

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷
G01N 21/47



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200410013874.7

[43] 公开日 2004年12月22日

[11] 公开号 CN 1556393A

[22] 申请日 2004.1.8

[21] 申请号 200410013874.7

[71] 申请人 中国科学院安徽光学精密机械研究所
地址 230031 安徽省合肥市 1125 信箱

[72] 发明人 吴永华 范爱媛 毛敏娟 戚福弟
岳古明 徐 贲 兰举生 曹京萍
江庆伍 周 华

[74] 专利代理机构 合肥华信专利商标事务所
代理人 余成俊

权利要求书2页 说明书9页 附图5页

[54] 发明名称 车载式双波长米散射激光雷达

[57] 摘要

本发明公开了车载式双波长米散射激光雷达，由激光发射单元、接收光学和后继光学单元、信号探测和数据采集单元及系统运行控制单元组成，激光器上还安装有倍频头，激光出射方向和接收望远镜光轴平行；接收望远镜后安装有光阑，通过光纤耦合接到置于平台上的全反射镜的开孔中，从光纤出来的光信号经球面镜反射到全反射镜上，从全反射镜反射出来的光路中，在平台上再依次安装分色分束镜、分色镜、分束镜，光信号形成四个光路，分别经光电倍增管接收，光电倍增管后接放大器，放大器接置于工控机中的 A/D 卡或光子计数卡。本发明可用于白天和夜间进行大气水平能见度的探测；或在白天或夜间不同地区整个对流层 1064nm 和 532nm 两个波长气溶胶光学性质的探测研究。

- 1、 车载式双波长米散射激光雷达，由激光发射单元、接收光学和后继光学单元、信号探测和采集单元及系统运行控制单元组成，其特征在于激光器上安装有倍频头，激光器前方安装有光阑，激光经过导光装置射入大气的方向和接收望远镜光轴平行；接收望远镜安装在平台支架上可以作俯仰扫描，接收望远镜后安装有光阑，望远镜接收的两个波长的大气后向散射光信号通过光纤耦合器进入光纤，从光纤出来的光信号经球面镜反射到全反射镜上，从全反射镜反射出来的光信号，依次经过安装在平台上的分色分束镜、分色镜、分束镜，最终形成四路光信号，分别经光电倍增管接收，光电倍增管后接放大器，放大器接置于工控机中的 A/D 卡或光子计数卡。
- 2、 根据权利要求 1 所述的车载式双波长米散射激光雷达，其特征在于所述的全反射镜和分色分束镜夹角为 90 度，分色分束镜、分色镜、分束镜相互平行，从球面镜反射出来的光入射到全反射镜的角度为 45 度。
- 3、 根据权利要求 1 所述的车载式双波长米散射激光雷达，其特征在于所述的激光器前方安装有一个全反射镜，激光经该全反射镜反射后，再经过依次相互平行、镜面相对的四个全反射镜反射，光轴和接收望远镜平行。
- 4、 根据权利要求 1 所述的车载式双波长米散射激光雷达，其特征在于所述的激光器为 Nd:YAG 激光器，接收望远镜为 Cassegrain 型，分色分束镜对 532nm 光全透，对 1064nm 光 90%反射，对 1064nm 光 10%透过；分色镜对 532nm 光全透，对 1064nm 光全反射；分束镜对 532nm 光 90%透过，对 532nm 光 10%反射。
- 5、 根据权利要求 4 所述的车载式双波长米散射激光雷达，其特征在于所述的分色分束镜、分色镜、分束镜表面都镀了介质膜，在分色分束镜和光电倍增管之间光路中安装有滤光片、透镜，在分色镜与光

电倍增管之间光路中安装有滤光片、透镜、衰减片，在分束镜出射方向与光电倍增管之间光路中安装有滤光片、衰减片，在分束镜透射方向与光电倍增管之间光路中安装有滤光片，所述的滤光片为窄带干涉滤光片，与光路波长相对应。

