

中国科学院上海光学精密机械研究所

研究报告集

第一集

钕玻璃激光器

(内部资料)

1973

中国科学院上海光学精密机械研究所

研 究 报 告 集

第 一 集

钕 玻 璃 激 光 器

(内 部 资 料)



1 9 7 3

毛主席语录

自然科学是人们争取自由的一种武装。人们为着要在社会上得到自由，就要用社会科学来了解社会，改造社会进行社会革命。人们为着要在自然界里得到自由，就要用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，从自然里得到自由。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

前 言

本集选编了一九六四年以来我所有关多脉冲钕玻璃激光器的部分研究报告共34篇。报告反映了钕玻璃激光器发展过程中所遇到的有关问题。初期,为提高多脉冲钕玻璃激光器的输出能量,扩大了工作物质的几何尺寸,采用了矩形光脉冲激励,拉长了氙灯发光时间,并从接棒发展到多级放大。随着认识的不断深化,激光器的亮度逐步成为研究工作的主题。为提高激光器的亮度,在改善器件方向性方面,研究了腔的结构,诸如长腔、运动腔、不稳定腔、方棒激光器和片状激光器等;用干涉法、尖劈法观察了钕玻璃棒的热畸变,还用网格成象等方法观察了激光通过钕玻璃放大器时所出现的弥散现象。提高激光器亮度的另一个重要方面是提高钕玻璃的破坏强度。对此,研究了钕玻璃的破坏现象与器件参数的关系。在放大器结构上采用了扭镜、摆镜等方式使光束运动,从而提高钕玻璃的破坏强度,有效地抑制了弥散。此外,还测量了激光光束的尖峰结构、激光光谱、偏光特性,讨论了腔内光子密度的轴向分布,总结了激光能量和功率的测量方法。

本集仅反映过去七、八年来我所多脉冲钕玻璃激光器研究的历史概貌,由于时间短促,工作报告收集得还很不完整,待以后再补。在编辑出版过程中,由于编者水平有限,有不当之处,望读者批评指正。

编 者

目 录

增大钕玻璃激光器输出能量的若干实验结果

.....王之江 沈冠群 蔡英时 李成富 张正泉 王维瑞等.....	(1)
矩形光脉冲电源的设计和制作.....	向立人.....(17)
拉长激光振荡时间的若干问题.....	黄庆翀 陆世桢.....(25)
论固体激光器的振荡过程.....	王之江.....(31)
接棒实验.....	李树本 张正泉 张伟清.....(37)
短棒串接放大器.....	陈守华 蔡希洁 陈学道.....(51)
氙灯发光时间对激光器效率的影响.....	陈建文 李成富.....(53)
脉冲固体激光器输出光束的方向性.....	王之江 王能鹤.....(57)
远离式平行平板腔对钕玻璃激光振荡器输出方向性的影响	
.....陈 兮 张义山 陈炎兴 徐德衍 刘 伟 范俊颖 黄鹤年 施津川.....	(60)
钕玻璃不稳定腔激光器.....	梁培辉 张贵芬 卢仁祥 裘佩霞 童兴发.....(67)
片状激光放大器.....	蔡英时 滕永禄 胡文富 王志英 陈炎兴 田 莉 谢怀家.....(73)
钕玻璃棒热畸变的干涉法测量.....	蔡英时 王能鹤 韩景春 付淑芬.....(75)
钕玻璃棒热形变的尖劈法测量.....	蔡英时 付淑芬 王能鹤 韩景春.....(80)
钕玻璃中的弥散现象的测量与分析.....	陈守华 蔡希洁 戎忠华.....(83)
强激光在玻璃中引起的弥散现象.....	伍树东 徐德衍 张立芬 施津川.....(89)
激光作用下钕玻璃破坏的若干问题.....	李成富 沈湛群 谢怀家.....(92)
玻璃破坏与自聚焦.....	郭权和 王能鹤 王笑琴 付淑芬.....(99)
扭镜对提高钕玻璃激光器性能的作用.....	邓锡铭 刘汉勋 黄关龙 张伟清.....(104)
激光束的运动方式对钕玻璃破坏阈值的影响.....	邓锡铭 刘汉勋 王能鹤.....(109)
考虑空间不均匀时的激光振荡特性.....	沈冠群.....(114)
关于激光振荡通道的实验结果.....	方洪烈 王成方 沃敏政 徐志明.....(120)
多模高能钕玻璃激光器的尖峰结构.....	梁培辉 刘玉璞 项惠珠.....(125)
高能激光器输出光束的近场图分析.....	梁培辉 刘玉璞 项惠珠.....(130)
间断脉冲放大器.....	张伟清 刘汉勋 邓锡铭 黄关龙.....(133)
放大增益测量小结.....	万承国 徐毓光 茅文英 张正泉 蔡英时 戴美兰.....(139)
钕玻璃热致双折射对激光方向性影响的实验.....	梁培辉 刘玉璞 项惠珠.....(147)
多台组合振荡器.....	付淑芬 李成富 邓锡铭 肖剑南.....(149)
几种光学共振腔特性的实验研究.....	赫光生 蔡希洁.....(153)
激光光谱测量小结.....	万承国 徐毓光 舒美冬 张国轩 茅文英.....(162)
钕玻璃激光器产生偏振激光实验小结.....	林文青 沃敏政.....(166)
关于推广使用半导体光电二极管测量激光能量、功率和波形的建议	向立人.....(171)
炭斗接收器的定标小结.....	王宏宇 王瑞华 于桂秋 赫光生.....(178)
中温黑体炉绝对辐射标准建立研究.....	赫光生 王瑞华 于桂秋 陈仲裕 张影华.....(184)
用光学矩阵及贯线图计算多级放大器中反馈象点的位置.....	卢仁祥.....(190)

增大钹玻璃激光器输出能量的若干实验结果

王之江 沈冠群 蔡英时 等
李成富 张正泉 王维瑞

一、研究概况

通过六三年对小尺寸($\phi 6$ 、 $L40 \sim \phi 12$ 、 $L100$)红宝石激光器所做的实验工作,初步确定了小尺寸固体器件的总体结构:如采用了直管氙灯、球反射器的照明结构及分离式的谐振腔结构;合理选择了点灯参数、输出端介质膜的反射率;注意到红宝石光学不均匀性后,采用了修光程补偿的办法。在制备成钹玻璃工作物质并对它进行了细致的光谱工作后,采用了红宝石激光器的总体结构,获得了约1焦耳的激光,器件的效率约为0.1%。

