

中国激光近 10 年的应用发展

陆 治 国

(西北大学物理系)

提要: 概括评述了我国在近 10 年(1974~1984 年)中, 激光技术在工业、全息术与信息处理、仪器以及其他学科的研究中所取得的进展。

Progress of laser applications of China in recent 10 years

Lu Zhiguo

(Department of Physics, Northwest University)

Abstract: Progress of laser applications of China in the recent 10 years(1974-1984) in industry, holography and information processing, instrumentation and other scientific research fields is surveyed in the present paper.

《中国激光》创刊整整十年了。

在这十年中, 我国在激光应用的许多领域开展了大量的工作。如果说十年前我们对激光应用的发展还有些“盲目乐观”的话, 那么这十年的工作则是扎实而细致的。许多实验性样机已经向生产转化, 许多实际问题已经得到解决, 并积累了开展应用研究的多方面经验。这一切为激光在新的技术革命中大显身手奠定了坚实的基础。

本文试图对十年来我国激光应用的发展概况予以综述。

工业应用

激光加工是激光应用中开展最早、影响最大的一个领域。

七十年代中期, 工业中应用激光技术首

推宝石打孔, 生产单位差不多已有近十年的试产阶段, 但真正在生产中取得良好经济效益还是近几年的事。如 YAG 激光快速打孔, 使产品的质量和产量比十年前使用的钹玻璃激光打孔机有大幅度提高, 工作效率提高近 12 倍^[1]。过去一般只限打小孔, 目前对大孔和微孔的加工工艺也已经成熟。微孔加工方面, 在不锈钢片上得到了 0.015 毫米直径的微孔^[2]。

激光脉冲调制打孔技术促进了打孔技术的发展。对掺钕的玻璃激光器和 YAG 激光器的自由振荡, 利用超声振动镜、声光调制器、色心饱和吸收等方法在谐振腔内引进周期损耗, 它与激光器固有弛豫振荡频率共振, 使激光器输出有规则的不衰减的脉冲尖峰序列。用这样的激光脉冲打孔, 可以较大地

收稿日期: 1984 年 5 月 30 日。

改善打孔的精度、表面质量及打孔的重复性^[3]。

激光焊接在激光发展头十年仅限于微型点焊^[4]。近十年来由于连续 CO₂ 激光器功率不断提高,缝焊也已付诸实践^[5]。目前在我国较多开展的是脉冲焊接,在电子工业中已经有广泛的应用,在钟表行业中也解决了生产中的不少难题。

利用多模输出百瓦级封离型二氧化碳激光器组装成的焊接装置,对厚度为 0.5 毫米以下的铁合金材料和某些仪器、仪表组件进行了连续激光焊接^[6]。进一步研究表明,在密封焊接时要选用性质相近的材料,对热导率好的金属材料要预热处理。对激光功率、脉宽、重复频率和光斑重迭度等都有严格的要求。

激光切割包括两种类型,一是聚焦激光束借助辅助气体使熔化的材料从光作用区排出实现切割的;另一种是聚焦的光束使材料造成热应力而断裂。前者用于金属材料,后者用于陶瓷之类的脆性材料。1977 年 500 瓦的 CO₂ 激光器数控激光切割机已经用于钢板制件的切割^[7],近来又用于雕刻印花滚筒和电传打字机色带切割等^[8]。

随着数千瓦连续二氧化碳激光器研制的进展,激光热处理的研究工作也蓬勃开展起来。用激光淬火较常规淬火提高硬度 15~20%。常规淬火较难处理的低碳钢硬度提高的幅度较大。对几种碳素钢中的淬火研究表明,淬火组织为马氏体,但马氏体的形态很小,完全淬火区与不完全淬火区内的马氏体极为细小,这正是激光退火韧而不脆,较常规热处理硬度高的原因之一^[9]。

理论分析^[10]认为,当激光照射到金属表面时,一部分被反射,一部分进入金属内。进入金属的部分主要被电子所吸收,然后转化为晶格的热振荡,形成热传导过程。当激光被金属表面吸收后形成“热层”,此“热层”即为热处理的热源,其形成的时间远小于激光

