

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.

光盘以及商用和家用电子器件中,而在许多需要高质量激光束的应用领域,比如精密检测、计量等,氦氖激光器目前仍处于无可替代的地位,享有“检测之王”的美誉.其销路仍还在扩大,全世界现约有 50 万支的年产量.

另一方面,氦氖激光器本身也在不断发展和进步.促成这种进步的诸多技术中包括同轴设计的结构、铝制冷阴极、硬膜光学元件,以及先进的封接技术等等.特别是随着薄膜光学和激光器制造技术的进步,以及激光应用领域的扩展,推动着氦氖激光器新谱线的产生.第一台氦氖激光器输出的只是红外光(波长为 1152 nm).而真正得到广泛应用的红光(633 nm)氦氖激光器是 1962 年在美国出现的,在我国则是 1963 年.进入 70 年代以后,氦氖激光器除能产生可供实用的红外光(1152 nm, 1523 nm, 2396 nm 和 3392 nm 等)以及红光(633 nm)之外,已开始在可见光区向短波方向的发展,并相继推出橙红光(612 nm)、橙黄光(605 nm)和黄光(594 nm)氦氖激光器.由于物理以及技术的条件因素,出绿光(543 nm)则比较艰难;它的发展分为两个阶段:首先是外腔式绿光氦氖激光器(见图1),美国的 D. L. Perry 于 1970 年在实验室里利用带色散棱镜的长放电管、外腔反射镜和热阴极等最先观察到绿光 543 nm 谱线振荡^[1],但真正形成外腔式商品也是进入 80 年代以后的事情了.至于最能标志商品化水平、应用最广泛的全内腔绿光氦氖激光器(见图2)则是第二阶段的成果.这种激光器的两个反射镜直接密封在激光放电管的两端,腔内再无任何光学元件,故结构更紧凑,工作更可靠,使用更方便.但它直到 1985 年才由美国的 Melles Griot 公司首次推出.接着在德国^[2],如今又在中国也都研制成功这种全内腔绿光氦氖激光器,这就使得氦氖激光器喜获新生,再造辉煌,形成了绚丽多彩的氦氖激光器多波长系列产品.

全内腔绿光氦氖激光器不仅可在某些场合下替代常规红光激光器的应用,而且有着比红光氦氖激光器更加诱人的应用前景.这是由于

绿光具有三个独特的优点:一是人的视觉对绿光最敏感.因此,对于用人眼作传感器的任何应用,例如准直、监测、显示等等,选用绿光是最合适的;绿光又是大自然中最柔和的色光,是绿色植物为人类创造的理想色泽环境,所以绿光为多色指示器和艺术布景等增添了一种重要的色彩.二是绿光在水中的吸收损耗小,穿透能力强,可以用作水中照明、深海通讯等,因而具有较高的商业和军事应用价值.在基于新的米定义的长度计量中,氦氖绿光 543 nm 谱线还以其稳定性和再现性好而可能成为一种新的国际波长标准.三是医学应用中,红光易与血液、肌肉的颜色混淆,用绿光就绝无此虑.所以将绿光激光器用于外科手术指示器、生物组织部位瞄