本工作就是在上述工作的基础上,从六四年六月开始进行的。二年来我们的工作主要是围绕着提高效率、增大输入能量这二方面进行的,在工作中适当注意了亮度的提高,尤其是单位面积输出能量的提高。

通过二年来的努力:

(1) 初步找到了适合于高能工作,且是高效率的谐振腔结构:采用平面法布里—珀罗谐振腔结构(在注意到工作物质由于变形而产生的劈角效应后采用光学调整方法,以保证谐振腔是真正光学平行的),从实验上确定了输出端最佳输出率,对于 $L500 \sim L1600$ 钹玻璃棒用一块平板玻璃作输出端,对获得高效率输出是合适的,此时器件的阈值较低,而能量增长斜率又较高,且在高能输出时不会损坏。

(2) 确定了适合高能工作的照明结构:采用小直径圆柱形照明器,这种照明器具有球形照明器效率高的优点,且体积小,易加工;采用了银片作为照明器反射表面,使得即使在高功率光泵时,照明器反射表面也不会因辐照而偏离理想情况的设计原则。

(3) 找到了几种输入到一支氙灯能量的有效途径,这些是:在照顾到灯棒匹配的情况下,适当增大了氙灯直径和长度;改善点灯方式,在灯前串加适量电感,以限制峰值电流和减小冲击波;适当延长氙灯的放电时间。由于采用了上述措施,一支 $\phi 35$ 、 $L1500$ 的氙灯可以输入 50×10^4 焦耳的能量。

(4) 初步解决了在同时点燃二支或四支氙灯中存在着的技术问题,从实验上肯定了电磁力的存在,它在多灯同时点燃中所起的破坏作用。

(5) 解决了高能输入时工作物质表面的损坏问题,采用水套或其它液体外套可以防止工作物质表面的损坏;经过多次实验,找到了一种比较合适的水套结构,即使在高能输入时,水套玻璃管也不会破裂;比较满意地解决了水套与工作物质的胶合问题。

(6) 认识到非输出方向的受激放大效应对于输出效率的影响是很重要的,并采取了一些措施来抑制它们。这些措施是:① 将钹玻璃棒侧面磨毛;② 将工作物质长度从400毫米增大到800毫米,1600毫米;③ 在钹玻璃棒外加折射率与其一样大小的液体外套;④ 将钹玻璃棒端面磨斜或成布儒斯特角。

实验表明在侧面抛光棒情况下,侧面寄生波型是影响最大的一种受激放大效应;实验肯定了将钽玻璃棒侧面磨毛,能够有效地抑制侧面寄生波形与输出方向竞争高能态粒子数的效应;实验也肯定了适当增加工作物质长度对于提高器件效率是有利的。由于采取了这些措施,器件的效率从不到1%提高到2%左右。有某些实验现象表明,对于 $\phi 30$ 、 $L1600$ 的钽玻璃棒,侧面磨毛,并加上水套后,非输出方向的受激放大效应已被消除得比较彻底。

(7) 实验初步肯定了钽玻璃内的铁离子含量对器件效率的影响是极其重大的,降低铁离子含量之所以能大幅度提高器件效率,主要原因在于它可以使工作物质吸收损耗系数变小,从而降低腔内损耗。在总体结构没有变动的情况下,仅由于工作物质内部损耗系数从 0.8% 厘米⁻¹降低到 0.3% 厘米⁻¹,器件的能量增长斜率就从约2.5%提高到5%。

(8) 为了获得高能激光输出,将钽玻璃棒直径从3厘米逐步扩大到7厘米,12厘米。实验表明只要选择合适的浓度,采用合理的照明结构,器件的效率可以不发生显著的降低;这亦表明在目前的条件下,超荧光对输出的影响是不重要的。

二、谐振腔的结构

1. 输出端输出率对输出的影响

在研究红宝石激光器时已知道,用平板玻璃组合作为高能的输出端是合适的,其优点是:①采用适当数量平板玻璃构成的组合体可以获得合适的输出率;②不易损坏。

在实验中使用的平板玻璃组合体的平行度是用下列方式保证的:将二板平板玻璃A、B与同样厚度的二端平行度误差小于5"、中间开孔的垫圈C的二端胶胶而成二块平板玻璃组合体(图1)。我们从实验上确定了最佳组合数量(图2)。从图2可以看到对于 $\phi 16$ 、 $L500$ 的钽玻璃棒,用一块平板作输出端是合适的,如果光泵功率还可以提高,则用钽玻璃棒端面作输出端有可能获得更高的功率。

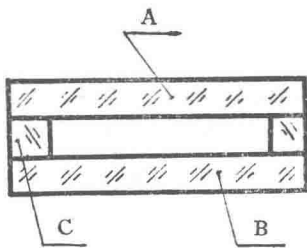


图1 二块平板玻璃组合体

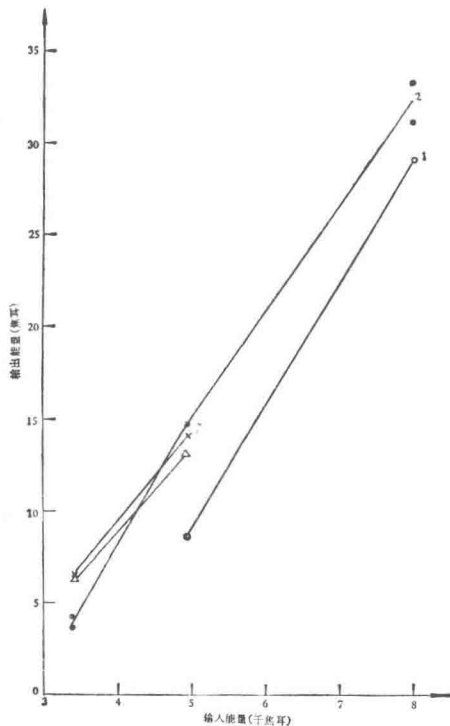


图2 各种输出率时,输出能量随输入能量的变化曲线。

1—0块平板 2—1块平板
3—2块平板 4—3块平板

2. 平面腔和凹面腔

在初次实验中,我们就观察到激光器在运转后,钹玻璃棒存在着三种类型的形变:棒弯曲产生劈角形变;径向温度梯度产生凹透镜效应;光程的杂乱变化。当时,我们认为如果在运转期间已经产生变形,则对于平面腔,由于这些形变,振荡波型的损耗变大,亦即谐振腔的Q值变小,这将导致器件的效率变小。