照射时间,厚度也远小于硬化厚度。所以除很薄的“热层”以外,金属内部的温度变化都是依靠热传导方式进行的。

激光热处理不仅用于金属材料,在电子工业中也作了应用尝试。用连续二氧化碳退火处理的离子注入型光电二极管可以提高蓝光灵敏度。对 As⁺ 注入 Si 的连续 CO₂ 激光退火也作了分析,用激光诱导扩散制成了太阳能电池^[11]。

激光在电子工业中的应用是激光应用最有前途的领域之一。除了上述已经涉及的方面之外,还有用全息照相制造光刻掩模,激光预热基片化学气相沉积硅薄膜,用激光合金化在 *n* 型 GaAs 上制作欧姆接触,用 YAG 声光调 Q 激光进行电阻调整等。

全息术与光信息处理

激光全息术原理性实验在我国已属头十年的工作,而真正大量付诸应用还是这十年的事。早些时候较多的工作是利用二次曝光测定形变位移,作为应力分布测试的基础。这种方法已广泛用于测量叶片、圆板、方板的应力分布,发动机活塞热形变,透明体内部折射率分布,以及蜂窝结构无损检测、文物无损探伤、建筑物振型研究等。应用较为成熟的是轮胎全息无损检测^[12,13],尤其对轮胎内部脱层检查,较其他方法更具有优越性。对高 1.6 米、宽 1.1 米的铣床在普通车间拍摄了全息图,用微处理机得到了它的三维位移的资料^[14]。全息干涉计量还成功地用于光弹性应力测量、风洞流场测量等。

全息显微术特别是在医学、生物学方面有着广泛应用价值,它可以记录生物体的三维活动情况。早在 1976 年^[15]对硅藻、水绵合子以及其他原生动植物或生物体等都作了一系列全息显微照相,取得了良好效果。

普通平面全息图记录和重现的视角最大不超过 180°,为了增加视角和充分利用照相

的立体性,发展了广角全息,如分步记录多边形广角全息术,采用狭缝掩模制作广角全息图^[16]等。

利用多脉冲红宝石激光器作光源 1978年已经得到连续拍摄 11 幅全息图,可用于记录快速运动物体的瞬时状态的高速全息摄影^[17]。

彩色全息有了不少新的制作方法,如普通摄影法,将拍摄对象分为三基色象,并以黑白正片的形式分别记录在感光胶片上,然后再分别记录在三幅长条形全息图中。用单色共轭光波照明这三幅全息图,在空间某个位置上三幅全息图的再现实象重迭在一起,同时在此位置上放全息底片,把这三个实象(反映了三基色象的信息)记录在全息图中,此全息即为彩色全息图^[18]。彩色立体显示的一个重要途径,就是用李普曼全息术记录彩色全息图,用白光再现。但是常用的银盐照相乳剂灵敏度虽高,因噪声及衍射效率的性能不如重铬酸盐明胶,故象质和亮度也不如后者。用亚甲基蓝染料作敏化剂可使重铬酸盐明胶的感光范围扩展至红光区域,用 He-Ne 激光的红光拍摄全息光栅获得了 84% 的衍射效率^[19]。

计算机产生的全息图可以给出任何所需的波前。已用于检验非球面镜^[20]。与计算机产生全息图相类似的一种相位型再现元件——相息图是一种不引入参考束,假设在整个记录平面内光波振幅为常数的条件下,直接记录光波相位的元件。相息图是由计算机产生的,可用于三维立体显示,特别对那些由数学描述而实际不存在的物体更适合。虽然相息图在再现方式上与同轴全息图相似,但它的再现象可以不存在共轭象的干扰,只要相位匹配足够精确,再现的效率可以很高,并且可以用普通光源再现。

液面法超声全息显象技术,能实时地、动态地显示物体内部结构,并且具有形象逼真、图象分辨率高等优点。采用脉冲超声波的聚

焦液面超声全息,得到了清晰的活鲫鱼象、成人的手掌手臂象,不仅能看到指骨、掌骨、尺骨和挠骨,还能看到 X 射线无法显示的一些软组织——肌肉等^[21]。此外还作了物体内部无损检测等试验。

