

## 中国激光科技发展 1988 年度巡礼

赵梅村 雷仕湛 黄永楷 王润文

## An overview of development of laser science and technology in China in 1988

Zhao Meicun, Lei Shizhan, Huang Yongkai, Wang Runwen

1988 年度我国激光科技发展的特点是激光技术转化成商品的发展速度加快,涌现出一批能用于实际生产使用的激光器件和产品;激光医疗已由体表深入到体内、治疗内脏疾病取得进展;激光融合细胞获得了成功,为发展生物工程开辟了新的道路。激光技术对国民经济发展的促进作用日趋显著。

## 激光器件

## 适用高精度测量的 Nd:YAP 激光器

中国科学院福建物质结构研究所研制成功激光频率高度稳定的单横模 Nd:YAP 连续激光器。他们深入研究了谐振腔的物理机制、连续激光器输出频率的抖动与成因,采取了一种既能抑制弛豫振荡引起的尖峰结构又能抗低频干扰的技术,将激光频率抖动(25 kHz)缩小到  $\pm 0.875\%$ 。波长  $1.3414 \mu\text{m}$  的近线偏振激光输出功率为 5.2 W。该器件已应用于单模光纤及其器件的测试、双轴晶体折射率的高精度测量。

## 宜作工业应用的激光器

华中理工大学和河北光电所分别获得大于 400 W 连续 Nd:YAG 激光功率。选用尺寸为  $\phi 8 \times 120 \text{mm}$ 、中频炉生长的 Nd:YAG

晶体,用 6 kW 双氩灯泵浦时,一级多模激光功率为 375 W,总体转换效率为 3.4%;将两根  $\phi 8 \times 110 \text{mm}$  的 YAG 棒串联,用四灯泵浦,激光功率达 535 W,转换效率为 2.8%。可应用在焊接、切割和热处理等工业加工方面。

西安电子科技大学研制成功的气体同轴循环 TEACO<sub>2</sub> 激光器,激光峰值功率为 1.7 MW、重复频率 26 Hz、脉冲宽度 50 ns。该器件采用了气体同轴流动和 UV 预电离技术,使气流均匀,工作稳定。而且采取了玻璃-金属封接结构和管内离心风机磁力传动,一次充气使用寿命达  $10^6$  次,现已批量生产。在测距、医疗和化学等方面有广泛的应用前景。

中国科学院上海光机所和北京电子所分别研制成功 20 W 实用型铜蒸气激光器,激光效率  $\sim 6\%$ ,光束直径  $\sim 30 \text{mm}$ ,脉冲宽度为 20~35 ns,工作频率为 6~10 kHz,光束发散角  $\sim 10 \text{mrad}$ ,一次投料使用寿命  $> 150 \text{h}$ ,均已小批量生产。

## 激光器件运转性能提高

中国科学院上海光机所建成千兆瓦级大功率 CO<sub>2</sub> 激光系统,为开展物理学、光学、激光化学和材料科学等领域的基础研究提供

了一个  $10.6\ \mu\text{m}$  波段的实验装置。该系统由混合型  $\text{CO}_2$  激光振荡器、双普克尔盒快门、一台三节  $\text{TEACO}_2$  前置放大器、一台两节  $\text{TEACO}_2$  前置放大器、一台大口径  $\text{TEACO}_2$  激光放大器和一台电子束控制的  $\text{CO}_2$  激光放大器组成。最大的脉冲激光能量为  $12.9\ \text{J}$ ，最大的脉冲激光功率为  $3.2\ \text{GW}$ ，平均功率  $2.4\ \text{GW}$ ，激光脉冲宽度小于  $4\ \text{ns}$ 。

西北大学物理系研究出放电等离子体管二次成型技术，可按所需谐振腔类型及腔参数控制具有模体形状的放电管。从而使  $1.2\ \text{m}$  长 He-Ne 激光器输出了  $66\ \text{mW}$  ( $632.8\ \text{nm}$ ) 单横模激光。输出功率抖动  $\leq 1.3\% \text{h}^{-1}$ ，光束发散角  $\sim 0.27\ \text{mrad}$ ，工作寿命大于 5 年。

