

文章编号: 1001-3806(2011)06-0795-05

机载激光多普勒测风雷达技术及其应用

陈涌¹, 周秉直², 谭锦³, 冯力天¹, 杨泽后¹, 赵彬¹, 周鼎富¹, 侯天晋¹

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 陕西省计量科学研究院, 西安 710048; 3. 解放军驻西南技术物理研究所军事代表室, 成都 610041)

摘要: 为了加快发展我国机载测风雷达技术, 对机载激光多普勒测风雷达的研究及应用情况进行了介绍, 对机载激光多普勒测风雷达的基本工作原理、系统组成、应用方式及领域等进行了分析, 并对光纤激光器在机载雷达系统中的应用进行了预测。结果表明, 采用全光纤相干结构的机载测风雷达具有测量精度高、结果稳定可靠、响应速度快、系统结构紧凑、环境适应能力强、适合多种工作平台等特点, 可广泛应用于各型大型飞机提供下视高度详尽的大气风场气象参量, 以保障空投空掷作业的准确性与安全性; 另外还可以为飞机飞行提供前方航道大气湍流及横切风的预测, 保障飞行安全等。

关键词: 激光技术; 机载; 激光多普勒测风雷达; 大气风场测量; 激光器

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.020

Research and application of airborne laser Doppler wind lidars

CHEN Yong¹, ZHOU Bing-zhi², TAN Jin³, FENG Li-tian¹, YANG Ze-hou¹,
ZHAO Bin¹, ZHOU Ding-fu¹, HOU Tian-jin¹

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. Shaanxi Institute of Metrology Science, Xi'an 710048, China; 3. Deputy of PLA to Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Airborne laser Doppler wind lidars and their applications were introduced. The basic working principle, system constitution, application modes and fields were analyzed. It was predicated that the fiber laser should be applied in airborne laser Doppler wind lidars for the wind lidars combined with all-fiber coherent laser have advantages of high accuracy, reliable measurement, fast response, and compact volume, etc. The airborne Doppler lidars can be used in many applications such as airdrop or flight safety for large airplanes since detailed meteorological parameters can be provided.

Key words: laser technique; airborne; laser Doppler wind lidar; atmosphere wind field measurement; laser

引言

激光多普勒测风雷达是利用大气中随风飘移的微小颗粒(气溶胶)对激光后向散射回波的多普勒频移效应来对大气风场结构分布进行非接触式3维测量的一种现代光电技术, 具有测量精度高、测量范围广、系统体积小、电磁兼容性强、人眼安全、隐蔽性好等特点^[1]。

根据应用目的不同, 对于机载激光多普勒测风雷达(twin otter Doppler wind lidar, TODWL), 一方面可通过激光束的下视扫描, 实现对飞机正下方空域的风场测量, 获得从地面到飞行高度之间各个高度层的风场分布; 另一方面, 还可以利用激光束对飞行正前方空域进行扫描测量, 获得飞行航路前方的3维风场实时数据。因此, 机载激光多普勒测风雷达在大型运输机

的运输空投、飞行过程中对危险气候空域进行有效规避、以及陆地及海洋气候测量等方面, 具有非常大的应用前景。

传统的飞行航道及空投气象测量手段主要包括机载气象雷达、微波风廓线雷达, 以及在地面如飞行航道附近放飞高空探空气球等形式提供一定时间段的风场数据等方式^[2]。这些方法都具有一定的应用局限性: 机载气象雷达主要用于对飞行航道上的气象条件进行测量, 无法获得飞行航道下方各距离层的风场分布; 而地面测量方法容易受到作业环境如雷电及周围电磁干扰等条件限制, 导致其数据实时性、实地性及置信度变差, 同时容易暴露作业意图、干扰航路, 因而在实际应用中受到一定的限制。

1 机载激光多普勒测风雷达系统工作原理

相干激光多普勒测风雷达系统采用单频窄线宽脉冲激光器作为辐射光源, 将从大气气溶胶颗粒后向散射的激光回波通过接收天线收集并送入相干光

作者简介: 陈涌(1975-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事激光雷达算法技术的研究。

E-mail: cycycy58@sohu.com

收稿日期: 2011-11-17; 收到修改稿日期: 2011-05-31

路中进行混频,信号处理系统对外差中频信号进行实时采样检波分析,并通过时间距离门的设置,计算出各个距离段大气沿激光束方向的视线风速^[3]。系统在工作过程中,同时配合进行光束的空间扫描,以完成目标空域各相关区域的风速测量,并反演形成完整的3维风场分布测量结果。系统工作原理示意图如图1所示。