理论上预期:

(1) 如果用直角棱镜代替高反射介质膜,则只要将棱线置于垂直于弯曲变形方向的平面内,即置于水平方向,就能消除运转期间玻璃棒弯曲形变而产生的变坏效应;

(2) 如果不用平面腔而用凹面腔,则凹透镜效应,弯曲形变效应都可以被消除一部分。基于这些想法,进行了平面腔和凹面腔的比较实验。

实验中采用的钹玻璃棒长480毫米,直径16毫米,侧面磨毛,并加上玻璃管外套以保护侧面。采用单灯、单棒的圆柱照明器结构,氙灯直径为14毫米,电极距为600毫米,照明器的直径为50毫米。在凹面腔实验中采用凹面高反射率介质膜与平面输出端构成的共焦腔结构,其结构示意图如图3所示。凹面的曲率半径为1.52米,考虑到装上棒后,焦点应向输出方向移动 $(1-\frac{1}{n})l$,故为了达到共焦目的,输出端与凹面镜的距离为0.915米。采用所内自制的外调焦平行光管,将凹面的球心和中心调在钹玻璃棒的轴线上,并使输出端与轴线垂直。为比较起见,对于同一根钹玻璃棒在同样的实验条件下,进行了平面腔实验。

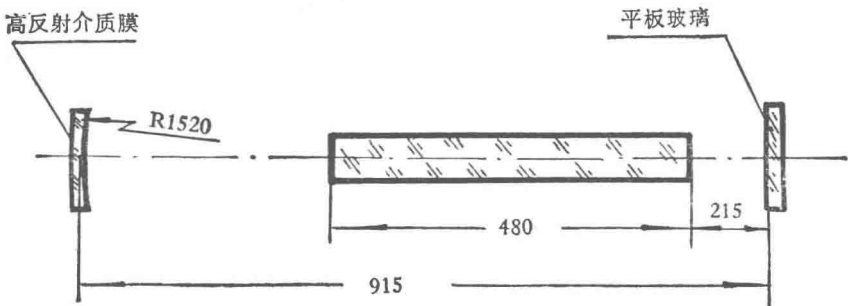


图3 共焦凹面腔的结构示意图

表1列出了二种腔的输出能量。从表中可以看出在我们的实验条件下,共焦凹面腔的效率和能量增长斜率都不比平面腔好许多,这是和预期不一致的。

表1 共焦凹面腔和平面腔输出能量的比较

实验次序	谐振腔结构	输出端	输出能量		能量增长斜率
			2500 伏	3000 伏	
1	共焦凹面腔	高反射率介质膜(98%)	3.1 焦耳	5.4 焦耳	0.05%
2	平面腔	高反射率介质膜(98%)	2.7 焦耳	4.9 焦耳	0.05%
3	共焦凹面腔	一块平板玻璃	33 焦耳	85 焦耳	1.3%
4	平面腔	一块平板玻璃	32 焦耳	83 焦耳	1.3%

在实验中,也曾拍摄了凹面腔输出时和平面腔输出时的远场和近场图形。测量结果表

面凹面腔输出光束的方向性要比平面腔差许多。在上述口径的腔中，凹面腔输出光束的能量分布在 17 毫弧度角内，且较均匀；而平面腔输出光束能量分布在 12 毫弧度内，并且主要集中在 3 毫弧度角内。

基于上述这些实验结果，我们认为在目前的相对通光口径的条件下，从提高输出光束的亮度出发，采用凹面腔是不合适的。这个结果似乎表明，形变对效率的影响是不重要的。

三、照 明 器

一个符合高能工作的照明器应该具备下列三个条件：

- (1) 照明器的聚光效率应是高的；
- (2) 照明器的反射膜层不仅应是高反射的，且应能经得住高能辐照；
- (3) 可以高效率地输入大能量。二年来在照明器方面的工作，主要就是围绕这三方面进行的。

从成象角度来看，球形照明器是比较理想的照明系统，但从加工的角度来看，对于长度大于 30 厘米的钨玻璃棒，用球形照明器显然是不合适的。我们一开始就采用了圆柱形照明器。

圆柱形照明器大致上可分为二种类型，一种称为成象系统，它的直径相对于钨玻璃棒和氙灯的直径来说要大得多，如图 4(a) 所示；另一种称为离焦式照明系统，结构如图 4(b) 所示。其实这种照明系统也是成象系统，不过它不是将一点成象到另一点，而是将一个区域成象到另一个区域。根据圆柱反射的特点，从在圆心 O 点一方的 A 点发出的光线，经圆柱面反射后，必须射到圆心 O 点的另一方，因此只要将钨玻璃棒和氙灯分别放在圆心 O 点的两方，且使工作物质的直径充满照明器的半径，在原则上可使氙灯之有用辐射能经过一次反射后，差不多全部都被钨玻璃棒所吸收。因此，这种照明器的照明效率是很高的，同时，也由于区域成象的缘故，离焦式照明系统的圆柱反射面的加工精度要求很低。在我们的实验中，几乎都采用这种类型的照明器。