继 87 年度我国研制出同时辐射六条谱线的 He-Ne 激光器之后，北京大学又研制成含绿光输出的多谱线 He-Ne 激光器。改变腔结构可任意调谐波长为  $640.1$ 、 $632.8$ 、 $611.8$ 、 $604.6$ 、 $593.9$  和  $543.3\ \text{nm}$  各谱线的输出强度。腔长  $1.2\ \text{m}$ 、增益区长  $1\ \text{m}$  的器件，绿线激光输出功率已达  $600\ \mu\text{W}$ ， $632.8\ \text{nm}$  线达  $13.5\ \text{mW}$ ， $593.9\ \text{nm}$  线达  $1.6\ \text{mW}$ 。此外，还观察到  $652.5\ \text{nm}$  波长新激光谱线。它与氦的自发辐射谱线没有相应关系，可能与腔内受激喇曼散射过程有关。

#### 新型激光器

浙江大学用  $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$  晶体作非线性介质，在  $0.83\sim 0.89\ \mu\text{m}$ 、 $1.63\sim 1.73\ \mu\text{m}$  (单共振) 和  $0.97\sim 1.18\ \mu\text{m}$  (双共振) 三个波段上获得了参量振荡。振荡阈值分别为  $30\sim 34\ \text{MW/cm}^2$  和  $27\sim 35\ \text{MW/cm}^2$ ，最大输出能量分别为  $0.2\ \text{mJ}$  和  $1\ \text{mJ}$ ，泵浦光和参量振荡光脉冲宽度分别为  $7\ \text{ns}$  和  $5\ \text{ns}$ ，采取角度调谐。

哈尔滨工业大学研制出硫双原子分子宽谱区可调谐激光器。在  $430\sim 520\ \text{nm}$  波段有 8 个谱带的激光输出，在  $330\sim 390\ \text{nm}$  波段有 6 个谱带的激光输出。全谱激光输出能量

为  $3\ \text{mJ}$ ，效率为  $2.5\%$ ，脉冲宽度为  $50\ \text{ns}$ ，器件寿命大于 3 年，进而提高激光能量，可用于水下通讯。

中国科学院上海光机所推出 EDL-851 型准分子激光泵浦的染料激光器。该器件选用棱镜扩束-光栅调谐腔，由一级振荡、两级放大组成。振荡与预放大共用一染料池。染料池内有一特殊型线的导流板，致使激光器可运转在高重复率 ( $8\ \text{kHz}$ )。激光在输出前再折回光栅一次，将超辐射基底压缩至  $10^{-8}$ 。激光调谐范围为  $330\sim 900\ \text{nm}$ ，谱线宽度为  $0.005\sim 0.010\ \text{nm}$  (F-P 厚  $5\ \text{mm}$ )，脉冲宽度  $4\sim 25\ \text{ns}$ ，光束发散角  $0.5\sim 1.0\ \text{mrad}$ ，激光效率  $10\%$ 。该激光器还可用 Nd:YAG、 $\text{N}_2$ 、Cu 激光泵浦。已有产品出售。

中国科学院北京半导体所研究出 GaAs/GaAlAs *pnpn* 负阻激光器。该器件转折电压为  $10\sim 20\ \text{V}$ ，维持电流为  $10\sim 100\ \text{mA}$ ，维持电压为  $1.4\ \text{V}$ ，阈值电流密度为  $(2.5\sim 5)\times 10^3\ \text{A/cm}^2$ ，激光功率为数百  $\text{mW}\sim 1\ \text{W}$ ，室温工作，寿命近数千小时。它将发光、接收、放大、光双稳、光开关和电开关集合在一起，在光信息处理、光存贮、光整形及光数据处理等方面将有广阔的应用前景。他们还研制成功均匀相位半导体激光器，在  $-3\ \text{dB}$  功率点间相位均匀度小于  $1\ \text{cm}$ 。器件阈值电流  $50\sim 100\ \text{mA}$ ，激光波长  $820\sim 860\ \text{nm}$ ，输出功率  $2\sim 20\ \text{mW}$ ，外量子效率  $20\sim 50\%$ ，最高可工作温度为  $50^\circ\text{C}$ ，工作寿命大于 5 千小时，并配置耦合光纤。此器件可用于  $2\sim 5\ \text{km}$  的精密测距。

西安电子科技大学开展了利用直接调制方法产生高重复率超短脉冲半导体激光的研究，得到重复频率  $1\ \text{GHz}$ 、脉冲宽度小于  $50\ \text{ps}$ 、平均功率大于  $3\ \text{mW}$  的  $0.83\ \mu\text{m}$  波长的激光输出；合理地设计了  $\text{LiIO}_3$  倍频器，首次实现了 DH GaAlAs 半导体激光的倍频；用二次谐波自相关法测量了该半导体激光的脉宽，测量分辨率  $\leq 1\ \text{ps}$ 。中国科学院上海光