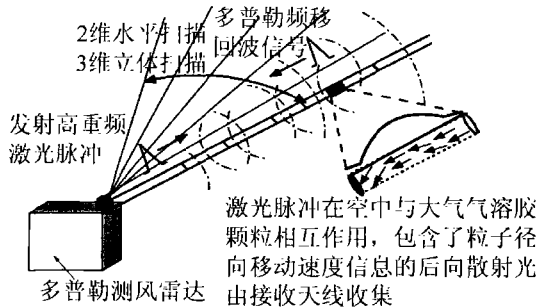


图1 脉冲多普勒激光测风雷达工作示意图

激光多普勒测风雷达主要由激光发射机(含窄线宽种子激光器和激光脉冲放大器、声光调制器(acoustic optical modulator, AOM)、收发隔离光学器、收发合一天线等),空间光学扫描器、外差相干探测接收机,高速数据信息处理单元,雷达系统控制及通讯接口,以及系统电源及温控等组成。系统工作时,激光发射机中的连续种子激光经AOM调制成脉冲光,经过激光放大器放大形成高重频激光脉冲,再经过收发隔离光学器及发射天线发射后,最后通过空间光学扫描器后向空中发射^[4-5]。激光脉冲在空中与大气气溶胶颗粒相互作用,包含了粒子径向移动速度信息的后向散射光由接收天线收集,经收发隔离光学器后与本振光进行相干混频,中频信号送入回波信号处理通道,经高速采样、相干累加、滤波、距离库分解、频谱处理、相差处理、对消处理等,最后所获得的信号各距离段的视线风速信息,也就是沿光束方向各个距离段的风速分量。在该过程中,由于激光束对地的反射信号远强于大气散射回波信号,因此,信号处理系统需要对所采样的回波信号进行甄别,以剔除地面的强反射杂波信号^[6-8]。

为获得空域的3维风场分布,还需要将光束进行空间扫描。根据测量精度以及飞行速度和飞行路径不同,可以选择多种扫描方式。扫描系统能将光束在空间按照设定的扫描路径进行扫描,机载雷达系统在获得一个完整扫描周期的径向风速数据后,再对所获得的数据进行风场反演计算,雷达系统最后将数据与飞机的空速及航向等进行综合计算,从而获得需要的各个高度距离层的风速、风向等信息。系统工作原理图如图2所示^[9-10]。

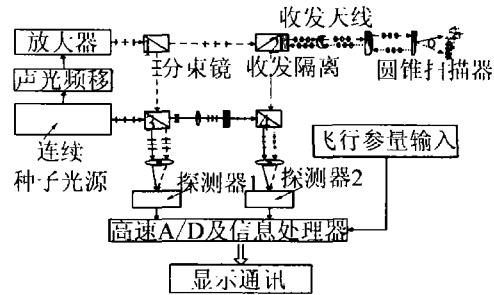


图2 机载多普勒测风雷达工作原理

2 国外发展情况

国外对相干激光多普勒测风雷达的应用研究较早。从20世纪70年代开始,美国就开始了基于CO₂激光器的相干激光雷达技术研究。1976年,林肯实验室研制的“火池”CO₂相干激光雷达,充分验证了激光雷达的优越性。在20世纪80年代,英国国防鉴定与研究局的研究人员研制了采用连续波的相干外差CO₂激光多普勒测风雷达(LATAS系统),对飞机前1km的微爆风切变和发动机后的尾流速度进行测量,测量精度达到0.1m/s。20世纪90年代,法国CILAS公司研制了连续波CO₂相干激光多普勒风速计,能实现飞行器前方不小于500m范围的风场测量。该系统改进型已经应用于空客A380飞机上,对发动机附近的气流风场进行实时监测^[11-12]。

由于在高空进行投掷作业时,可能受到风的干扰。美国空军司令部于20世纪90年代开始推行弹道风计划,使用机载激光雷达来实时测量飞机和地面间的风速,以便从3000m以上的高空精确地投掷。1995年已开始使用C141飞机进行飞行试验。另外,20世纪90年代末,美国洛克·马丁相干公司与法国一家公司合作,联合研制出了机载CO₂(10.6μm)激光多普勒测风雷达。该雷达系统的作用距离可达3km~15km,距离分辨率250m,风速精度0.5m/s~2m/s。该系统于1999年首次试飞成功。