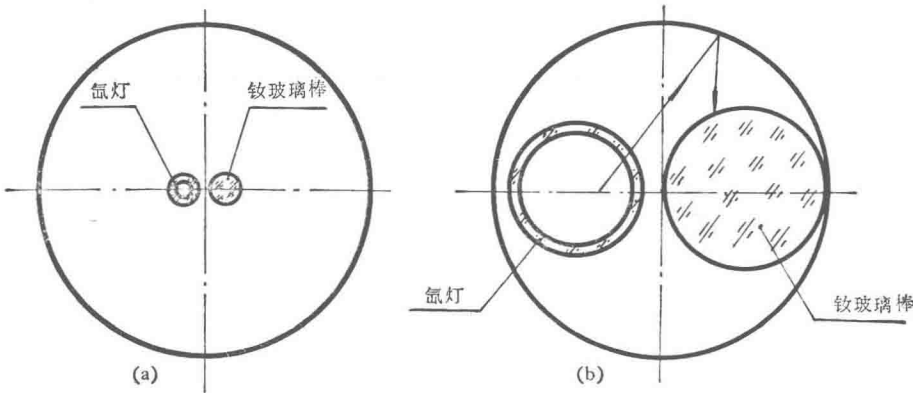
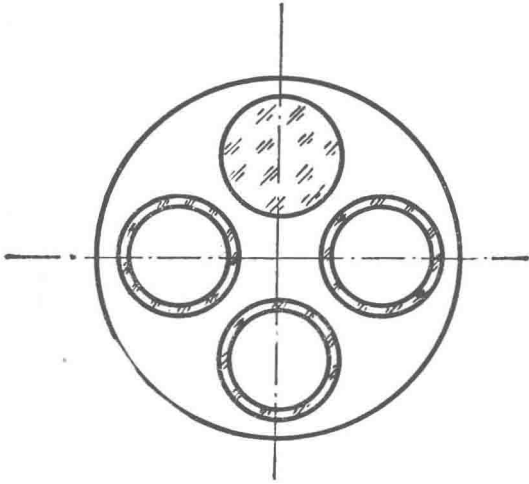


图 4 二种类型的圆柱形照明器
(a) 成象圆柱形照明器 (b) 离焦圆柱形照明器

由于离焦式照明系统成象的特点，氙灯紧靠着照明器的反射表面，采用真空镀膜法或化学沉积法，在玻璃管内壁或外壁涂上一层薄膜作为反射层是不合适的，在高能脉冲氙灯照射下，由于本身热容量小，且热量又不易立即传出去，都要被烧坏。一种比较合适的反射膜层是银管的内表面或包在铝管内表面的银皮，它既具有高反射的特点，又具有高能工作时不被

烧坏的优点。考虑到包银皮之照明器的表面规整度较差,采用电镀法,在抛光过的铜管内表面上镀上一层银膜作为反射膜层更为合适。



[图 5 多灯-圆柱腔照明器

要想增加单位长度输入能量,除了加大单支氙灯输入能量外,一个有效的途径是用二支或更多支氙灯光泵一根钽玻璃棒。对于这样的系统有二种类型的照明器结构。一种结构是将所有的棒和灯都放在同一圆柱照明器内(如图 5 所示),由于灯和棒都偏在圆柱中心的一方,氙灯发出的光线经过数次反射后,总是能被工作物质所吸收。这种结构有下列一些缺点:(1)由于利用多次反射的缘故,照明器的反射率对聚光效率影响很大;(2)氙灯的自吸收对于照明效率的影响很重要;(3)在这种照明器结构中,氙灯之间的电动力很大。由于这些缺点,这种结构我们没有采用。另外一种多灯照明结构是一支氙灯配上一个开口的圆柱体反射器的结构。图 6 表示的是双灯双圆柱照明器和四灯四圆柱腔照明器。在完全理想的情况下,从效率角度考虑,这种结构的照明器的设计原则是:(1)工作物质和氙灯分别处于圆心对称的二方;(2)工作物质的有效吸收直径应充满圆柱腔的半径;(3)圆柱腔的开口部分应被工作物质封住,以保证腔内的氙灯所发出的光线不会漏到另一个腔内。符合上述三个设计原则设计出来的照明器的聚光效率是高的。如在图 6(a) 中所示的照明器中,从氙灯辐射出来的直接或经过一次反射后就被工作物质所吸收的能量占有用辐射能量的 85% 以上,其余的在经过二次反射后也全部被工作物质所吸收。

应该指出的是实际的情况往往是设计不出这样理想的照明系统。这是因为对于一定直径的钽玻璃棒和氙灯,要设计出理想的照明系统,氙灯的数量不是可以任意多的,而实际情况又往往为了输入更大能量,需要较多的氙灯,这就对设计照明器提出了一个问题,即在不理想情况下,如何较合理地照顾到上述三个设计原则,以获得较高的效率。目前有三个比较可行的途径:(1)在钽玻璃棒外面加上适当粗的溶液外套以增大吸收截面,使照明器尽量理想化;(2)用椭圆腔代替圆柱腔,适当减小照明器的开口(见图 7)、(3)适当地增大氙灯的直径,使得用较少数量的氙灯就能输入所要求之能量。