对激光全息照相来说,斑纹(散斑)不仅影响再现现象的分辨率,而且还会形成背景噪声。但是斑纹干涉量度学的发展,使得激光斑纹现象被广泛用于位移和应变测量。特别是在测定垂直于观察方向上平面的位移分量就特别有利。激光斑纹干涉测量可作为全息测量的一种补充,例如,在同一张双曝光的象平面全息图上测量物体三维微小位移时,物体的离面位移用通常的二次曝光全息干涉法来测量,而物体的面内位移,则通过对该全息图中同时包含的叠加斑纹图样作光学傅里叶变换来测量,以提高测量物体面内位移的灵敏度^[22]。此外也用于其他力学参量的测量,如离面位移、转角、振动等^[23]。

全息图的信息量与记录的方式有关,而它的最大信息容量则是由底片的尺寸 c 、分辨能力 d 以及底片的动态范围 R 决定的,它等于 $(c/d)^2 \log R$ 。I 型 (6328 \AA) 和 II 型 (6943 \AA)^[24] 全息干涉板的分辨能力为 2800 ~ 3000 线/毫米,另外还试制了光导热塑料和有机光色材料自由基片^[25]。

逆转滤波器是在图象处理中实现除法的重要元件,最有兴趣的应用是模糊象的恢复和 X 光孔径编码成象。有一种新的逆转滤波器基本原理和实验技术^[26],显示用全息法做的逆转滤波器比三明治法效果好。

在制造消模糊空间滤波器时,为了使恢复象具有最好的逼真度和高的分辨率,需要滤波器具有尽可能大的动态范围。在 S. I. Ragnarsson 提出全息方法产生高效率宽动态范围空间滤波器的基础上,用合成全息术把滤波器的动态范围进行了进一步扩展,并将这种方法应用到对离焦模糊图象的处理上,获得了较好的效果^[27]。用非线性记录的

全息复合光栅也可作为微分滤波器^[28]。光学微分不仅是一种重要的光学-数学运算,而且也是提取图象轮廓、进行图象识别的一种手段。

关于象全息编码的白光图象处理问题,曾提出过用不同取向的矩形光瞳调制激光散斑,代替光栅作图象的编码^[29],还提出用激光象全息作图象的编码,然后在白光处理系统中实现各种运算的原理和实验方法,并通过对白光系统中编码片的频谱分析导出参考光最佳角度的计算公式。另外,还研究了时间和空间部分相干照明对光信息处理系统的噪声演绩作用^[30]。有一种新的非漂白相位型银全息图,应用于文字、图象存贮方面,包括高密度全息资料的记录、复制和显印。在直径1毫米的物光斑面积内可记录16开资料1~2页,再现象质量清晰,无散斑噪音,全息图的印出可采用傅氏变换将全息资料复印在135胶卷上,也可采用静电直接复印^[31]。

在地下勘探工作中,需要分析大量的地球物理勘探所得的地震记录和地质岩层剖面资料。利用建立在傅里叶光学基础上的相干光学信息处理系统,滤去地震记录上的噪声提取有用的信息,可以改善岩层剖面的对比度,使剖面构造清晰可见。光信息处理比电子计算机具有经济和快速的优点。在大量需要处理的地震记录和陆地卫星图片中特别有利^[32]。