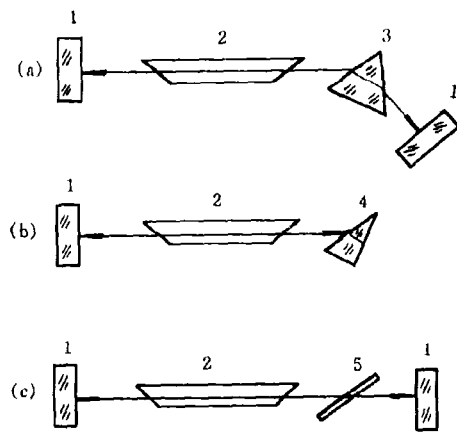


图1 几种外腔式绿光氦氖激光器结构示意图
1——绿光高反膜片; 2——激光放电管;
3——布儒斯特棱镜; 4——利特罗棱镜;
5——双折射调谐器

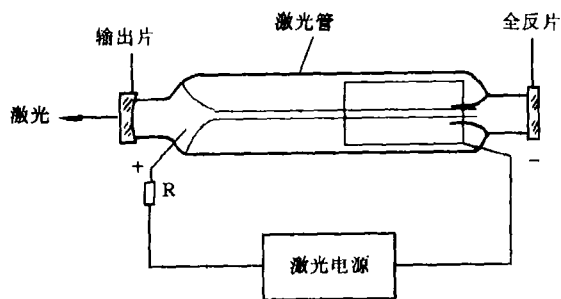


图2 全内腔绿光氦氖激光器装置

准、血管造影和内窥镜等,实在妙不可言,亟待开发应用。但是目前国际上少数几种能够产生绿光的激光器如氩离子激光器, YAG 倍频激光器和更新一点的水银激光器都比较庞大复杂,价格昂贵,寿命一般不长,稳定性及灵活性都差。即使是前程看好的半导体绿光激光器,目前在光束质量和模式等方面都还无法同绿光氩氦激光器媲美。因此,在普通氩氦激光器家族中绽开的绿色奇葩——全内腔绿光氩氦激光器的确有着特殊重要的意义。

2 氩氦绿光为何难出

同红光氩氦激光器相比,全内腔绿光氩氦激光器的出现在美国晚了 20 多年,并且至今只有美国、德国有产品。我国的氩氦激光器研制在 60 年代与美国几乎是并行的,但却到了 80 年代中期才实现外腔式绿光氩氦激光振荡^[3];而在全内腔方面,则更走过了一段艰难的历程,中间虽经一些单位多年攻关,皆未取得突破。直到 1994 年 7 月才由国防科技大学高伯龙教授等首次研制成功全内腔绿光氩氦激光器,使我国成为继美、德之后第三个掌握这种激光器制造技术的国家,从此圆了国内许多人做了 30 余年的氩氦绿光之梦。

氩氦绿光难出,原因当然是多方面的。主要还是全内腔绿光氩氦激光器的技术要求高,研制难度大。要从激光原理上把这点说明白,必须先了解激光的产生过程。我们知道,微观的物质系统(原子、分子、离子、晶体等)具有一系列分立能级。当辐射场与其相互作用时,引起能级之间的跃迁。这种辐射跃迁总是存在着自发辐射、受激发射以及受激吸收三种类型;且在正常情况下由于处在低能态的粒子数密度总是大于高能态的粒子数密度,所以总的的作用效果是受激吸收大于受激发射。这就是尽人皆知的所谓光入射到介质中去均发生吸收现象的原因。但是,如果借助于外界能源的激励(称为泵浦),破坏正常的热平衡状态,就有可能使得处于高能态的粒子数密度大大增加,以至达到高于低能态

的粒子数密度的分布状态,这叫做粒子数反转。实现了粒子数反转的工作物质称为激活介质。当入射光(介质内部的自发辐射即可充当入射光)通过激活介质时,光的受激发射就有可能大于光的受激吸收,光通过激活介质将愈走愈强,发生增益现象(或称光量子放大)。利用光学谐振腔(由两块反射镜组成——其中一块为全反射,另一块为部分反射)产生反馈,则可使这种光量子放大得以维持,形成振荡而得到充分放大,输出大量在频率、相位、偏振、传播方向上都与外来光子完全一致的光,这就是激光。

氩氦激光器利用氩原子作为工作物质,氦原子作为辅助气体可以提高激励效率。氩氦激光具有丰富的振荡谱线,是由于氩原子具有众多的精细结构子能级所致。图 3 是氩、氦原子部分能级跃迁示意图。其中氩的 1S, 2S, 3S 激发态都各由四个子能级组成,而 2P, 3P 激发态则分别包含了十个子能级。在辉光放电条件下,由于电子碰撞激发,很容易积累起相当数量的处于 2^1S_0 或 2^1S_1 亚稳态的 He^+ 原子。这些 He^+ 原子又在与氩原子的碰撞过程中,通过无辐射跃迁,而把氩原子由基态激发到 3S 或 2S 等激发态。这个过程称作共振能量转移。正是它造成了以 3S 和 2S 各激发态为上能级、以 2P 和 3P 各激发态为下能级的许多对能级之间的粒子数反转,因此竟可以在这些能级之间获得二百余条激光跃迁谱线,波长范围覆盖了从可见到红外的一大片光谱区。绿光 543 nm 谱线就是氩原子 $3S_2-2P_{10}$ 之间的辐射跃迁^[4]。