目前,由于缺乏氙灯自吸收数据,还不能确定在不理想情况下,怎样设计才比较合理:这方面,我们打算用墨汁卡计相对比较法,从实验上来确定一些设计原则。

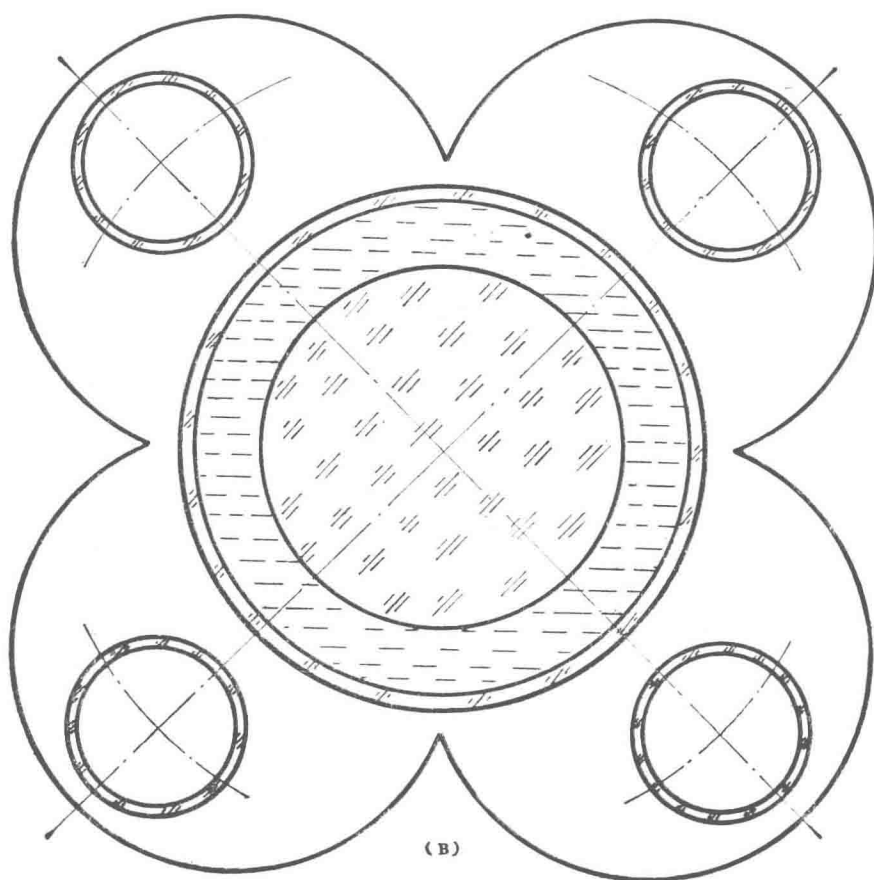
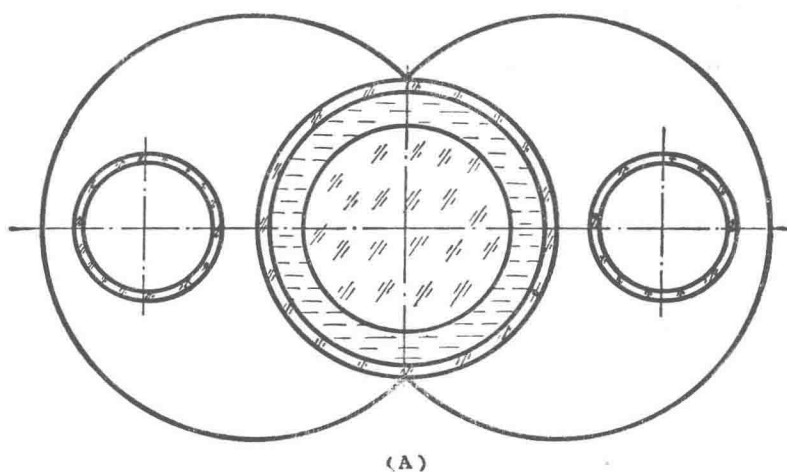


图6 多灯多圆形腔照明结构

- (a) 双灯双圆柱腔照明器, 钨玻璃棒 $\phi 35$, 加上 $\phi 50$ 溶液外套; 氙灯 $\phi 25$; 圆柱腔 $\phi 70$, 开口 50 毫米, 灯电极距 86 毫米
- (b) 四灯四圆柱腔照明器, 钨玻璃棒 $\phi 70$, 加上 $\phi 100$ 溶液外套; 氙灯 $\phi 35$; 圆柱腔 $\phi 86$, 开口 81 毫米, 灯电极距 108 毫米

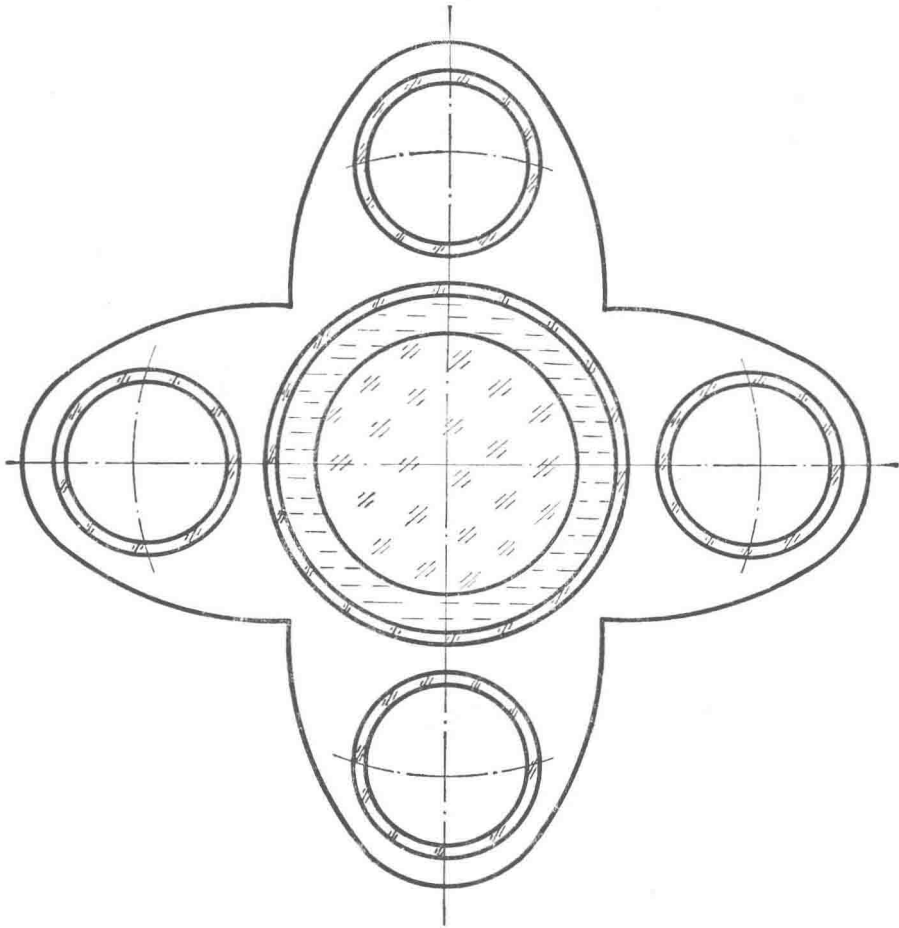


图7 四灯四椭圆腔照明器、钨玻璃棒 $\phi 50$, 加 $\phi 70$ 溶液外套, 氙灯 $\phi 35$, 椭圆腔长轴长 46 毫米, 短轴长 30 毫米, 开口 58 毫米, 相邻灯电极距 82 毫米

四、关于抑制非输出方向受激放大效应的一些实验结果及解释

1. 问题的提出

固体激光器的转换环节比较多, 主要有下列五个环节:

(1) 电容器所贮电能变为氙灯辐射能, 此转换环节的效率主要取决于线路损耗及氙灯发光效率;