- 6、根据权利要求 1 所述的车载式双波长米散射激光雷达，其特征在于光子计数卡和 A/D 卡插在 WS-855A 工控机的 PCI 插槽内。

车载式双波长米散射激光雷达

技术领域

本发明涉及一种激光雷达，更具体的说是一种米散射激光雷达。

背景技术

激光雷达是以激光为光源，通过探测激光与大气相互作用的辐射信号来遥感大气。激光与大气的相互作用，产生包含气体分子和气溶胶粒子有关信息的辐射信号，利用反演的方法就可以从中得到关于气体分子和气溶胶粒子的信息。

目前，探测气溶胶的米散射激光雷达系统有如下几种：

一、单波长米散射激光雷达：

只能获得单一波长的大气气溶胶消光系数，无法反演 Angstrom 系数等反应气溶胶粒子的尺度特性，而且在反演气溶胶消光系数的方法上必须设立种种假定。

二、微脉冲激光雷达：

由于微脉冲激光雷达输出能量在 μJ 量级，依靠高重复率（数千 Hz）提高探测信噪比，因此探测时间长，白天探测高度也仅到 6km 左右，而且如果其过长的几何重叠因子（4 km 左右）不能精确确定，会给气溶胶探测结果带来较大的误差。

三、现有的双波长米散射激光雷达：

目前，双波长米散射激光雷达的大气气溶胶探测大多局限在 5km 以下的边界层，通常为地基式，只能进行固定点的大气气溶胶的观测，无法满足不同地区进行外场作业的要求。

发明内容

本发明的目的是提供一种车载式双波长米散射激光雷达 (Dual Wavelength Lidar 简称 DWL)，可用于白天和夜间进行大气水平能见度的探测；在白天或夜间不同地区 1064nm 和 532 nm 两个波长气溶胶光学性质的探测研究，其有效探

测范围覆盖了整个对流层；由不同波长的气溶胶消光系数可以反演反应气溶胶粒子尺度的 Angstrom 系数；在反演气溶胶消光系数的方法上克服了单一波长处理时必须设立的种种假定的不足。

本发明的技术实现方案如下：

车载式双波长米散射激光雷达，由激光发射单元、接收光学和后继光学单元、信号探测和采集单元及系统运行控制单元组成。其特征在于激光器上安装有倍频头，激光器前方安装有光阑，激光经过导光装置射入大气的方向和接收望远镜光轴平行；接收望远镜安装在平台支架上可以作俯仰扫描，接收望远镜后安装有光阑，望远镜接收的两个波长的大气后向散射光信号通过光纤耦合器进入光纤，从光纤出来的光信号经球面镜反射到全反射镜上，从全反射镜反射出来的光信号，依次经过安装在平台上的分色分束镜、分色镜、分束镜，最终形成四路光信号，分别经光电倍增管接收，光电倍增管后接放大器，放大器接置于工控机中的 A/D 卡或光子计数卡。

所述的车载式双波长米散射激光雷达，其特征在于所述的全反射镜和分色分束镜夹角为 90 度，分色分束镜、分色镜、分束镜相互平行，从球面镜反射出来的光入射到全反射镜的角度为 45 度。

所述的车载式双波长米散射激光雷达，其特征在于所述的激光器前方安装有一个全反射镜，激光经该全反射镜反射后，再经过依次相互平行、镜面相对四个全反射镜反射，光轴和接收望远镜平行。

所述的车载式双波长米散射激光雷达，其特征在于所述的激光器为 Nd:YAG 激光器，接收望远镜为 Cassegrain 型，分色分束镜对 532nm 光全透，对 1064nm 光 90%反射，对 1064nm 光 10%透过；分色镜对 532nm 光全透，对 1064nm 光全反射；分束镜对 532nm 光 90%透过，对 532nm 光 10%反射。

所述的车载式双波长米散射激光雷达，其特征在于所述的分色分束镜、分色镜、分束镜表面都镀了介质膜，在分色分束镜和光电倍增管之间光路中安装有滤光片、透镜，在分色镜与光电倍增管之间光路中安装有滤光片、透镜、衰减片，在分束镜出射方向与光电倍增管之间光路中安装有滤光片、衰减片，在