然而,很可惜,要使绿光 543 nm 谱线得到稳定的激光输出,甚至成为激光产品,并不是一件容易的事。首先,543 nm 谱线的增益很低。根据激光原理,谱线的小信号增益系数可有如下的表示式^[5,6]:

$$G = K \cdot \Delta N \cdot A \cdot \lambda^3$$

式中 K 为与温度和质量有关的比例系数, ΔN 是上下能级间的粒子数密度反转值, A 为上能级的自发辐射系数(它通过爱因斯坦系数与受激发射系数相联), λ 为受激辐射谱线的波长。

由此可得到后面的表1. 从表 1 列出的数据可以看到, 绿光 543 nm 谱线是 $3S_2 - 2P$ 系列的 9 条可见光谱线中增益系数最低的一条, 约为红光 633 nm 谱线增益的 $1/29$, 比 3392 nm

谱线的增益则小 4—5 个数量级. 因此, 为满足绿光振荡阈值条件(即增益大于损耗), 必须尽量减小腔内损耗, 否则不可能获得 543 nm 绿光输出.

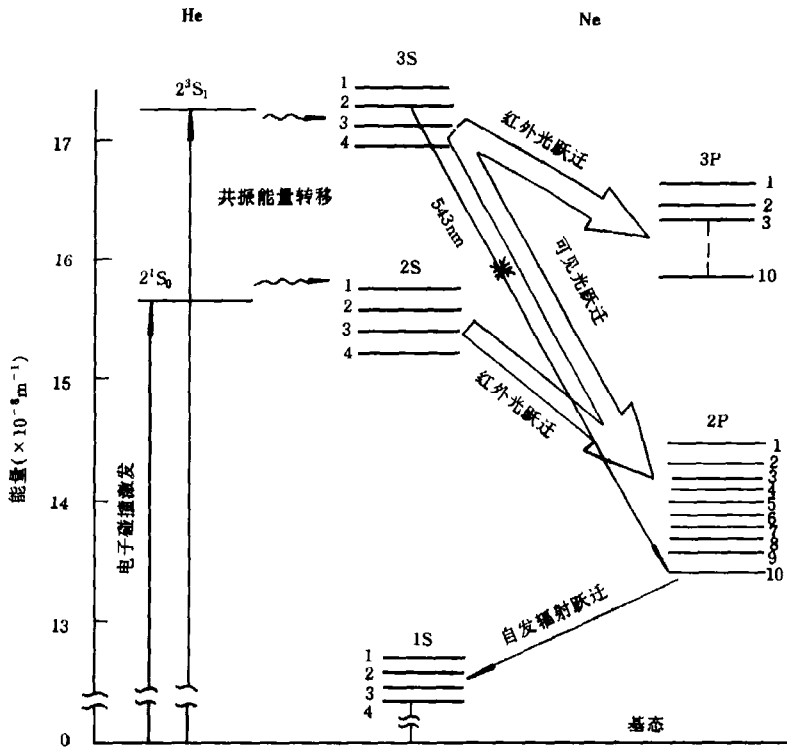


图3 氦、氖原子的部分能级跃迁示意图

举一个例子: 放电长度 $l=350$ mm, 毛细管直径 $d=1.4$ mm 的氦氖激光器, 红光 633 nm 谱线的最大双程增益可达 15%, 而绿光 543 nm 谱线的相应值估计只有 0.5%. 实际上由于种种原因, 往往还到这个值. 这样, 绿光片的损耗(包括两个片子的全部散射、吸收, 全反片的透射损耗, 输出片的激光输出), 加上光束过毛细管必有的双程衍射损耗等之和应小于 0.3—0.5%. 这是留给光学薄膜攻关和激光器制造技术所要解决的艰难任务.