激光仪器及其应用

根据激光的基本特性研制了各种各样的激光仪器,这些仪器被广泛地用于各行各业,尤以形形色色的测试仪器占有更大的比重。

激光干涉测长仪器是最早发展起来的激光仪器之一。随着稳频技术的发展,人们期待早日使空间和时间的测量有统一的基准。近十年来,不仅建立起了不同精度的长度基

准,更重要的是开始了现场高精度测长。

激光测距分为脉冲测距和相位测距。脉冲测距在十年前已经进行了大量的工作,并很快接近成熟。这些年在提高精度和可靠性、减轻重量、缩小体积、扩大应用范围等方面作了不少工作。使用 45° LiNbO₃晶体调Q的YAG激光器,最大测距5000米,测距精度0.5米^[33]。用低阈值高效率的NbP₅O₁₄晶体制成的激光器,仅重23克,测程可达60~3000米,精度2.5米,使整机重量有希望大大减轻。激光相位测距在大地测量中应用极广,DC30JG气体激光测距仪^[34]的测程为15米~30公里,精度 ± 5 毫米 $+0.8 \times 10^{-6} D$ (D 为被测距离)。这类测距仪除在地质勘探、测绘等部门迫切需要外,还可用于海浪剖面测量。

激光测速仪器,一般是基于多普勒效应。双散射激光测速仪^[35]是把两束激光(He-Ne)聚焦于被测区上,当气体或液体流过时,微粒散射光与入射光的频差与流体速度成正比。测速范围3毫米/秒~300米/秒,精度1%。用CO₂激光制作测速仪可用于各种车辆、船舶和运动目标动态性能的研究^[36],还可用于测量沙风洞中风沙的速度。还有一种应用声光调制器作为频移器件的激光测速系统,成功地用于测量二维阶跃扩张管道中的高湍流度回流流场,得到了平均速度、湍流度和速度概率函数空间分布^[37]。为了测量被高功率激光或冲击波加速的高速靶面运动速度,利用双脉冲放电激励的染料调Q红宝石激光器,用标准具做光谱分析仪是合适的,在250米的距离可测定合作目标瞬时的飞行速度^[38]。

利用激光相干性好的特性制成了各种干涉仪。1974年已经报导用He-Ne激光管作光源制成的激光球面波干涉仪^[39],可以用来无接触地检验任意口径镀铝或未镀铝的凹球面镜的完善程度。加入辅助镜后可以检验天文望远镜用的各种非球面介质(如光学玻璃)

的均匀性,也可以检测光学系统的质量及安装变形情况。如果装上标准尺及导轨还可以测量凹球面的曲率半径,并能给出物镜对于使用的 He-Ne 激光器波长的波面差及测出某些象差。CLS-95 型激光平面干涉仪^[40]是根据等厚干涉原理制成的。平面度测量实际精度小于 $\lambda/15$, 平行度测量精度小于 $1''$ 。

单平板, 双平板以及 Talbot 等类型的剪切干涉仪也相继研制成功, 已用于激光束波前和相干长度测量、棱镜和透镜的检测等^[41~44]。

利用激光束具有良好方向性的特点研制了各种类型的准直仪和指向仪, 并早已得到了广泛的应用。

利用望远镜系统压缩光束发散角可以提供要求不太高的准直光束。这种系统可用于矿井、隧道、桥墩等工程及船舶导航。利用波带板制成的准直系统可在 336 米距离上得到偏差 ± 0.1 毫米的准直精度^[45]。在大型工件安装中, 要求足够高的空间基准精度。早期样机的水平是 27 米距离内光斑不稳定范围是 ± 0.1 毫米^[46], 在 100 米距离内, 重复精度为 0.05 毫米, 最小分辨率为 0.01 毫米^[47]。研究表明倒望远镜系统的热变形对光束方向漂移影响甚大, 经减少激光管对望远镜的热传播后, 在一定条件下可以得到 $\pm 0.1''$ 的稳定精度^[48]。又经对三点法点光源的稳定性和光束传输的影响的研究, 研制一台在 21 米长, 精度为 $\pm 0.6 \sim 0.8$ 微米的激光准直装置。可测出人造断层的潮汐变化, 并能用于地震预报和大坝变形测量^[49]。

激光高压电流计是基于法拉第磁光效应, 可对超高压线路进行无接触测量。线电压 22 万伏时, 作过 100 安电流的试验, 野外运行精度高于 3%^[50]。用 He-Ne 激光器作光源也可以无接触测量高电压, 用电光晶体 LiNbO_3 作克尔盒, 运用横向调制在 150 千伏电压下实验, 最大相对误差为 7.7%, 平均相对误差不大于 2.0%^[51]。