1990年,CLR Photonics公司研制出第1台灯抽运5Hz,30mJ的2μm固体激光器,CTI将其用于相干激光多普勒测风雷达系统,研制出了世界上第1台2μm相干激光多普勒测风雷达。由于该系统的独特技术优势,很快引起美军方的重视,洛克·马丁与CTI合作成立了LWCT公司,相继推出了多种后续研究成果,其中较有代表性的为CWOLF, VALIDAR和WINDTRACE等。美国圣·路易斯机场和香港国际机场,也分别于2002年和2003年安装了WINDTRACE陆基型商用激光雷达,用于对机场上空的风场进行监测^[13]。

此后,LWCT公司采用2μm激光的WINDTRACE

机载激光多普勒测风雷达也陆续装备于各型飞机上, 承载平台包括波音 737、大力神 C130, C141, P-3, 以及 UH-60 直升机, 能分别实现飞行路径上的前视风场测量和飞机下方风场的测量(见图 3)。

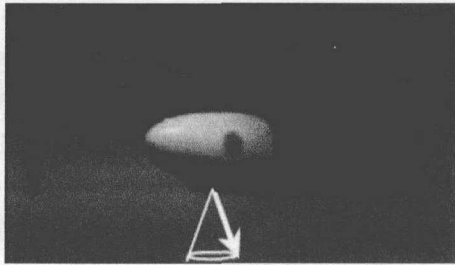


图3 装置于 C130 机上的 2 μm 激光测风雷达

2001 年至 2005 年, 美海军实施了 CIRPAS 计划, 与 CTI 合作研制出 TODWL, 该项目将一台 2 μm 激光多普勒测风雷达安装于海军的双翼飞机的机侧, 通过 2 维光束扫描器, 实现对飞机前方、上方、下方以及侧方空域的大气风场扫描测量。图 4 及表 1 中分别为 TODWL 安装照片及主要技术指标。2008 年夏天, 在原 TODWL 基础上, 美海军将新一代 1.6 μm 的激光多普勒测风雷达装载于 P-3 飞机上, 并在西太平洋上空试飞, 在 3km 的高度上, 实现了对飞机前视、侧视及下视等方向上的大气风场测量。

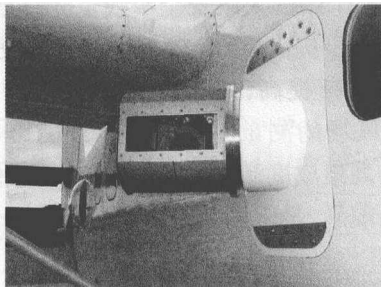


图4 TODWL 2 μm 机载测风雷达

表1 美国海军 TODWL 主要参量

波长/ μm	2.05 (人眼安全)
脉冲能力/mJ	2~3
脉冲重复频率/Hz	500
扫描仪/望远镜	2 轴($\pm 120; \pm 30$)/10cm 口径
距离分辨率/m	50~100
测量精度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	<0.05
风场的准确性/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	各风速分量小于 0.1m/s
气溶胶后向散射阈值灵敏度 范围依赖: 大约 $10^{-8} \text{m} \cdot \text{sr}^{-1}$ (10km 处)	

随着光纤激光技术的发展, 采用光纤激光器作为光源的激光多普勒测风雷达研究逐渐得到发展。典型代表如 2005 年英国 QINETIQ 公司研制的 ZEPHIR、2007 年法国 LEOSPHERE 公司的 WINDCUBE 系列(见图 5)、2007 年日本三菱公司、2008 年英国 HALO PHOTONICS 以及俄罗斯 LSC 的光纤激光多普勒测风

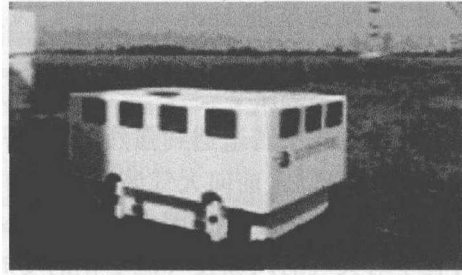


图5 法国 WINDCUBE WLS70 型测风雷达

雷达等。这些雷达均采用 1.5 μm 的人眼安全电信通讯波段, 由于在体积、功耗及环境适应性等方面的优势, 采用光纤激光器作为光源的激光多普勒测风雷达在未来的机载应用上展现了很强的应用前景^[14-15]。