其次, 绿光 543 nm 谱线与其它 8 条可见光谱线(甚至还有增益极高的 3392 nm 谱线)共上能级 $3S_2$, 这样势必造成激烈的谱线竞争效应. 即一条激光谱线产生振荡以后, 因消耗上

能级的粒子数, 将使其他激光谱线的反转粒子数密度降低, 从而使其增益和输出功率降低、不稳甚至完全被抑制^[7]. 在这场竞争中, 增益最低的绿光 543 nm 谱线处在最为不利的地位. 它的粒子数密度反转值本来已经最小, 若有其他谱线跃迁消耗了上能级的粒子数, 则其反转值将变得更小, 这就更不容易形成绿光振荡了. 所以必须采取比对红光氦氖激光器还要严格得多的抑制 3392 nm 谱线的措施, 并且同时抑制 633 nm 和其他谱线, 为 543 nm 谱线创造极好的振荡条件, 才能获得全内腔绿光氦氖激光器的成功. 在外腔式激光器中, 人们常常采取腔内加色散棱镜的办法来抑制其他谱线, 尽管这会增加腔内损耗(只好靠增加腔长予以弥补), 但

在抑制其他不需要的谱线方面非常有效(有时还可做成包括绿光在内的多波长可调谐氦氖激光器^[8]),并且还能放宽对反射膜片的要求.如果外加适当的纵向非均匀磁场,使产生所谓的“塞曼展宽”,还可进一步抑制 3392 nm 谱线的超辐射,更有利于绿光 543 nm 谱线的振荡.这也就是外腔式绿光氦氖激光器能够首先获得成功的原因.它带来的问题是结构比较复杂,使用不方便,性能难以稳定.因此,人们更孜孜以求全内腔绿光氦氖激光器.在全内腔型中,使用色散元件来抑制其他谱线是不可能的了.只能依靠先进的镀膜技术,研制优质绿光膜片,使它只对绿光 543 nm 谱线具有极高的反射率和极低的损耗,对其他不需要的谱线则有强烈的透射

损耗作用.另外,全内腔型激光器在对膜片耐放电辉光和时效性能上的要求比外腔式激光器苛刻得多.因此,光学薄膜技术是全内腔绿光氦氖激光器的技术关键.全内腔绿光氦氖激光器的制造工艺技术(比如调腔精度、封接技术、排除杂气污染等)也比外腔式复杂和困难得多.由于工艺一致性不易保证,目前全内腔绿光氦氖激光器的输出功率等性能还有待进一步提高.以美国最重要的一家氦氖激光器厂商 PMS 公司为例,其腔长为 340 nm 的全内腔绿光氦氖激光器产品,单模功率变化范围为 0.2—1.0 mW,多模功率为 0.35—1.5 mW.可见其零散度很大.

表1

谱线跃迁	波长 λ (nm)	上能级自发辐射系数 $A(10^6/s)$	粒子数密度反转值 ΔN	增益系数比较 $G(\lambda)/G_{633}$
$3S_2 \rightarrow 2P_1$	730	0.26	0.740	0.12
$3S_2 \rightarrow 2P_2$	640	1.39	0.715	0.41
$3S_2 \rightarrow 2P_3$	635	0.35	0.808	0.11
$3S_2 \rightarrow 2P_4$	633	3.39	0.739	1
$3S_2 \rightarrow 2P_5$	629	0.64	0.701	0.18
$3S_2 \rightarrow 2P_6$	612	0.61	0.683	0.15
$3S_2 \rightarrow 2P_7$	604	0.23	0.731	0.06
$3S_2 \rightarrow 2P_8$	594	0.20	0.479	0.05
$3S_2 \rightarrow 2P_9$	禁戒跃迁			
$3S_2 \rightarrow 2P_1$	543	0.28		0.035

3 绿光氦氖激光器是高科技的结晶

研制全内腔绿光氦氖激光器,需要攻克两个方面的技术难关,第一是光学薄膜技术,第二是激光器制造技术.

镀了多层介质薄膜的反射镜片是构成激光器谐振腔的主要元件,典型的全介质高反膜的基本结构,是由高、低折射率材料经真空交替蒸镀而成的多层膜堆,每层膜的厚度均为中心波长的 $1/4$.这种多层膜称为 $\lambda/4$ 膜系.其优

点是计算和制备都比较简单,缺点是层数较多,反射率不能连续改变.另一种非 $\lambda/4$ 膜系则与上述情况刚好相反.