分束镜透射方向与光电倍增管之间光路中安装有滤光片，所述的滤光片为窄带干涉滤光片，与光路波长相对应。

所述的车载式双波长米散射激光雷达，其特征在于光子计数卡和 A/D 卡插在 WS-855A 工控机的 PCI 插槽内。

本发明激光雷达由激光发射单元、接收光学和后继光学单元、信号探测和数据采集单元及系统运行控制单元组成。整个系统放置在 1.2 米长、1 米宽的光学平台上，光学平台与汽车厢体底板连接，可以随车移动。

后继光学单元与信号探测单元固定在光学平台上成一体化结构。接收望远镜与后继光学单元通过光纤耦合，这样即可以方便地改变望远镜的俯仰方向，又保证了后继光学单元与信号探测单元整体结构的稳定性。

Nd:YAG 激光器、接收望远镜、探测器、放大器、数据采集器和工控机均为轻质型或模块化结构，以使整个激光雷达系统结构紧凑、适合车载。

该激光雷达为双轴系统。通过发射单元发射的激光可以与接收望远镜一起作俯仰方向上的扫描，使激光雷达既能进行双波长大气气溶胶消光系数垂直分布的探测，又能进行大气水平消光系数和水平能见度的探测。

1064nm 属于近红外波段，大气气溶胶在该波长的散射截面小，光电倍增管的量子效率低、暗噪声大，本发明选用带致冷的光电倍增管进行信号的探测，采用光子计数方法进行信号的采集。

大气气溶胶在 532nm 波长的散射截面大，光电倍增管在该波长的量子效率高、暗噪声低，本发明选用常温下工作的光电倍增管来进行信号探测及采用模数转换方法对探测信号进行采集。

使用本发明进行大气观测，模拟计算结果表明在整个对流层里（地面至 15 km），532nm 和 1064nm 两个波长大气回波信号的动态范围达 7 个数量级左右，而且近地面层大气回波信号很强。通过采用合适的几何重叠因子^[7]、对两个波长高、低层大气后向散射回波信号同时进行探测的方法来满足整个对流层大气回波信号大动态范围的探测需求。

和已有技术相比，本发明具有突出的优点：

- 1、独特的激光发射单元，采用小型全固化高功率 Nd:YAG 激光技术，发射光路的设计保证了发射激光束可以随接收望远镜进行俯仰运动，而且发射的激光光束与接收望远镜的光轴保持平行。

2、接收光学望远镜与后继光学单元采用光纤耦合，可以方便地改变接收望远镜的俯仰方向，而后继光学单元单元和信号探测单元固定在光学平台上不动，满足了该激光雷达进行水平和垂直方向测量甚至斜程某一方向测量。

3、信号探测和数据采集，高低层大气的分层同时探测，1064 nm 波长采用低温（-30°C）PMT 和光子计数技术；532nm 波长采用常温 PMT 和模数转换（A/D）。单元实现了对近地面至 15km 高度范围内整个对流层气溶胶的探测。

4、轻质型和模块化结构设计，整个单元采用了轻质型和模块化的激光器、扫描接收望远镜、探测器及数据采集器。整个光学单元和信号探测单元集成于一个光学平台上。

5、具有快速、稳定及全天候探测的特点，通常天气条件下的白天和夜间，大气水平能见度的探测周期为 1.5 分钟，气溶胶和卷云消光系数垂直廓线的探测周期为 10 分钟；采用车载形式，可以变换探测地点。