3 机载激光多普勒测风雷达应用

机载激光多普勒测风雷达在飞机上的主要应用包括以下两类: 下视(俯视)风场测量和前视/侧向风场分布的测量^[16](见图 6)。

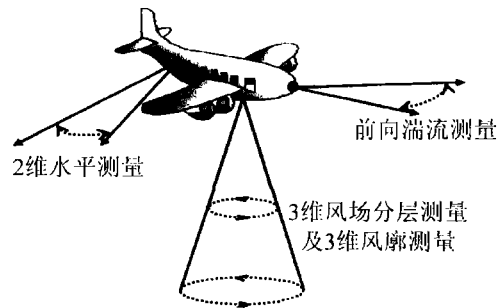


图6 机载多普勒测风雷达工作示意图

3.1 下视(俯视)测风

大型运输机、轰炸机等在高空投掷作业过程中, 由于机下空域的大气风将对投掷物的下降轨迹产生较大影响, 影响投掷精度, 严重的甚至产生数公里的偏移。因而在高空投放等作业中需要充分考虑风场的影响, 提前对风场进行必要的测量并进行必要的修正。

此种工作方式下, 激光多普勒测风雷达采用全埋或半埋的形式安装在机腹内, 或者以吊舱形状外挂安装在机翼下, 通过光学天线及扫描系统对飞机下方空域的风场进行测量, 获得机下各高度层实时的风向、风速、测量统计均方误差、测量时间以及测量地点的地理坐标位置等参量。该方式的工作示意图如图 7 所示。



图7 机载多普勒测风雷达下视测风示意图

其主要参量为:风速范围 1m/s ~ 100m/s, 风速精度 1m/s, 风向精度 ±5°, 测量高度 0.5km ~ 5km。

3.2 前视/侧视风场测风

飞机在飞行过程中若遭遇到强烈的气流,会对飞行安全造成很大的威胁,前向大气湍流和横向剪切风是造成飞行空难事故的主要原因之一。因此,在飞行器飞行过程中对大气的风场及气流变化的实时测量,是飞行过程中的重要任务要求^[17]。

该种工作方式下,激光多普勒测风雷达采用半埋式安装在机头部位,或者悬挂安装在机翼下。雷达系统通过光学扫描部件在飞机前方或侧向形成一个圆锥型的“激光光环”,通过测量气溶胶后向散射光的特性,可以获得飞行前方路径或侧向一定范围内的大气风场实时分布(包括前向湍流、机翼附近的横向剪切风等)。

4 未来发展方向

过去几十年中,激光多普勒测风雷达通常采用 10.6μm 的 CO₂ 激光器,以及 1μm ~ 2μm 的固体激光器为光源。由于这类激光器存在线宽宽、光束质量差、体积大、效率低以及抗冲击振动和环境适应能力弱等原因,使以这类激光器作光源的相干体制激光多普勒测风雷达在机载平台上的发展受到了一定的制约。

光纤激光器采用柔性光纤作为增益介质,采用长寿命的半导体激光器作为抽运源,器件内各个部件之间也都采用柔性光纤连接,在光束质量、工作效率、紧凑性、抗冲振特性、工作寿命等方面,均具有明显的优点。因此,近年来在激光雷达领域逐渐得到应用。

用于相干探测的窄线宽光纤激光器均采用多级主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)工作方式来获得所需的窄线宽、高重频、宽脉宽、高峰值功率的稳频激光脉冲输出。如图 8 所示,采用高稳定低功率的连续波分布反馈(distributed feedback, DFB)光纤激光器或者 LD 作为种子光源,通过声光调制及多级全光纤放大光路,可实现 10kHz 以上的高重频、宽脉宽(数十纳秒到数百纳秒可控)、脉冲能量可逐级放大^[18](目前能达到毫焦级)。该种激光器不仅具有体积小、寿命长、结构紧凑,易于集成等优