不论以上何种膜系,从理论上说,只要层数足够多,反射率可无限地接近于 100%;但实际上由于膜层的吸收、散射损耗,使得膜系在达到一定的层数后,继续加镀膜层不但不能增加其反射率,有时甚至还引起反射率的下降.因此,提高反射膜的反射率只有依靠减少膜层的光学损耗来实现.

高反膜中膜层的散射损耗要比吸收损耗严

重得多。薄膜的成核和生长,会引起膜层微观结构的不均匀性,从而产生散射。借助于电子显微镜观察多层膜横断面的微观结构证实,几乎所有的真空蒸镀薄膜,都呈现非常明显的柱状结构,使得膜层内部充满气隙而表面变得凹凸不平。此外基片表面的粗糙度及其缺陷也会复现到各个薄膜界面上去。还有蒸发源喷溅的粒子、膜层中的微粒、裂纹和针孔等因素,相互交叉,构成复杂的散射模型。

另外,膜层结构上的缺陷也是引起薄膜光学不稳定性的主要原因。

因此,要制备耐放电辉光、损耗极低、均匀性好、膜层厚度准确的优质绿光膜片,必须解决当今薄膜光学领域中的一系列理论和技术工艺难题。首先,膜系的设计要遵循尽量降低光学损耗、高度抑制 3392 nm 和其他不需要的谱线、以及简单易实现、工艺上不能太繁琐的重要原则。其次,要发展基片超光滑表面抛光技术(这在我国才刚刚起步),和相应的光学检测及表面分析手段。改善薄膜结构特性的主要途径则是:深入研究和选择镀膜材料,建立高精度的膜厚监控系统,优化控制薄膜制备参数,以及改进淀积方法等等。以推进氦氟激光产业化而久负盛名的美国 Uniphase 公司总裁 Dale Crane 曾经用“超镜”(Supermirror)来形容全内腔绿光氦氟激光器用的优质高反膜片。他们利用激光陀螺研制中的一些非常规镀膜技术(如离子束溅射加离子束辅助镀膜,还有低压反应离子蒸镀技术等),命名得绿光膜片的吸收、散射总损耗从数千 ppm 降低到 50 ppm 以下^[9]。这是他们的全内腔绿光氦氟激光器取得成功的关键所在。国防科技大学高伯龙教授等科技人员潜心光学薄膜技术研究和攻关十多年,在许多关键技术上取得了突破性的进展,从而在国产镀膜机上成功地镀制出全腔绿光氦氟激光器用的优质高反膜片,在国内实现了全内腔绿光膜片零的突破。其主要性能指标为:

全反片: $R(543 \text{ nm}) > 99.9\%$,

$R(3392 \text{ nm}) = 0.1 - 0.2\%$;

输出片: $R(543 \text{ nm}) > 99.8\%$,

$R(3392 \text{ nm}) = 0.2 - 0.9\%$,

$T(543 \text{ nm}) = 0.08 - 0.11\%$,

$T(594 \text{ nm}) > 2\%$, $T(612 \text{ nm}) > 10\%$,

$T(633 \text{ nm}) > 40\%$, $T(1152 \text{ nm}) > 70\%$,

在激光器制造技术方面,除了根据全内腔绿光氦氟激光器的理论和特点,选择合适的谐振腔参数、确定放电毛细管直径、最佳充气比和总气压之外,在制管技术、封接技术、调腔精度、清洗技术、排除杂气等方面都比研制红光氦氟激光器要求更高、更严、更仔细。由于绿光 543 nm 谱线增益很低,只有红光的 1/29,腔内稍有污染,对红光激光管关系不大,而绿光就可能出不来了,或者使绿光功率大大下降(实践证明,腔内损耗增加 0.01%,即可使绿光输出功率下降百分之几甚至百分之几十)。因此,全内腔绿光氦氟激光器制造技术的关键是要使引入的附加损耗尽量小,并且保证激光器的长寿命。目前全内腔绿光氦氟激光器的寿命已超过上万小时,且还大有潜力可挖。国防科技大学在绿光氦氟激光器制造中,使用自行研制成功多年并经受了长期考验的钨封接技术,具有工艺简单、可调节、对片子污染轻、封接温度低、应力小等特点,对红光氦氟激光器的寿命已超过四年以上。他们首批研制成功的全内腔绿光氦氟激光器的规格为:腔长 310—420 nm,输出功率为 0.26—0.65 mW,纯绿,单模,主要性能指标达到了国际先进水平。世界上最早研制成功全内腔绿光氦氟激光器的美国 Melles Griot 公司 1994 年推出的产品介绍如表 2 所示^[10];