激光微区光谱分析仪的基本结构是将激光束经显微镜聚焦成极细的光束, 使被测物质气化, 并以辅助电极激发发出光谱, 然后用摄谱仪进行定性定量分析。具有分析速度快, 准确度和灵敏度高的特点, 不必制备样品, 几乎不破坏分析物。所以应用比较广泛。相对灵敏度为 0.01~0.001%, 绝对灵敏度 $10^{-9} \sim 10^{-13}$ ^[52, 53]。

此外还有激光无标尺地形仪、激光经纬仪, 激光地形测绘仪、激光热导仪、激光液面控制仪、激光打号机、激光打印机、激光大屏幕彩色电视机、瓦斯报警器等, 这些形形色色的仪器几乎遍布各行各业。

激光在其他学科中的应用

激光作为一门新学科和新技术, 已经很快地渗透到其他许多学科, 并产生了巨大的影响。这里只作简单介绍。

1. 激光在物理学中的应用

激光问世以来, 给物理学带来了多方面的深刻的变革。

自从 1961 年发现光的二次谐波振荡以来, 非线性光学一直是一个非常活跃的领域。在本刊创刊号上就有关于连续 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}-\text{LiIO}_3$ 倍频激光器的报导^[54]。1977 年, 用 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光的二次谐波泵浦双共振谐振腔中的碘酸锂晶体, 观察到简并点附近的调谐输出^[55]。1978 年首次观察到有机染料做介质简并四波混频现象^[56]。随后对多光子吸收、自聚焦、受激喇曼散射、位相复共轭等新的非线性光学效应进行了大量的研究^[56]。近年来关于多光子离化、非线性光谱学、光学双稳态、瞬态相干作用等也进行了较深入的探讨。等离子体中的非线性光学效应, 与激光核聚变密切相关, 已经活跃起来^[57]。我国在四年前已经报导了关于均匀与非均匀等离子体中的受激散射与谐波理论问题。光纤中的非线性效应也引起了注意, 用 $\text{YAG}:\text{Nd}$ 倍

频光泵浦石英多模光纤得到 546~702 毫微米的十级斯托克斯受激散射^[58]。

高质量的可调谐激光器的应用促进了光谱学的发展,形成了物理学一个新的分支——激光光谱学。近年来我国不仅在非线性激光光谱学方面作了大量工作,而且还在高分辨率光谱学、光电流光谱学、里德堡光谱学、微量样品的高分辨率光谱学等方面都作了不少工作。用 633 毫微米激光饱和吸收光谱研究¹²⁷I 的超精细结构,观察到碘分子 $B \leftarrow X$ 电子跃迁 11-5R(127) 带和 6-3 带 $P(33)$ 全部超精细结构分量^[59]。铯原子 $2^2P \leftarrow 2^2S$ 跃迁的超精细结构和同位素位移等^[60]。另外,对亚自然线宽双光子光谱学问题也作了探讨^[61]。

我国早在 1965 年就开始从实验和理论两个方面开展激光核聚变的探索研究工作。1973 年同时建立了两台万兆瓦级的钽玻璃高功率激光系统,在氘冰和氟化铯平面靶获得了每个脉冲近千个中子的输出。次年又建成一座末级采用大口径片状放大器的大型单路激光系统,输出功率提高到 20 万兆瓦,脉宽 2 毫微秒。这台器件辐照氟化聚乙烯平面靶,使单脉冲中子产额提高到 2 万个以上。1977 年曾用 20 万兆瓦、脉宽 1 毫微秒的六路更大功率的激光装置进行了多束激光辐照玻璃壳靶的实验,观察到激光驱动的靶物质的初步压缩效应。

2. 激光化学

在化学光谱学方面,过去单光子过程构成了传统光谱学和光化学的支柱,而激光的出现则为与多光子过程有关的新化学打开了大门。如用 193 毫微米 ArF 准分子激光对 $HgBr_2$ 进行单光子和双光子解离的研究^[62],双频 CO_2 激光多光子离解 CF_3CHCl_2 分离氙^[63] 甲醇的红外多光子离解^[64],相干反斯托克斯喇曼散射光谱方法的化学应用研究^[65] 等。