祝所研制并小批量生产了短脉冲 GaAlAs/GaAs 双异质结激光管, 可工作在增益开关状态, 最佳运转参数可达 700 mW 峰值功率、26 ps 光脉冲宽度、100 MHz 重复频率的激光输出。其脉冲特性优于日本同类产品 (HL7802E, LT022Mc)。

## 激光材料与元件

### 新型非线性晶体

山东大学晶体研究所生长的新型高效激光倍频晶体 KTP 已批量提供国内外使用。该晶体生长体系稳定, 采用独特的生长装置, 成品率高达 80% 以上。晶体透光波段宽广 (0.35~4.5  $\mu\text{m}$ ), 制成的倍频器件尺寸为 (1~20)  $\times$  (1~20)  $\times$  (1~10)  $\text{mm}^3$ , 倍频效率  $\leq 70\%$ , 损伤阈值  $> 750 \text{ MW/cm}^2$ , 是较理想的倍频材料。此外, 还可制成参量振荡器件和激光双稳器件。该校还生长出四硼酸铝钕铽 (NYAB) 复合功能晶体, 首次在 NYAB 晶体上实现了从 1.06  $\mu\text{m}$  到 0.53  $\mu\text{m}$  的激光自倍频。目前生长的透明晶体尺寸大于 1  $\text{cm}^3$ , 泵浦阈值小于 2 mJ, 绿光输出为 5 mJ, 峰值功率为 0.5 MW, 效率大于 12%, 可做成微型激光器。

中国科学院福建物构所生长的新型非线性光学晶体三硼酸锂 ( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , 空间群  $Pn3m$ , 双轴晶体), 吸收截止波长为 160 nm, 角度调谐半宽度为 95 mrad (垂直使用)、25 mrad (非垂直使用), 激光损伤阈值高达 24  $\text{GW/cm}^2$  (0.1 ns, 1.064  $\mu\text{m}$ ), 有效倍频系数是 KDP 晶体的三倍。可用于高功率 Nd:YAG 激光的二、三次倍频, 也可制作波导谐波器件。

国家建材局人工晶体研究所经过了近十年的努力, 采取了一系列关键措施, 克服了晶体的赋色、缓解了晶体的开裂、找到多畴晶体定向规则, 生长出大尺寸的铁电非线性晶体铌酸钾 (KN)。其透光波段为 0.35~5  $\mu\text{m}$ , 多

畴尺寸为 45  $\times$  42  $\times$  13  $\text{mm}^3$ , 单畴尺寸为 34  $\times$  10  $\times$  8  $\text{mm}^3$ , 折射率相对变化为  $2.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 。该晶体非线性品质因素高, 倍频阈值低, 几个毫瓦基波输入功率即可产生二次谐波, 是目前唯一能对半导体激光器进行倍频的材料; 其电光品质因素高, 作电光调制时, 半波电压只需 16 V, 且折变响应快 (2 ns)。因此它在倍频、参量振荡、电光调制等高新技术领域有较大的应用价值。1987 年已进入美、日、西德等市场。

### 多波段激光晶体

从紫外到 3  $\mu\text{m}$  波段可实现十一个波长激光振荡的含铒石榴石 (Er:YAG) 激光晶体由中国科学院上海光机所研制成功。它是一种高浓度自激活激光晶体。选用含  $\text{Er}^{3+}$  浓度 50%、 $\langle 111 \rangle$  取向、 $\phi 6 \times 95 \text{ mm}$  的未镀增透膜晶体棒, 用双灯泵浦, 已获 2.938  $\mu\text{m}$  波长的激光。因为 1.6~1.7  $\mu\text{m}$  激光对人眼安全, 2.938  $\mu\text{m}$  激光和水羟基作用强烈, 所以用这种晶体制成的激光器在激光外科手术、激光生物工程等领域有较大的应用潜力。

### 优质激光偏振棱镜

曲阜师范大学激光研究室继获国家发明奖和第十四届日内瓦国际发明展览会银牌的可调分束角棱镜之后, 又研制成功 LGP-6 型马普·赫斯棱镜、LGP-8 型超高透偏光镜和 LSP-9 型平行分束偏光镜。其透射比依次为 0.86、0.99、0.91; 消光比均为  $10^{-5}$ ; 波前畸变均为  $\frac{1}{8} \lambda$ 。这些元件突出的优点是抗激光损伤能力特别高, 达 50  $\text{W/cm}^2$  (连续)、300  $\text{W/cm}^2$  (脉冲)。