附图说明

图 1 为本发明结构示意图。

图 2 为信号探测和数据采集单元的另一种结构示意图。

图 3 为本发明 2003 年 10 月 8 日有卷云时的垂直消光系数廓线。

图 4 为激光雷达水平测量的距离平方校正的回波信号（532nm）。

图 5 为 2003 年 7 月 18 日晚两个波长气溶胶消光系数垂直廓线。

图 6 为 2003 年 10 月 6 日白天两个波长气溶胶消光系数垂直廓线。

图 7 为两台激光雷达探测气溶胶消光数垂直廓线的比较。

图 8 为 Angstrom 系数垂直廓线。

图 9 是该激光雷达探测 1064 nm 大气回波信号的工作时序图。

具体实施方式

参见图 1。本发明由以下四个单元组成：

1、双波长激光发射单元

激光发射单元的功能是在接收望远镜进行俯仰运动时，激光光束能与接收望远镜光轴保持等距且沿着与光轴平行的方向射入到大气中。

激光发射单元包括 Nd:YAG 激光器、光阑和由 5 个反射镜组成的导光系统。激光器前方安装有一个光阑和全反射镜 1，激光经该全反射镜 1 反射后，

再经过相互平行、镜面相对的四个全反射镜 2、3、4、5 反射，光轴和接收望远镜平行。

Nd:YAG 激光器为法国 Quantel 公司的 Brill。它同时输出基频 1064nm 和二倍频 532nm 波长的激光，两波长的单脉冲能量分别是 400mJ 和 300mJ，发散角均为 0.5mrad，脉冲重复率为 20Hz。激光器被固定在光学平台上。

在导光系统中，反射镜 1 至 4 按图 1 所示的设置固定在光学平台的上方，反射镜 5 安装在接收望远镜俯仰转轴的侧壁上。通过光学装校，使由反射镜 4 反射的激光光束与接收望远镜的俯仰转轴重合，并通过反射镜 5 的镜面中心沿着与接收望远镜光轴平行的方向射入到大气中。在光学装校完成以后，整个导光系统采用管套密封。

2、接收光学和后继光学单元

接收光学和后继光学单元将来自各个距离上的两个波长的大气后向散射光收集并导入到相应的探测器中。接收光学单元是美国 Meade 公司生产的 10" LX200GPS 卡塞格林型望远镜，主镜直径为 250mm、相对孔径为 $f/10$ ，主副镜均采用 UHTC 镀膜，首先镜片表面高温真空沉淀高纯净铝，再是镀膜厚度精确控制在 $\pm 1\%$ 之内的三氧化铝(Al_2O_3)、二氧化钛(TiO_2)、氟化镁(MgF_2) 多层镀膜。它的支撑架被安装在光学平台上，其内的电动和蜗轮驱动机构能够控制望远镜进行俯仰运动。一可变直径的小孔光阑置于接收望远镜的组合焦点处，控制接收望远镜的接收视场在 1~3mrad。

由于该激光雷达是一个双轴系统，向大气中发射的激光光束逐步地进入到激光雷达的接收视场内，近距离大气后向散射光并不是完全被接收，存在着几何重叠因子。使用合适的几何重叠因子对解决激光雷达探测信号大动态范围的问题是有利的。对于 532nm 波长的接收光学单元，到 0.75km 处，几何重叠因子等于 1，对于 1064 nm 波长的接收光学单元则在 1.25 km 处。

使用光纤将望远镜接收的大气后向散射光导入置于平台上的后继光学单元中。光纤中心半径为 2mm，数值孔径为 0.37。光纤耦合镜组将望远镜接收的光会聚进入光纤，经过光纤输出准直器后成为近似平行光进入后继光学单元。由于两个波长的大气回波都使用高低层通道同时测量，因此需对后继光学单元进行分色和分束处理。它由分色/分束镜、窄带干涉滤光片、衰减片和透镜组成。其结构布局如图 2 所示。

分色分束镜 7 为 1064nm 波长高反（反射率 $R=90\%$ ），532nm 波长高透；分色镜 8 为 1064nm 波长全反（ $R>97\%$ ），532nm 波长高透。这两块分色镜分别将 1064 nm 波长的大气后向散射光导入高低层探测的光电倍增管中。分束镜 9 对 532nm 波长反射 10%、透过 90%，它将 532 nm 波长的大气后向散射光分别导入低高层探测的光电倍增管中。为了抑制天空背景光，分色分束镜 7、分色镜 8、分束镜 9 的表面都镀了介质膜。在四个光电倍增管前放置了相应波长的窄带干涉滤光片。

在分色分束镜 7 和光电倍增管之间光路中安装有滤光片、透镜，在分色镜 8 与光电倍增管之间光路中安装有滤光片、透镜、衰减片，在分束镜 9 出射方向与光电倍增管之间光路中安装有滤光片、衰减片，在分束镜透射方向与光电倍增管之间光路中安装有滤光片，所述的滤光片为窄带干涉滤光片，与光路波长相对应。