在激光诱导化学反应方面,近年来进展

也很迅速。如卤代乙烷的红外脉冲激光诱导反应^[66],脉冲 CO_2 激光作用下光气在 BCl_3 中的分解与生成^[67]。另外还有关于 $CF_2Cl_2 + NO$ 的激光诱导反应,铂、金和钼在硅界面上的激光诱导反应等。

3. 同位素分离

激光分离同位素主要依据原子和分子光谱的同位素位移效应。激光辐射选择激发同位素粒子使其发生物理的或化学的变化,从而有可能选出所要分离的同位素。近十年来,我国的同位素分离工作已有硫、硼、锂、铀、氦……的大量报导。

4. 激光在生物学和医学中的应用

激光用于农作物育种的研究工作,我国已有十几年的历史,不仅得到了早熟、抗病、增产的效果,而且也培育出了不少的良种,如水稻、小麦、棉花等。激光现在也成了兽医们的有力工具,对牛、马、猪、狗、鸡等家畜的某些疾病取得了不同的疗效。

激光在医学上有广泛的应用。它不仅可以作为各种器械和医疗设备,而且可以直接用于诊断和治疗,它对许多疾病都有明显的疗效。

激光在癌症诊断和治疗中的地位唤起医学界的极大兴趣。它既可完成外科切除肿瘤,也能在目前正在探索的途径中发挥作用。如用激光照射的光化作用改变癌生物学过程,封闭血管断绝肿瘤的血供,局部凝固及加热杀伤癌细胞,激光照射激发机体的免疫力等。特别值得一提的是激光-血卟啉的新疗法,我国从 1980 年开展这方面的研究工作。

《中国激光》(《激光》)的十年也正是我国激光事业十年发展的写照,在庆祝创刊十周年的今天来回顾我国激光应用发展及其在四个现代化中的贡献,也说明了本刊在我国推广和应用激光技术中所起的积极作用。

上述关于激光发展的概述因仅取材于《中国激光》(《激光》)的部分(也不是全部)资料,所以不能说是我国应用发展的全貌。由

于我们的水平所限,内容也是零碎的和不准确的。尽管如此,已足以说明激光技术对各行各业影响之广,对各学科影响之深,对国民经济影响之大。毫无疑问它将是这次新产业革命中的主要领域之一。

祝《中国激光》在未来的年代里,伴随着激光事业的兴旺发达而展翅高飞吧!