## 基础研究

中国科学院北京物理所用单模稳频连续 YAG 环形激光器的倍频输出 (几十 mW) 去泵浦-简并参量振荡器, 获得高达 63% 的压



缩率,参量振荡器腔长100 mm,反射镜曲率半径50 mm。用平衡零拍探测系统测量振荡器所产生的1.064  $\mu\text{m}$  波长压缩光的压缩率。测量结果表明所产生的压缩态为极小测不准态,提供了电磁场海森堡测不准原理的一个显著例证。为了显示压缩态的应用前景,他们将压缩光用于位相调制的 Mach-Zehnder 干涉仪和振幅调制测试两种实验,使信噪比相对于散粒噪声极限信噪比值分别提高了3 dB 和 2.5 dB。

成都电讯工程学院在准光学开放腔的研究基础上,研制成功8 mm 准光腔型能量注入器,为自由电子激光实验提供了一种新的注入途径。注入器工作频率为34.36 GHz,相互作用区圆波导场为  $\text{H}_{11}$  模式;注入总效率 >40%;注入器真空密封,输入波导由云母窗封接。它的主要特点是:单向传输性好,注入模式单一,有良好的单色性,有利于降低对波源单色性的要求。目前已交付有关单位使用,能满足自由电子激光放大实验的需要。

哈尔滨工业大学光电子技术研究所用337.0~342.0 nm 波段的染料激光作激励源,获得钠双原子分子第一、三重态 ( $1^3\Sigma_g^+ - 1^3\Sigma_u^+$ ) 的激光振荡,单程增益增长了100~1000倍,光束发散角为6 mrad,激光振荡阈值为80  $\mu\text{J}$ ,谱线宽窄近2/3。并观察到明显的谐振腔效应。他们还用红宝石激光激发  $\text{CH}_4$ ,当激光能量增至1.4 J,功率密度达3  $\text{GW}/\text{cm}^2$  时,不仅观察到  $\text{CH}_4$  的第一振动基频 ( $\nu_1$ ) 的  $S_1$ 、 $AS_1$  谱和  $\nu_2$ 、 $2\nu_2$  的 SRS 谱,还首次观察到第二振动基频 ( $\nu_2$ ) 的反斯托克斯受激 Raman 散射  $AS_1$  谱线,频移为1526  $\text{cm}^{-1}$ 。

上海交通大学应用物理系解决了双轴晶体在非线性光学使用时的最佳相位匹配角的计算问题。首次给出单斜  $m$  点群,三斜 1 点群  $d_{ij}^L$  和  $d_{ij}^H$  计算式。给出16种双晶和频、倍频和8种双晶光学参量振荡的计算结果,并经实验验证。计算方法及结果已提供许多

单位使用。

超辐射具有实现高强度、窄脉宽的 X 射线相干光脉冲的应用前景。压缩光具有比真空起伏更低的量子噪声,可以在超弱信号检测、光通讯等领域中获得广泛应用。西北大学物理系从超辐射的非线性摆方程出发,证明触发超辐射可诱导压缩光脉冲,提出实现 X 射线压缩光脉冲的可能性。通过对辐射场方差的理论分析和数值计算,得出一个新的结论——反触发超辐射也可诱导压缩光脉冲。从理论上预言了一种实现 X 射线压缩光脉冲的更加简单可行的技术途径。

超快激光光谱学开放实验室在中山大学建成。该实验室配置了锁模激光、染料激光、准分子激光和 YAG 被动锁模激光系统,且具有条纹照相机、紫外分光光度计、激光喇曼光谱学系统等先进仪器,可开展超短激光脉冲的产生和测量的原理、方法及技术研究;高时间分辨率激光光谱学方法与技术研究;超短激光脉冲与物质相互作用的各种非线性效应的探索与应用研究;超快过程光物理、光化学、光生物学和各种快速能量及电荷转移过程的研究;原子、分子的碰撞、激发及弛豫动力学研究;复杂分子与生物巨分子和凝聚态体系的瞬态光谱学研究;以及相干辐射机制、相干瞬变光学效应的研究。

