$ 或 $0.6 \sim 0.7$ 之间。对输出亚毫米波来说，最好选用 $L/R = 0.5$ ，因为其衍射损耗最小，它相当于半共焦腔。但对泵浦光来说却不利，因为这时泵浦光在腔内只有一次往返就被反射出去了，可见 L/R 值的选取必须折衷考虑。为了减少远红外的损失，耦合孔常作成锥形。

由以上分析可知：输入与输出同时通过一个孔是有矛盾的。为此，输出与输入需要分开，