

轴对称光学无源谐振腔各阶横模的系列计算*

李 先 枢

(中山大学物理系)

徐 家 进

(广州师范学院物理系)

1985年9月10日收到

提 要

本文根据文献[1—3]对普通激光器用轴对称谐振腔中所有阶(实际上)横模进行了系列计算。计算的腔包括对称与非对称的、稳定与非稳定的。得到了673个非涅耳数 $\tilde{N} \leq 5$ (个别的 $\tilde{N} = 8, 10$) 的腔中总共10,790个横模的所有重要性质。计算中还给出了所有横模在镜面上场分布的近似解析表示式。

我们根据文献[1—3]中提出的光学无源谐振腔的矩阵理论,用同一个公式、同一个计算机程序(只是在计算不同腔时使该公式中的几个几何参数取不同值——包括选择不同的参照高斯光场^[4]),对一般激光器中常用的轴对称谐振腔进行了系列计算。这些谐振腔中有对称与非对称稳定腔、和对称与非对称非稳腔(包括非稳腔)共62种。它们的几何参数为 $G_1 G_2 = g_1 g_2 = 0, 0.01, 0.09, 0.25, 0.5, 0.64, 0.81, 0.9025, 1.0, 1.21, 1.44, 1.5625, 2.0, 3.24, 4.0, 5.29, 6.76$; $G_1/G_2 = g_1 a_1^2/g_2 a_2^2 = 0.25, 0.5, 0.75, 1$ (详见表1)。在上述每种谐振腔中,一般都计算了非涅耳数 $\tilde{N} = a_1 a_2 / \pi d = 0.1, 1/\pi, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.5, 2.0$,

表1 各种谐振腔中计算得到的各阶横模(损耗 ≤ 0.99)的总数目

$G_1 \cdot G_2$	0*	0.01**	0.09***	0.25	0.5	0.64	0.81	0.9025	1.0***	1.21	1.44	1.5625	2.0	3.24	4.0	5.29	6.76	合计
G_1/G_2																		
0.25	—	195	193	241	180	180	171	169	154	147	144	—	129	109	75	114	52	2253
0.50	—	201	196	277	226	241	208	212	184	200	167	—	141	122	104	90	78	2647
0.75	—	203	197	283	227	251	218	215	210	209	184	—	152	125	109	98	65	2746
1.0	134	206	198	287	246	252	216	225	233	220	189	193	152	112	111	99	71	3144
合计	134	805	784	1088	879	924	813	821	781	770	684	193	574	468	399	401	266	10790

注: 上表中各腔横模的计算其非涅耳数取值一般为0.1, $1/\pi$, 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5。带“*”的腔没有算 $\tilde{N} = 1.5, 2.5, 5$; 带“**”的腔没有算 $\tilde{N} = 5$ (因损耗太小——低于 10^{-1} , 为节约时间未予计算); 带“***”的腔多算了 $\tilde{N} = 8, 10$, 但模的个数未计入。

* 中国科学院科学基金资助的课题。

表 2 本文结果与国外已有结果对照情况

选作对照的谐振腔的性质			对照横模类型		对照文献
$G_1 * G_2$	G_1 / G_2	非 涅 耳 数	L	P	
0.0	1.0	0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, (1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5)	0	0	[5]
		0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, (1.5, 2, 2.5, 3, 5)	1	0	[5]
0.25	1.0	0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, (2, 2.5, 3, 5)	0	0	[5]
		0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, (2, 2.5, 3, 5)	1	0	[5]
0.5	0.5	0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, (2, 2.5, 3, 5)	0	0	[5]
		0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, (2.5, 3, 5)	1	0	[5]
0.64	1.0	0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, (2.5, 3, 5)	0	0	[5]
		0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, (3, 5)	1	0	[5]
0.81	1.0	0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, (5)	0	0	[5]
		0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, (5)	1	0	[5]
0.9025	1.0	0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, (5)	0	0	[5]
		0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5	1	0	[5]
1.0	1.0	0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 8, 10	0	0	[5-7]
		0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 8, 10	1	0	
		10*	0	1	[7]
		10*	1	1	
1.21	1.0	0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5	0	0	[7, 8]
		0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5	0	1, 2	[8]
		1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5	0	3	[8]
		1.5, 2, 2.5, 3, 5	0	4, 5	
		0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5	1	0	[7, 8]
		0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5	1	1, 2, 3	[8]
		1.5, 2, 2.5, 3, 5	1	4	[8]
1.44	1.0	3, 5	1	5	[8]
		1*	0	0	[7]
		1*	1	0	
1.5625	1.0	0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5	0	0, 1, 2, 3	[8]
		1.5, 2, 2.5, 3, 5	0	4	[8]
		0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5	1	0, 1, 2, 3	[8]
		3, 5	1	4	[8]
6.76	1.0	0.1, 1/ π , 0.5, 0.7, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5	0	0, 1, 2	[8]
		1.5, 2, 2.5, 3, 5	0	3	[9]

注: 表中第 3 列中未加括号的数字, 表示与文献结果对照了第 4, 5 列中所示横模的损耗与相移值的腔的非涅耳数; 括号内的数字表示只与文献结果对照了上述横模的相移值(损耗值难于对照)的腔的非涅耳数; 下面加一横的数字表示对上述横模的损耗、相移及场分布曲线都进行了对照的腔的非涅耳数; 加*号的数字是只对照了场分布曲线的腔的非涅耳数。在非稳腔情形, P 的大小表示横模损耗大小的顺序。