在探测低层信号的分色镜 8、分束镜 9 后面的两个光电倍增管前面都安装了合适透过率(透过率大约 10%左右)的中性衰减片，是为了防止近距离很强的大气后向散射光可能使光电倍增管饱和而引起探测信号的失真。由于探测 1064nm 波长的光电倍增管的光阴极面比较小（直径 1cm），在滤光片后面放置了短焦距的会聚透镜。整个后继光学单元采用密封箱体结构，内表面进行了发黑处理，具有防尘、防漏光和防多次反射光的作用。

3、信号探测和数据采集单元

信号探测和数据采集单元对激光雷达接收到的大气后向散射光进行光电转换、放大和数据采集，它主要包括光电探测器、放大器、数据采集器和工控机等。

对于 1064nm 波长回波信号的探测采用光子计数技术，主要包含带 C5479-03 门控的 R3236 光电倍增管（两个均为常开型）、C3350 高压电源、C4877 致冷器（ -30°C ）、VT120 放大器和 MCS-PCI 光子计数卡。

对于 532nm 波长回波信号的探测采用模数转换技术，主要包含有用于高层测量的 H7680-01 光电倍增管（常闭型）、用于低层测量的 H7680 光电倍增管（常开型）、双通道 Phillips 777 前置放大器和双通道 GAGE1610 型 A/D 卡。

光子计数卡和 A/D 卡插在 WS-855A 工控机的 PCI 插槽内，在运行程序的控制下，实现 1064nm 和 532nm 两个波长的高低层四个通道大气回波信号的同时接收、放大、数据采集及存储。

4、运行控制单元

运行控制单元的功能是保证激光发射、回波信号探测、数据采集、传输和存储协调一致地工作。它包括门控控制器、主波控制器和激光雷达运行程序软件。

运行程序软件指令计算机发送脉宽为 50ns、频率为 20Hz 的脉冲给门控控制器。对每一个脉冲，门控控制器输出两路信号脉冲，一路输入至 C5479-03 门控，使探测 1064nm 波长高层大气的常开型 R3236 光电倍增管‘关闭’。另一路输入至 Nd:YAG 激光器氙灯外触发端口，点燃氙灯。同时程序软件指令计算机通过串口发送命令给激光器产生激光。这样，在激光产生以前，探测高层大气的 R3236 光电倍增管已经“关门”，即处于不工作状态。而探测 532nm 波长高层大气的 H7680-01 光电倍增管本身就是常闭型，即一直处于“关门”的不工作状态。因此，激光发射以后，近距离处很强的大气后向散射光不会造成探测高层大气的两个光电倍增管深度饱和乃至损伤。

高反镜 2 透过的 532nm 波长的激光入射到主波控制器后即产生主波信号，主波信号同时输入到光子计数卡及 A/D 卡的触发端口，作为它们数据采集的零距离点。主波信号还输入给门控控制器，作为两个用于高层大气测量的光电倍增管“开门”时间的基准信号，通过调节门控控制器的“开门”时刻与主波之间的时间间隔，使当发射的激光在大气中传输到一定距离以后，光电倍增管才开始工作，接收该距离以远较弱的大气后向散射光。而两个探测 1064 nm 和 532 nm 的低层大气信号的光电倍增管都为常开型，即一直处于工作状态。由于在它们的前面都安装了中性衰减片，接收的是近距离经过衰减片衰减的大气后向散射光。激光雷达重复上述过程，直到激光器发射完运行程序软件设定的激光脉冲数为止。图 9 是该激光雷达探测 1064 nm 大气回波信号的工作时序图。

本发明的主要技术参数

激光器			
工作波长 / nm	532	1064	
脉冲能量 / mJ	300	400	
脉冲重复频率 / Hz		20	

光束发散角 / mrad	0.5	
脉冲宽度/ns	20	
接收光学单元		
望远镜类型	Cassegrain	
直径 / mm	250	
视场角 / mrad	1~3	
干涉滤光片		
中心波长 / nm	532	1064
带宽 / nm	1	1
透过率 / %	50	40
光纤	SPC2000/2150/2300N	
数值孔径	0.37	
中心半径	2000 μ m silica +/-2%	
信号探测单元		
光电倍增管	H7680(-01)	R3236
前置放大器	Phillips777	VT120
增益	40	200
带宽 / MHz	200	350
数据采集单元		
类型	GAGE1610	MCS-Pci
采样率 / ns	100	100
采集精度	16-bit	300MHz
运行控制单元	WS-855A 工控机	