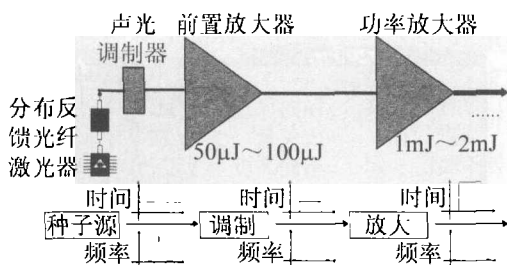


图8 MOPA结构的光纤放大器示意图

点,而且还具有免调节、稳定性高、抗恶劣环境能力强等特点,近年来发展迅猛,有逐渐成为激光多普勒测风雷达的主流激光器,并在军民领域得到广泛应用的趋势。

如英国 QinetiQ 公司的 ZEPHIR 激光多普勒测风雷达,采用线宽约 2kHz、功率 1W 的 1.55μm 连续光纤激光器,实现了对 5m ~ 200m 高度范围内风场测量,所研制的雷达系统已商业化并在欧洲国家民用风力发电站等场所得到广泛应用;法国 LEASPHERE 公司的 WINDCUBE 测风雷达,采用 1.54μm、脉冲能量约 200mJ 高重频脉冲光纤激光器,已经实现了 3km 探测作用距离,目前 6km 的激光多普勒测风雷达也正在工程研制中,这类激光多普勒测风雷达在风力发电、机场,以及某些军用特殊领域均能得到应用。

由于光纤激光器的非线性效应如受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)等,以及光学损伤等原因,目前窄线宽的脉冲光纤激光器的输出能量还不能达到固体激光器的水平,因此,当前采用光纤激光器的激光多普勒测风雷达的作用距离还不能达到更远的水平^[19]。图 9 为法国 LEOSPHERE 公司 2007 年对光纤激光器在激光多普勒测风雷达上的应用预测,可以看出,随着 1.5μm 人眼安全窄线宽光纤激光器的输出能量的进一步提高,激光多普勒测风雷达的可探测作用高度将逐渐提高,可实现对中远程距离(5km ~ 10km)大气风场的测量。因此可以预测,采用了光纤相干光路的高集成度激光雷达系统在机载平台上具有重要的应用前景,是未来机载激光雷达的一个重要发展方向。

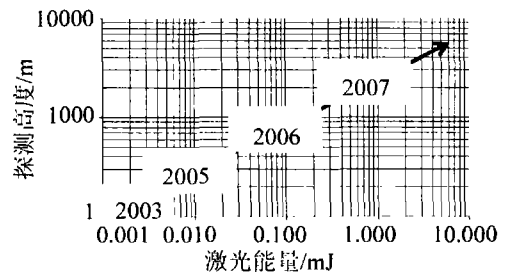


图9 可用于测风雷达的 1.5μm 光纤激光器输出能量与雷达可探测高度的发展趋势图

5 结束语

与传统的机载气象雷达相比,机载激光多普勒测风雷达最主要的特点与差别在于能实现对大气风场的 3 维分布快速遥感测量,获得飞机前方、下方及侧方等方向上各个距离段空间层的风速风向参量,这是目前其它测量手段所不能完成的。机载测风雷达具有测量精度高、结果稳定可靠、响应速度快、短时间内可获得较高置信度测量结果、系统结构紧凑、环境适应能力强