2.5, 3.0, 5.0 (F-P 腔还计算了 $\tilde{N} = 8, 10$ 的情形) 的各个腔. 获得了所有这些腔, 共 673 个, 腔中 L 为 $0-10$, $P \geq 0$, $10^{-15} \leq \text{损耗} \leq 0.99$ 的所有各阶横模共 10,790 个的特性: 本征矢、本征值、损耗、相移及镜面上横模场的相对振幅与相对位相分布曲线. 因为非对称腔两个端面上的场分布曲线是不同的, 故所得此种曲线的总数为 $2 \times 18,446$ 条. 其中每一条曲线由圆反射镜直径上 101 个等距离的点上的值表示. 又由于场表示方法的特点^[1], 和已给出参照光场, 上述本征矢的各分量便给出镜面上场分布的近似解析表示式.

所得结果绝大多数是未见发表过的. 其余的, 选择各种典型情况将所得结果与国外已有的计算结果^[5-8]进行了比较. 对比过的结果有 11 种不同腔中的各阶横模的损耗值 327 个, 相移值 371 个, 以及场分布曲线 2×24 条 (详见表 2). 这 11 种腔中有对称稳定腔、非对称稳定腔和对称非稳腔. 对照过的横模有上述各种腔中菲涅耳数不同的一些腔中的基横模与高阶横模. 我们所得到的所有这些结果全部与上述已有结果在后者的报道精度内符合. 至今尚未发现过所得结果与已有国外无争议结果不符合的情形.

全部计算是在 IBM4341 型计算机上进行的. 矩阵方程用 QR 法求解并使用标准的计算机程序. 对各类腔中矩阵元素的计算误差曾经进行过多种检验. 对自洽场矩阵方程求解中的误差, 以及对方程截取为有穷阶后解的稳定性问题, 在计算中都进行了检验计算. 计算基模损耗 $> 10^{-10}$ 的腔一般可用有 14 位有效数字的双精度, 在计算基模损耗更小的腔时应用了有效数字达 30 位的超双精度. $\tilde{N} = 5$ 的所有腔的自洽场矩阵方程截取的最高阶数为 35 阶. 计算中发现不同腔计算速度不同, 所需截取的矩阵方程的阶数也不同. 并且, 计算速度与阶数均与参照高斯光场的选择有关. 一般说来, 非稳腔计算速度较高. 矩阵方程截取为同样阶数时可以计算菲涅耳数较大、甚至大得多 (与稳定腔比较) 的非稳腔中的模式. 计算一次 $G_1 G_2$ 取一定值, $G_1/G_2 = 0.25-1$, $\tilde{N} = 0.1-5$ 的一组稳定腔 (共 44 个腔) 中前述所有各阶横模 (约 800—1000 个) 的各种特性, 包括对解的稳定性的检验与解方程误差检验等计算在内, 约需 CPU 运行时间 80 分钟.

当所计算的 $\tilde{N}$ 增加时, 矩阵方程须截取的阶数便近于成正比地增加. 此时高阶光传播矩阵元素计算中, 一般会出现损失掉较多位有效数字的现象, 并且还会出现稳定腔基横模损耗急剧减小的现象. 后两种现象都要求在计算中采用较多位数的有效数字. 目前备有应用 30 位以至 62 位有效数字进行计算的软件, 并且较大容量的计算机也已相当流行. 因此, 我们估计, 如果需要, 应用文献 [1—4] 中方法计算菲涅耳数更大的上述各种谐振腔中的各阶横模特性, 应无原则性困难. 似乎可以这样认为: 本文所报道的此类光学无源振腔的系列计算, 实际上已可方便地进行了.

参 考 文 献

- [1] 李先枢, 物理学报, **30**(1981), 1325.
- [2] 李先枢, 物理学报, **32**(1983), 990.
- [3] 李先枢、高燕球、陈志恬、冯镇业, 物理学报, **32**(1983), 1002.
- [4] 徐家进、李先枢, 中山大学学报(自然科学版), 待发表.
- [5] T. Li, *Bell System Tech. J.*, **44**(1965), 917.
- [6] A. G. Fox & T. Li, *Bell System Tech. J.*, **40**(1961), 453.
- [7] H. Kogelnik & T. Li, *Appl. Optics*, **5**(1966), 1550.

[8] A. E. Siegman & H. Y. Miller, *Appl. Optics*, 9(1970), 51.

A SERIES CALCULATION FOR TRANSVERSE MODES IN AXIAL-SYMMETRIC OPTICAL PASSIVE RESONATORS

LI XIAN-SHU

(Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou)

XU JIA-JING

(Department of Physics, Guangzhou Teacher's Collage, Guangzhou)

ABSTRACT

On the basis of the references [1—3], we carried out a series calculation for all order (practical) transverse modes in axial-symmetric resonators used in common lasers. The calculations covered symmetric and asymmetric, stable and unstable resonators. All of the important characteristics of 10790 transverse modes in 673 resonators with Fresnel number $\tilde{N} \leq 5$ (individually $\tilde{N} = 8, 10$) were obtained.