未来全内腔绿光氦氟激光器的发展趋势,仍是随着薄膜光学和激光科学技术等高科技事业的发展,继续提高膜片的质量,提高调腔和封接技术水平,进一步降低损耗,提高寿命,同时采取各种措施,进一步提高绿光输出功率,以适应更广更高的使用要求。

表2

最小功率 单模(mW)	光束直径 (nm)	发散度 (mrad)	偏振度	纵模间隔 (MHz)	重量 (kg)	标称工作 电流(mA)	工作电压 (VDC)	产品编号
0.2	0.63	1.26	随机	732	0.34	4.5	1600	05LGR025
0.5	0.77	1.07	随机	438	0.61	6.5	2400	05LGR151
0.75	0.75	0.92	随机	373	0.61	6.5	2650	05LGR173
0.3	0.75	0.92	500:1	373	0.61	6.5	2650	05LGR173
1.5	0.80	0.86	随机	328	0.68	6.5	3000	05LGR193

参 考 文 献

- [1] D. L. Perry, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-7**(1971), 102.
- [2] W. Luhs, B. Struve, G. Litfin, *Laser und Optoelektronik*, **Nr. 4**(1986), 319.
- [3] 林贞平, 王广浩, *激光杂志*, **4**(1990), 185.
- [4] S. Inatsugu and J. R. Halmes, *Phys. Rev. A*, **4**(1973), 1678.
- [5] 游大江、李 桦、郑乐民等, *北京大学学报(自然科学版)*, **2**(1983), 75.
- [6] J. M. Bridges and W. L. Wiese, *Phys. Rev. A*, **2**(1970), 285.
- [7] Robert G. Knollenberg, *SPIE*, **742**(1987), 2.
- [8] 于澍生、李庆国、杜龙龙等, *中国激光*, **12**(1993), 892.
- [9] 邓鸿林, *激光集刊*, **3**(1993), 17.
- [10] *Melles Griot Laser & Instruments Guide*, (1994), E. 3.

光学双稳态研究 20 年*

李 淳 飞

(哈尔滨工业大学物理系, 哈尔滨 150001)

摘 要 综述了光学双稳态的概念和理论以及光学双稳态器件的分类和材料研究. 重点介绍了半导体光双稳器件研究的发展, 并且指出了光学双稳态研究的最新进展、应用前景和目前的困难.

关键词 光学双稳态, 光双稳器件

自从 1975 年贝耳实验室的吉布斯等人在实验中发现光学双稳态以来, 光学双稳态研究在 20 年中有很大进展. 各种形式的光学双稳态现象不断发现, 使人们对光学双稳态的认识不断加深; 各种光学双稳态器件的材料和结构不断发展, 使光学双稳态作为一种以光控光的器件更接近实际应用. 本文试图以通俗和简练的方式较系统地介绍光学双稳态的基本概念、主要理论和光双稳器件的分类. 重点介绍研究最多的半导体双稳器件的发展. 并讨论光双稳器件对材料性能的要求以及它们目前在应用研究中的新进展. 作者谨以此文纪念光学双稳态研

究 20 周年.

1 光学双稳态的概念

光学双稳态是指光学系统中在一定的输入范围内对给定的输入存在着两种可能的输出状态的现象. 值得注意的是, 这两种状态必须可以互相转换. 以光强状态为例, 具有光学双稳态的系统, 其输出光强和输入光强的关系呈现如图 1 所示的滞后回线. 光学双稳态的必要条件

* 1995年2月13日收到初稿, 1995年6月7日收到修改稿.