(2) 氙灯的辐射能转换为工作物质所吸收的能量, 此转换环节的效率主要取决于氙灯发光光谱与工作物质吸收光谱的匹配情况, 照明器反射率及聚光本领;

(3) 被工作物质吸收的辐射能转换为处于激发态粒子数的能量, 其效率主要取决于斯托克斯频率损失及其它跃迁损失;

(4) 处于激发态粒子数的能量变为腔内输出方向受激光子的能量, 此转换环节的效率主要取决于量子效率、自发辐射损失、非激光输出方向的种种受激放大效应;

(5) 腔内输出方向受激光子的能量变为真正输出能量, 此转换环节主要取决于工作物质吸收、散射损耗、腔内不平行端面的存在;

从某种意义上说,可以把激光器理解为光束角度变换器。由于共振腔的作用,它使得原先要通过自发辐射的方式发射在整个立体角内的光束能量集中在某一个特定方向输出。因此,从器件的角度考虑,提高效率的工作,除应从改善照明器结构及谐振腔结构外,一个十分重要的方面是设法使能量集中在某一个特定方向输出,亦即抑制非输出方向各种受激放大效应。

在大功率实验中发现处于负温度状态的工作物质,其激发态寿命比荧光寿命要短得多。这表明当工作物质处于负温度状态时,还存在着另外一些机构使得激发态寿命变短。因为这种机构是与负温度相联系的,我们很自然认为是由受激放大效应引起的。

实际情况也表明在这方面提高效率的潜力确实很大。一个极为粗略的估算是:氙灯的发光效率约为60~70%,被钹玻璃吸收的辐射部分占总辐射部分的35%,量子效率为40%,则钹玻璃激光器的总体效率在完全理想的条件下可达10%。考虑到目前工作状态还不够理想,照明器的反射率约为84%,器件的能量增长斜率约为8%左右。然而,实验初期,我们用 $\phi 16 \times 500$ 的钹玻璃棒只获得了约1%的能量增长斜率。

由于上述原因,我们认为非输出方向各种受激放大效应是使实验值远低于理论值的一个十分重要的原因。基于这种看法,我们着重在这方面做了一些提高效率的工作。首先证实这种看法的实验是钹玻璃棒侧面磨毛的实验,故下面首先从“侧面磨毛”的实验谈起。而在描述实验结果之前,再简要描述一下非输出方向的各种受激放大效应。

2. 非输出方向的各种受激放大效应

在本文中所指的非输出方向的受激放大效应,大致上有下列三种类型:

(1) 自发辐射的受激放大效应。通常也称为“超荧光”效应。它是指由工作物质本身发射的自发辐射,在通过其本身时被放大的效应。它的特点是在谐振腔内没有形成闭合回路。根据 W. R. Sooy 的讨论方法,我们曾经作过估算,如果认为如果只考虑一次通过的放大效应,则在目前工作条件下,此效应对高能态粒子数的损耗是不重要的。但是,如果考虑到目前还可能存在着侧面效应,尽管在形式上“超荧光”似乎没有形成闭合回路,仍然可能对高能态粒子有较大的损耗。例如,对于侧面被磨毛的钹玻璃棒,如将其侧面看作是完全理想的漫反射面,则侧面仍然等效于定向反射率很高的反射面,在这种情况下,所谓的“超荧光”就可能对输出影响很大了。消除这种“超辐射”效应的有效方法,应该是在钹玻璃棒外面加上折射率与之完全匹配的溶液外套,且溶液能吸收1.06微米的辐射。

(2) 侧面寄生波型。对于侧面抛光的棒,由于侧面反射,在非输出方向存在着许多闭合回路,亦即存在着许多侧面寄生波型。当这种闭合回路的增益系数能与输出方向波型的增益系数相比较时,这些侧面寄生波型就会与输出方向的波型争夺激发态粒子数,严重影响输出效率,甚至使振荡不能发生。

图8所示的是二种典型情况的侧面寄生波型。一种存在于径向平面内,称为横向寄生波型(图8(a)),另一种存在于轴向平面内,被称为轴向寄生波型(图8(b))。

(a)



(b)



图8 侧面寄生波型

对于侧面抛光的钹玻璃棒,高增益的横向寄生波型存在于 $(R/n - R)$ 之间的圆环内,其中 R 为棒的半径, n 为工作物质的折射率。把侧面磨毛后,或加上直径为 nR 、折射率为 n 的溶液外套,可以有效地消除横向侧面寄生波型。

铍玻璃的折射率约为 1.5, 在空气中的全反射角为 42° , 故对于端面与圆柱面垂直的铍玻璃棒, 存在着无论在端面或柱面反射都是全反射的闭合回路。这种轴向寄生波型的增益系数很高, 故对输出的影响也特别严重。至于只在侧面是全反射的那些轴向寄生波型究竟对输出有多大影响需从实验来考察。消除轴向寄生波型的方向是: 在工作物质外面加上溶液外套, 并且溶液要能吸收 1.06 微米的辐射; 再将工作物质端面磨成布儒斯特角, 使得棒内不能形成高增益的闭合回路。

(3) 除了构成谐振腔的二个反射面外, 谐振腔内还往往存在着一些反射面, 这些反射面若与构成谐振腔的反射面有一夹角, 输出激光在这些面的反射部分对输出的贡献就可能极小, 不仅如此, 它还有可能在通过工作物质时, 要损耗掉大量的激发态粒子数。此外, 由于这些面的存在, 亦增加了形成侧面寄生波型的可能。消除这种损耗的有效措施应该是将腔内所有附加的反射面都置于与激光输出方向成布儒斯特角的位置。

3. 侧面磨毛的一些实验结果及解释

对于工作物质侧面处理对输出的影响开始是认识不清的, 认为铍玻璃棒侧面虽然经过抛光处理过, 但表面光洁度很差, 不足以形成高增益的闭合回路, 故侧面抛光不会对输出有什么不良影响。基于这种看法, 初期实验采用的铍玻璃棒侧面都是很好抛光的, 仔细观察一下初期实验采用的四根铍玻璃棒 ($\phi 16 \times 500$) 的工作历史, 发现了一些值得注意的现象, 这些现象是:

(1) 其中三根棒在第一回实验时, 因为采用一块平板玻璃作输出端, 即使氙灯工作电压高过 3500 伏(一般振荡电压阈值低于 2000 伏)仍不能振荡。

(2) 但是如果改用二块平板玻璃组合体或反射率为 40~60% 的介质膜作为输出端, 即使在较低电压(2000 伏)下工作也能振荡, 不过效率仍然很低。

(3) 随着工作次数增加, 输出效率逐渐提高, 并且用一块平板玻璃, 甚至只用玻璃棒的端面作输出端也能振荡。

(4) 效率的提高不是一直能保持的, 如其中一根棒在输出 200 焦耳之后, 输出效率下降。与此同时还注意到玻璃棒在经过辐照之后变色的现象。一般认为后一现象是铍玻璃产生色心的表现。当时, 我们不能理解如果色心在起作用, 为什么铍玻璃棒在初期工作阶段, 振荡越来越容易, 效率也越来越高, 而后来效率又越来越低呢?

(5) 对于某些棒, 经过多次工作后, 可以较高效率地输出高能激光, 然而同一锅每一根棒并不是都能出那样好的结果。

总之, 当时不能解释这些现象。将铍玻璃棒侧面磨毛而使效率显著提高的实验结果, 为我们澄清了对这些现象的认识。

在本实验中, 采用的 5 根铍玻璃棒是从同一锅熔炼出来、经挑选后加工成的, 其直径为 16 毫米, 长 400~500 毫米, Nd 离子的重量百分比含量为 3%。氙灯的尺寸为 14×600 , 充气气压约为 200 毫米汞柱。采用单灯、单棒的离焦式圆柱照明器结构, 照明器的直径为 50 毫米。采用多层平面介质膜作为高反射端, 一块平板玻璃作为输出端。实验中所使用的电容量为 1800 微法。

表 2 列出了这五根棒在侧面抛光和磨毛时输出能量的比较数据。

从这些数据可以看到同样一根棒, 在其侧面被磨毛后, 阈值显著降低, 而效率显著提高。这个实验很自然就被用来解释侧面抛光的棒在初期随着工作次数增加, 阈值降低而效率提

表 2 光棒和毛棒输出能量的比较

棒 编 号	侧面加工情况	输 出 能 量 (焦耳)		
		2500 伏	3000 伏	3500 伏
7*	抛 光	0 4.1 5.9	* 2 10.8 6.2	5.9 6.2
	磨 毛	36.7	71	103
8*	抛 光	0	1.2	
	磨 毛	24	78	105
9*	抛 光	0 0	0 0	
	磨 毛	40.5	81	106
6*	抛 光	9.5	20	
	磨 毛	18.6	67.5	
5*	抛 光	40	89.5	

* 箭头方向表示实验先后次序

高的现象。这现象是与侧面越来越毛相联系的。

为什么侧面光洁度对引起振荡的难易程度及效率会有这样大的影响呢？我们认为由侧面反射产生的寄生波型要与输出方向激光波型争夺高能态粒子，如果前者占优势，则可抑制后者，使其不能振荡；对于侧面很好抛光的棒，存在着侧面和端面都是全反射的闭合回路。当输出率很低时，波型竞争的结果可以使输出方向根本不能产生振荡。上述实验也表明将侧面磨毛就能抑制这种波型竞争效应。根据这种看法，圆满地解释了大功率实验中的一些现象，如激发态寿命变短，用 $\phi 16 \times 500$ 侧面抛光的铍玻璃棒不能获得大功率输出等实验现象；并作了一些推论，然后用实验验证，这些实验都证实了波型竞争的看法。

此外，从 7 号棒数据可以看到侧面抛光时，数据比较乱。如在 2500 伏时输出为 4.1 焦耳；3000 伏时输出为 10.8 焦耳；而在 3500 伏时输出只有 5.9 焦耳；以后再重复 3500 伏和 2500 伏时，输出能量有饱和趋势。这表明寄生波型与输出激光波型竞争得十分厉害，只要某一方稍占优势就可以抑制另一方。

在完成此实验之后，我们比较倾向于认为将工作物质侧面磨毛，虽能使在端面和侧面都能全反射的闭合回路不再存在，但还不能完全消除非输出方向的受激放大效应，其理由是：(1) 有一些侧面抛光的棒，一开始就可以有较高的效率。如侧面被抛光的 5 号棒(见表 2)的

效率与毛棒的效率差不多。很显然,侧面磨毛时,必然还存在着一些闭合回路,故波型竞争高能态粒子的效应肯定是存在着的;(2)侧面虽被磨毛,平均反射率仍然很高,且定向反射依然存在,尤其是光线以大角度入射到侧面时,定向反射仍然很强;(3)对于 $\phi 16 \times 500$ 侧面被磨毛的棒,能量增长斜率还只占2%,仍然显著低于理想值。

因此,认为有必要进一步消除侧面效应,以提高效率。至于非输出方向的受激放大效应对输出效率究竟有多大影响还有待于实验来确定。

为了证实这种看法,我们采取了一系列措施来消除侧面和端面效应,如增大工作物质长度,在钹玻璃外圆加上液体水套,将端面磨成布儒斯特角,以达得提高效率的目的。这些实验似乎表明对于足够长的、侧面被磨毛并加上水套的工作物质,侧面寄生波型已经被消除得比较彻底。

4. 工作物质长度对输出能量的影响

正如我们在前面分析的,非输出方向的各种受激放大效应是使器件实际效率偏离理想值的一个十分重要的原因,而非输出方向的受激放大效应是与工作物质的粒子数反转水平相关的。因此,除了设法消除侧面和端面的效应外,抑制非输出方向的各种受激放大效应的一个有效的措施是增大工作物质长度,使得即使工作物质反转粒子数密度处于很低的水平下,仍能在输出方向获得高增益,而其它方向增益较小。我们预期增大工作物质,将使器件易于振荡(即在较低电位梯度时,就能振荡),能量增长速率变大,从而器件效率能有大幅度提高。

此外,目前固体激光器件的亮度对某些应用来说是十分不够的。除了减小输出光束的发散角外,提高器件亮度的另外一个有效的措施是增加工作物质长度可使工作物质在单位长度光泵功率水平不太高的情况下输入高功率的能量。