利用本发明装置进行大气观测的典型实验结果:

一、水平能见度

使用斜率法 (slope) 对车载式双波长米散射激光雷达的水平方向上的探测数据进行处理即可得到大气水平能见度。

图 4 给出 2003 年 7 月 12 日 532nm 通道距离平方校正的大气回波信号, 圆点为测量值, 直线为线性拟合的结果。可以看出, 在水平距离 3.0-9.0km 内 $\ln(PR^2)$ 随距离 R 具有较好的线性关系, 虽然随着距离的增大, 测量值有一定的起伏, 但总是在拟合直线的附近。根据拟合直线的斜率, 计算出这天大气的水平能见度为 18.17km。

二、双波长大气气溶胶消光系数垂直廓线和 Angstrom 指数垂直廓线

图 5 给出了 2003 年 7 月 18 日夜晩在我国东南某地该激光雷达探测的 1064 nm 和 532nm 两个波长大气气溶胶消光系数垂直廓线, 图 6 是 2003 年 10 月 6 日白天 14:00 在我国北方某地该激光雷达探测的两个波长气溶胶消光系数垂直廓线。作为参考, 两图中一并给出了空气分子消光系数垂直廓线 (点画线)。从两图中可以看出, 无论是白天还是夜晚, 在整个对流层范围里, 532nm 波长的

气溶胶消光系数较 1064nm 波长小，两个波长气溶胶消光系数垂直分布呈现基本一致的变化趋势，甚至它们的气溶胶消光系数空间分布的微细结构也呈现了较好的一致性。图 5 中的两条消光廓线反映气溶胶粒子主要集中在约 4km 以下的边界层内，在 4 km 以上两个波长气溶胶消光系数都急剧降低到小于空气分子的消光系数。

为了检验车载式双波长米散射激光雷达探测数据的可靠性，我们将该激光雷达与日本国立环境研究所（NIES）设在附近的地基式双波长激光雷达进行了两个波长大气气溶胶消光系数的垂直分布的比较测量。图 7 给出了比较结果。可以清晰地看出，两台激光雷达探测的气溶胶消光系数垂直廓线在 300m 至 4.5km 高度范围内符合得较好，甚至气溶胶消光系数空间分布的微细结构也呈现了较好的一致性。这表明车载式双波长米散射激光雷达探测对流层气溶胶消光系数是可靠的。两个系统在 300m 以下的差异是因为 NIES 的双波长激光雷达的大气回波信号在近距离没有进行几何重叠因子校正的缘故。进行两台激光雷达探测的 4.5km 以上气溶胶消光系数垂直廓线的比较较为困难，NIES 的双波长激光雷达在此高度以上的大气回波信号的振荡幅度很大，尤其是 1064nm 波长。NIES 的双波长激光雷达的探测高度局限在大气边界层以内，而车载式双波长米散射的探测高度可达到对流层的中上部。

图 8 给出 2003 年 7 月 18 日夜晩（实线）和 2003 年 10 月 6 日白天（虚线）的 Angstrom 系数垂直廓线。其值一般在 0-2 之间，0 表明气溶胶主要是由巨粒子组成的，2 表明气溶胶的主要成分是埃根核^[11]。从图 8 可以看出，7 月 18 日夜晩，从地面至 10km 这一高度范围内，Angstrom 系数平均值是 0.87；10 月 6 日白天，同一高度范围，Angstrom 系数的平均值是 1.21，它们与由北半球中纬度夏季模式^[12]计算的结果 0.92（点划线）都比较接近。在 4km 以下的大气边界层内，7 月 18 日夜晩的 Angstrom 系数较 10 月 6 日白天的值大，说明该晚边界层内的大气中小粒子所占的权重相对更大些。