等优点,采用光纤激光器作为光源的机载激光多普勒测风雷达在大型运输机等的空投、空掷作业,以及保障飞行安全等应用中具有重要的应用前景。

参 考 文 献

- [1] DAI Y J. The principle of lidar[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 232-277 (in Chinese).
- [2] World Meteorological Organization. Preliminary statement of guidance regarding how well satellite capabilities meet WMO user requirements in several application areas[R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 1998: 913-914.
- [3] HENDERSON S W, HANNON S M. Advanced coherent lidar system for wind measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5887: 588-601.
- [4] REN P, WANG Y L, KANG D Y, *et al.* Numerical optimization in VAD inversion technique for wind lidar[J]. Laser Technology, 2009, 33(6): 664-666 (in Chinese).
- [5] LAI D, CHEN Y, ZHOU D F, *et al.* Beam scanning of lidar and the simulation of the improved VAD inversion methods[J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 584-586 (in Chinese).
- [6] PHILLIPS M W, HENDERSON S W, POLING M, *et al.* Coherent LIDAR development for Doppler wind measurement from the International Space Station[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4153: 376-384.
- [7] BOSTROVA N K, SIDOROV V V, MATRUSOR S G, *et al.* Laser Doppler flowmetry as a method for evaluating the microwave radiation effect on cutaneous microcirculation[J]. Critical Reviews in Biomedical Engineering, 2001, 29(3): 549-556.
- [8] KARLSSON C J, OLSSON F A, LETALICK D, *et al.* All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μm for range, speed, vibration, and wind measurements[J]. Applied Optics, 2000, 39(21): 3716-3726.
- [9] HARRIS M, PEARSON G N, RIDIEY K D, *et al.* Single-particle laser Doppler anemometry at 1.55 μm [J]. Applied Optics, 2001, 40(6): 969-973.
- [10] PRIEZZHEV A V, PLYAKOVA M S, BEGUN K B, *et al.* Dual-beam laser Doppler microscopy of suspension flows embedded into medium with strong scattering [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3915: 129-136.
- [11] AUGERE B, CARIOU J P. All-fiber 1.5 μm CW coherent laser anemometer for in-flight measurements [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5086: 121-128.
- [12] WERNER C, HEILMANN R, BOGENBERGER R, *et al.* All fiber laser Doppler anemometer [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5240: 183-190.
- [13] MIZUTANI K, ITABE T, ISHII S, *et al.* Development of coherent Doppler lidar at CRL [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4893: 311-318.
- [14] EMMITT C D, O'HANDLEY C. Airborne Doppler lidar surface returns, data products other than tropospheric winds [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4893: 319-326.
- [15] ROTHERMEL J, OLIVIER L, BANTA R, *et al.* Remote sensing of multi-level wind fields with high-energy airborne scanning coherent Doppler lidar [J]. Optics Express, 1998, 2(2): 40-50.
- [16] WEISSMANN M, BRAUN F J, GANTNER L, *et al.* The alpine mountain-plain circulation: airborne Doppler lidar measurements and numerical simulations [J]. American Meteorological Society, 2005, 133(11): 3095-3109.
- [17] XU Q Y, NING H Sh, CHEN W Sh, *et al.* Applications of meteorological radar for the civil aviation safety [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2147-2151 (in Chinese).
- [18] MOLLER L. Novel aspects of spectral broadening due to fiber amplifier phase noise [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(9): 1554-1558.
- [19] POLYNKIN A, POLYNKIN P, MANSURIPUR M, *et al.* Single-frequency fiber ring laser with 1W output power at 1.5 μm [J]. Optics Express, 2005, 13(8): 3179-3184.

(上接第783页)

质量较高。原因是较低氧压下氧元素得失基本保持平衡,过量的氧离子相互发生碰撞,氧离子在衬底表面的迁移能减小,从而影响结晶质量。PL谱分析表明,薄膜在360nm附近的强紫外光发射对应于电子的带间跃迁。以460nm为中心的蓝光发光带来源于薄膜中锌空位和锌填隙缺陷,并且锌空位和锌填隙缺陷的浓度随着氧压的增大而增加,使蓝光发光峰的强度增强。

参 考 文 献

- [1] HU Ch X, TAO X Y, YE Zh Q, *et al.* The development of temperature in target ablation of pulsed laser deposition of ZnO thin film [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 646-648 (in Chinese).
- [2] LI L L, LIANG Q, QIU X Sh, *et al.* Application of atomic force microscope in the characterization of ZnO thin films fabricated by pulsed laser deposition [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2009, 30(1): 63-68 (in Chinese).
- [3] KOHAN A F, CEDER G, MORGAN D, *et al.* First-principles study of native point defects in ZnO [J]. Physical Review, 2000, B61(22): 15019-15027.
- [4] TANG Z K, WONG G K L, YU P, *et al.* Room-temperature ultraviolet laser emission from self-assembled ZnO microcrystallite thin films [J]. Physical Review Letter, 1998, 72(25): 3270.
- [5] LIM W T, LEE C H. Highly oriented ZnO thin films deposited on Ru on Si substrates [J]. Thin Solid Films, 1999, 35(3): 12-15.
- [6] CHOPRA K L, MAJOR S, PANDAYA D K. Transparent conductors: a status review [J]. Thin Solid Films, 1983, 10(2): 1-46.
- [7] CULLITY B D. Elements of X-ray diffraction [M]. 2nd ed. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1978: 93-94.
- [8] YU Y M, LI Q Sh, LI X K, *et al.* Optical characteristics study of the Cu-doped ZnO thin films [J]. Laser Technology, 2010, 34(4): 456-458 (in Chinese).
- [9] PENG X P, LAN W, TAN Y Sh, *et al.* Photoluminescent properties of Cu-doped ZnO thin films [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(8): 2705-2709 (in Chinese).
- [10] JIANG M, WU D C, WEI Q, *et al.* Synthesis and photoluminescence of Cu-doped ZnO thin films [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 266-269 (in Chinese).
- [11] WANG J J, LI Q Sh, CHEN D, *et al.* Effect of oxygen pressure on structure and photoluminescence properties of the ZnO thin film deposited by PLD [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2006, 27(5): 787-791 (in Chinese).