基于上述这些看法,我们逐步地将工作物质长度从400毫米增加到1600毫米。

图9描绘了几种长度的钹玻璃棒的输出能量随输入能量的变化曲线。应该指出的是53[#]、10[#]、15-1这三根钹玻璃棒不是从同一锅熔炼出来的。为了可靠起见,我们在对一根直径为30毫米、长为750毫米钹玻璃棒(10[#])进行了试验之后,将该棒切为等长的二段10[#](1)、10[#](2),并在相同的实验条件下,对这二根棒进行了实验,这些数据已表示在图9中。

从这些曲线可以看到随着工作物质长度增大:

- (1) 单位长度的输入能量阈值显著降低;
- (2) 输出能量的增长速率有所提高(图10);
- (3) 从而器件效率有大幅度提高。如对于 $\phi 30$ 的钹玻璃棒,在氙灯电位梯度约为45伏/厘米时,长400毫米的棒的效率约为0.8%,而长750毫米棒的效率约为1.6%。

这些结果定性上是与原先的想法一致的。

这儿需要强调的是增大工作物质长度除了会对效率的提高有好处外,还有不利的一面。正如我们已在前面分析过的,处于激发态的粒子还要经过三个转换环节才能变为输出激光,而影响最后一个转换环节效率的因素之一是已经变为输出方向的激光光子在通过工作物质时,由于工作物质吸收、散射引进的损耗。在吸收、散射损耗系数一定时,这种损耗是随工作物质增大而增大的。在不考虑长度对其它效应影响的前提下,我们用稳态速率方程计算了各种损耗系数值时输出效率随工作物质长度变化的关系。从中我们得到,当工作物质的长

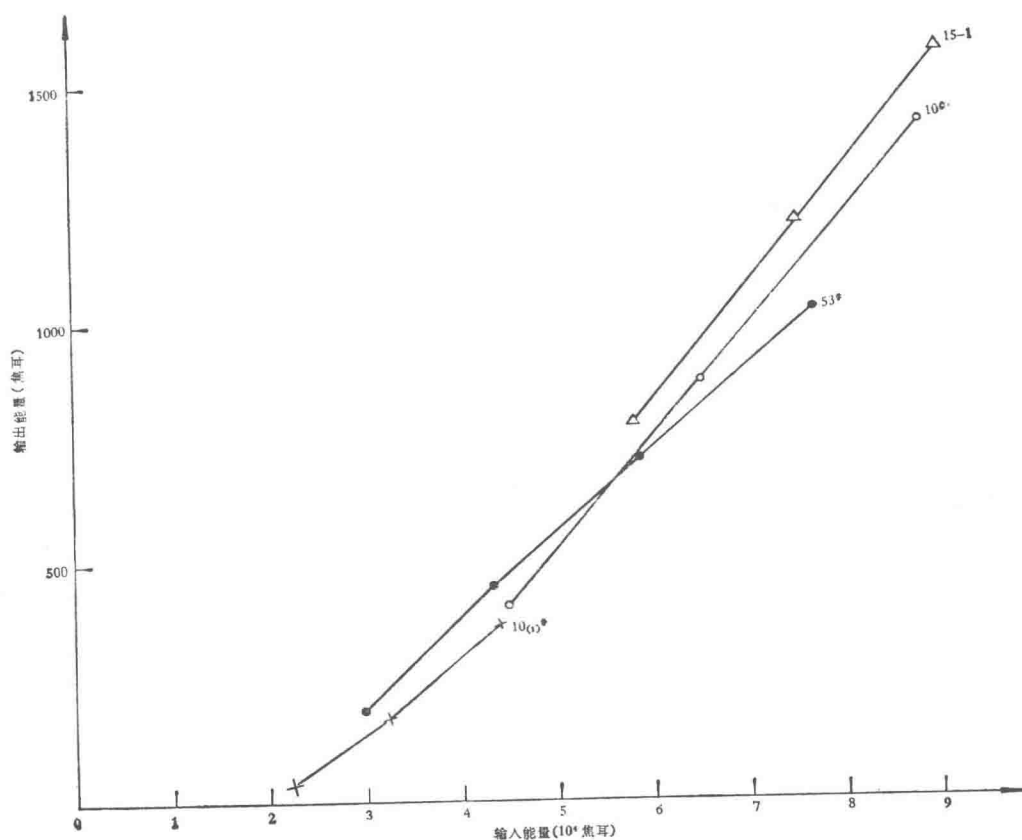


图9 各种长度钽玻璃棒的输出能量随输入能量的变化曲线
 10#(1)长375毫米; 53#长500毫米; 10#长750毫米; 15-1长1590毫米

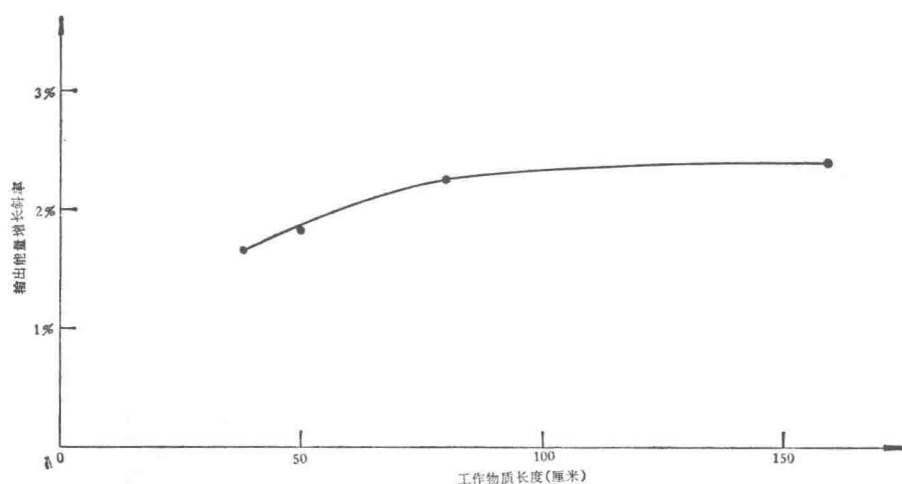


图10 输出能量增长斜率随工作物质长度的变化