中国科学院上海光机所协同上海激光技术研究所完成了我国激光发展战略的研究。根据国内外市场形势、发展趋势和我国的技术基础,提出我国的激光发展宜按加速激光科研成果商品化、促进激光技术新突破和组织重大激光项目跟踪三个层次来安排,并且应重视基础研究与人才培养。研究报告表明激光市场的重点是激光加工与光信息产业,包括激光工业热处理、切割、焊接及光印刷、光存贮等。其次是与能源有关的激光技术,如激光分离铀同位素、激光核聚变与高能激光军用技术等。还指出若能加强管理、增加经费、注重基础研究、实行中西医结合,将使

激光医学迅速发展并具有特色。

## 激光应用

### 激光技术用于电子工业

中国科学院上海光机所研制的 LTT-1 型激光热敏电阻微调机系使用激光能量  $4.5\sim 16.7\text{ mJ}$ 、脉宽  $30\text{ ns}$ 、重复频率  $1、2、5\text{ pps}$  的 Nd:YAG 激光器对热敏电阻阻值进行微调的新工艺设备。调阻光束直径为  $30\text{ }\mu\text{m}$ 、调阻精度为  $\pm 0.12\%$ 、工作台行程  $60\times 60\text{ mm}$ 。该机不仅操作简便、稳定可靠,而且大大提高了电阻的调整精度,改善了电阻的互换性能。

### 用激光检测桥梁

用于铁路桥检测、维修和定级的 BJQN-1 型激光桥梁挠度检测仪由北京光电技术研究所研制成功。该仪器使用输出功率  $3.5\text{ mW}$ 、放电管长  $230\text{ mm}$  的 He-Ne 激光器。扩束后的激光束射向置于桥体上的锥体棱镜,反射后成像在一 CCD 列阵二极管上。当列车过桥时,振动导致像上下飘动,经微机处理可得到桥梁挠度的动态信息。应用微机技术可自动补偿和修正误差,可将空气抖动对精度的影响减小至  $0.1\text{ mm}$  以下。仪器总测量精度为  $\pm 0.2\text{ mm}$ ,测量距离  $10\sim 100\text{ m}$ ,测量范围  $0\sim 45\text{ mm}$ 。

### 激光微区取样

中国科学院安徽光机所采用红宝石激光 ( $E_p > 0.7\text{ J}$ ,  $\Delta E/E \leq \pm 10\%$ ) 制成 JC-1 型激光微区光谱取样仪。其采样量为  $10^{-8}\text{ g}$ ,采样熔穴直径为  $10\sim 300\text{ }\mu\text{m}$ 。可对各种物质,如金属、矿石、晶体、半导体等进行无损取样。样品可用普通光谱仪器作定性或定量分析。

### HSC-900 型激光全息散斑检测分析站

此分析站建成在西安交通大学。可作激光全息与散斑照相,具有可同时工作的双全息或双散斑照相头,全自动曝光冲洗,全息图

及干涉图由计算机全自动处理与分析,具有可控的频闪全息及频闪散斑照相功能,装置可移动。将在工程力学、机械、航天和航空等领域获得广泛应用。

### 千瓦 $\text{CO}_2$ 激光器用于缸体激光淬火生产线

中国科学院上海光机所生产了千瓦  $\text{CO}_2$  激光器,并与长春第一汽车制造厂签订了建立汽车发动机缸体激光淬火生产线的全面技术合作的协议。光机所将向汽车厂提供 8 套  $1800\text{ W CO}_2$  激光器及相应导光系统和电控系统。此项新工艺提高了汽缸缸体的耐磨性能,使汽缸运行寿命从几万公里提高到 20 余万公里,节省了贵重材料。

### 激光农业应用有突破

本年度激光农业应用喜获进展。用激光育成的早稻新品种“湘激 80~32”在长沙地区平均亩产达  $450\text{ kg}$ 。激光培育的小麦新品种“秦麦 6 号”具有综合抗病好、适应性强、抗逆性好和高产稳产等优点。早熟类型小麦突变体“815031”可作育种早源应用和两熟制品种生产。以小麦花粉母细胞分裂期诱变的  $L_2$ 、 $L_3$  世代中已获多种变异类型,出现了千粒  $50\sim 60\text{ g}$  重大粒型植株。另外应用远红外激光育种已选出水稻  $F_2$  代的变系株系,发现酯酶同功酶谱带有变化、组培细胞分化率有提高。远红外激光还可增加小麦和大豆的成苗率,当代产量均高于对照组。对小麦有提高酯酶活性的作用。