参 考 文 献

- [1] 中国光学学会激光专业委员会;“全国激光工业应用技术交流会文集”,1983年10月,西安,17页。
- [2] 同[1],16页。
- [3] 富崇大等;《中国激光》,1983,10, No. 1, 20。
- [4] 上海无线电十三厂激光小组;《激光》,1974,1, No. 1, 51。
- [5] 中国科学院上海光机所 CO₂ 激光加工小组;《激光》,1975,2, No. 4, 10。
- [6] 同[1],14页。
- [7] 长春第一汽车制造厂轿车分厂等;《激光》,1977,4, No. 5, 10。
- [8] 同[1],12~13页。
- [9] 蒲万林等;《中国激光》,1983,10, No. 11, 759。
- [10] 解伯民等;《中国激光》,1983,10, No. 11, 754。
- [11] 同[1],9~11页。
- [12] 谢相森;《激光》,1981,8, No. 10, 30。
- [13] 谢相森;《激光》,1982,9, No. 11, 734。
- [14] 谭玉山;《中国激光》,1983,10, No. 8~9, 641。
- [15] 福建师范大学物理系激光全息组;《激光》,1976,3, No. 4, 20。
- [16] 董碧珍等;《激光》,1978,5, No. 5~6, 35。
- [17] 中国科学院西安光机所二室全息组;《激光》,1978,5, No. 5~6, 36。
- [18] 陈岩松等;《激光》,1978,5, No. 5~6, 37。
- [19] 曲志敏等;《激光》,1982,9, No. 1, 17。
- [20] 施志果等;《激光》,1981,8, No. 6, 42。
- [21] 姜锦虎等;《中国激光》,1983,10, No. 1, 49。
- [22] 黄乐天等;《激光》,1979,6, No. 7, 54。
- [23] 赵晔英等;《激光》,1980,7, No. 4, 32。
- [24] 《激光》,1978,5, No. 4, 61。
- [25] 石道钧等;《中国激光》,1983,10, No. 7, 439。
- [26] 姜亚光等;《中国激光》,1983,10, No. 8~9, 654。
- [27] 郑师海等;《激光》,1980,7, No. 2, 55。
- [28] 冯玉芬;《中国激光》,1984,11, No. 3, 131。
- [29] 母国光等;《中国激光》,1983,10, No. 8~9, 647。
- [30] 庄松林;《中国激光》,1983,10, No. 8~9, 649。
- [31] 袁维本;《激光》,1981,8, No. 1, 39。
- [32] 马德岩;《激光》,1982,9, No. 11, 727。
- [33] 周正文;《激光》,1981,8, No. 11, 46。
- [34] 中国人民解放军总字706部队等;《激光》,1975,2, No. 4, 7。
- [35] 宁夏回族自治区银河仪表厂等;《激光》,1976,3, No. 5, 13。
- [36] 中国科学院长春光机所激光测速组;《激光》,1977,4, No. 4, 10。
- [37] 沈熊等;《激光》,1982,9, No. 10, 645。
- [38] 邓锡铭等;《中国激光》,1983,10, No. 12, 843。
- [39] 李德培等;《激光》,1974,1, No. 2, 6。
- [40] 北京科学仪器厂;《激光》,1976,3, No. 2, 19。
- [41] 梁向春等;《激光》,1979,6, No. 4, 47。
- [42] 梁向春等;《激光》,1980,7, No. 7, 41。
- [43] 罗懿祖等;《中国激光》,1983,10, No. 4, 225。
- [44] 陈钰明等;《激光》,1980,7, No. 10, 38。
- [45] 武汉测绘学院等;《激光》,1976,3, No. 4, 11。
- [46] 南京航空学院激光自动机研制小组;《激光》,1974,1, No. 2, 44。
- [47] 吴存恺等;《激光》,1975,2, No. 2, 55。
- [48] 王绍民等;《激光》,1978,5, No. 1, 12。
- [49] 王绍民等;《激光》,1980,7, No. 3, 54。
- [50] 李东健;《激光》,1979,6, No. 11, 60。
- [51] 赵琨等;《激光》,1980,7, No. 7, 51。
- [52] 吉林省联合研制组;《激光》,1976,3, No. 1, 20。
- [53] 新疆维吾尔自治区地质局实验室激光组;《激光》,1976,3, No. 2, 8。
- [54] 上海交通大学激光研究室器件组;《激光》,1974,1, No. 1, 10。
- [55] 初桂荫等;《激光》,1978,5, No. 5~6, 31。
- [56] 吴存恺;《激光》,1979,6, No. 3, 12。
- [57] 谭维翰等;《激光》,1980,7, No. 5~6, 18。
- [58] 高佩娟等;《激光》,1980,7, No. 4, 11。
- [59] 李复等;《中国激光》,1983,10, No. 2, 85。
- [60] 李明光等;《激光》,1982,9, No. 7, 434。
- [61] 黄永楷;《中国激光》,1983,10, No. 4, 193。
- [62] 袁才来;《激光》,1981,8, No. 4, 62。
- [63] 潘大任;《激光》,1982,9, No. 3, 152。
- [64] 张允武等;《激光》,1981,8, No. 1, 56。
- [65] 高振等;《中国激光》,1983,10, No. 1, 13。
- [66] 王文韵等;《激光》,1982,9, No. 10, 651。
- [67] 李丽等;《激光》,1982,9, No. 9, 570。