激光动物育种有较大进展。山东海洋学院用激光诱导细胞融合取得成功。激光波长为  $530\sim 590\text{ nm}$  可调、峰值功率密度为  $10^8\text{ W/cm}^2$ 、激光作用区尺寸为  $\text{nm}$ 。已对 120 对泥鳅受精卵进行了激光照射,即在待融合细胞接触区的质膜上沿垂直方向精确定位照射。获得融合卵 37 例,卵裂和发育均正常,个别的已发育成幼鱼。从而证实了激光融合技术——动物育种的现实可能性。它的显著优点是:无毒、对细胞无损害、且融合后成活率

高。内蒙古农牧学院用激光照射奶山羊鲜精液,发现能提高精子活力和精液品质。授精后未见胎儿畸形,个体间也无明显差异。另外用激光照射绵羊离体精液,发现对谷草转氨酶(GOT)有激活作用。而小剂量激光对透明质酸酶有暂时性抑制作用。

### 激光医学新进展

激光医学领域内,除了治疗人体表面器官疾病的激光美容医疗仪已在国内外得到应用外,还研制成功率大于8W对宫颈糜烂和外痔疗效显著的小光刀、对软组织损伤疗效较高的气功信息治疗仪等,而且出现了能治疗内脏疾病的激光医疗系统。北京工业学院、北京光电技术研究所和上海黄浦区中心医院联合研制的激光光纤药头内窥镜碎石系统就是一个极好的例子。系统采用Nd:YAG激光器,光纤末端输出脉冲激光能量0~100

mJ,输出功率起伏 $<8\%$ ,脉冲宽度 $\geq 0.2$ ms。石英光纤直径为400~500 $\mu\text{m}$ ,对1.06 $\mu\text{m}$ 波长透过率为80%。通过内窥镜将带有药头(直径2mm,长1.2cm)的光纤导管送入胃中,激光象引爆雷管一样,将药头爆炸,爆炸产生的强大冲击波击碎胃石,然后由胃镜取出碎石。已成功粉碎的胃石体积大于 $8\times 10\times 6\text{cm}^3$ 。此外,该系统还可治疗膀胱、输尿管结石和胆结石。其优点是体积小、操作方便、安全可靠、噪声低,可大大减轻患者痛苦。中国科学院安徽光机所使用准分子激光器、Nd:YAG激光器和CO<sub>2</sub>激光器在激光血管成形术和心肌消融方面进行了系列实验,取得了许多重要的实验结果,为激光治疗人体腔内的心血管疾病提供了重要的临床应用数据。

作者谨向提供本年度激光发展动态和信息的个人及单位深表谢意。

(上接第79页)

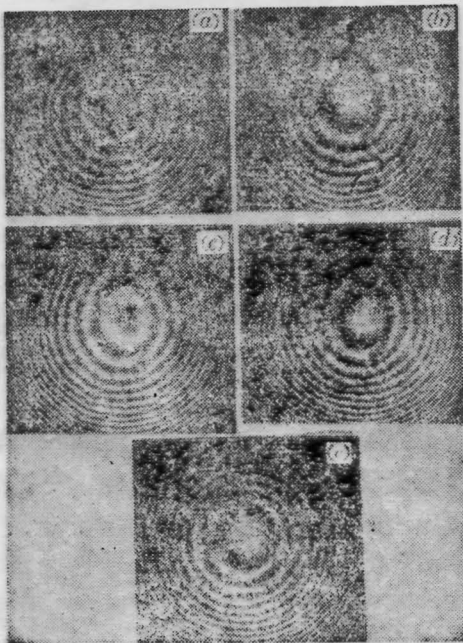


图 4

(a)  $t=0$ ; (b)  $t=5''$ ; (c)  $t=20''$ ;  
(d)  $t=50''$ ; (e)  $t=8100''$

我们用同轴全息干涉仪,测量了片状放大器的热像差及其恢复时间,图4给出 $\phi 200$ mm片状放大器在光泵之后的几个典型时刻的干涉图样。结果表明,放大器各片之间的充氮气间隔受热影响比较严重。但是,这种热波的传输属于慢过程,不会对被放大的激光束带来影响。然而,由于这种热气流,使片产生不均匀的温升,则需要2小时才能恢复到常态。所以,该激光系统的工作周期,必须限定在2小时以上,否则,必须考虑附加的波差畸变,并对靶面的调焦量给予相应的修正。

### 参 考 文 献

- 1 郑玉霞 *et al.*, 中国激光, 10(2), 74~76 (1983)
- 2 余文炎, 王桂英, 光学学报, 2(4), 349 (1982)
- 3 梁向春 *et al.*, 激光, 8(8), 56 (1981)