图 3 是这台激光雷达于 2003 年 10 月 8 日 15:46 时在我国北方某地探测获得的结果，从图中可以看出这天大气的边界层在 2.5km 附近，气溶胶结构比较简单，同时在 8.4km 处有一层厚度为 1.0km 左右的稀薄卷云。

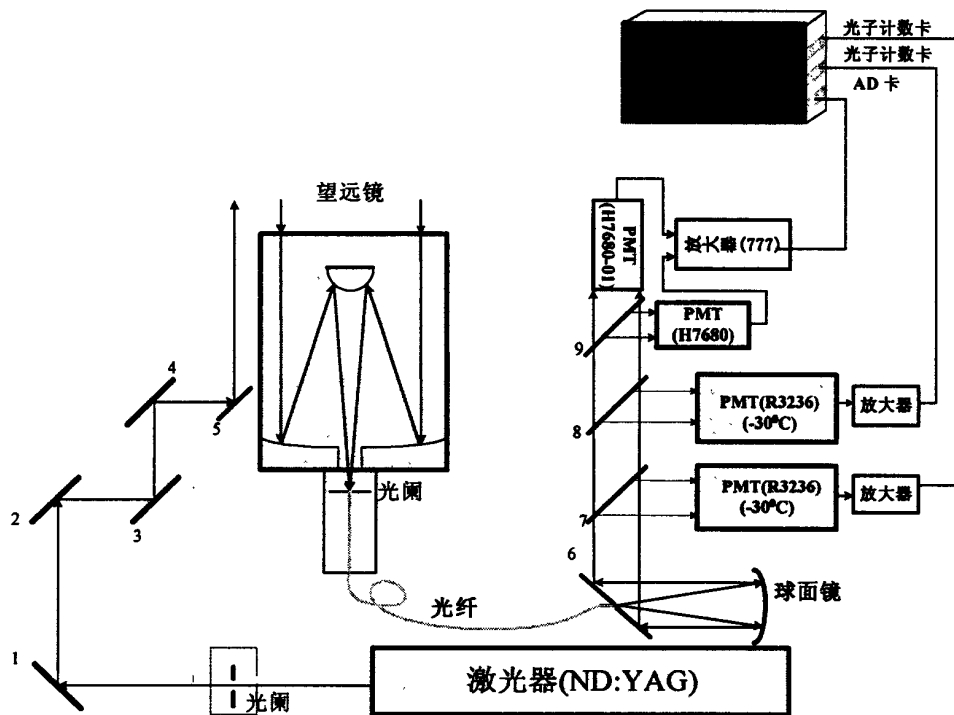


图 1

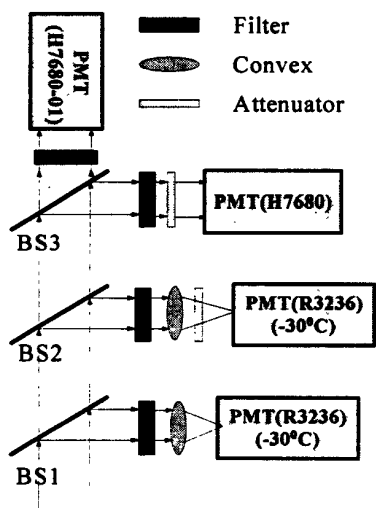


图 2

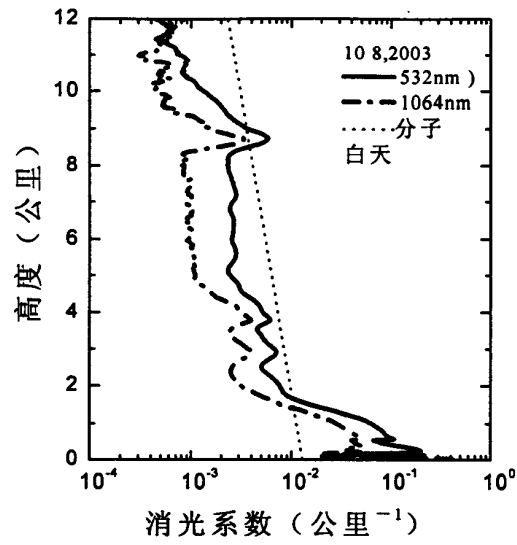


图 3

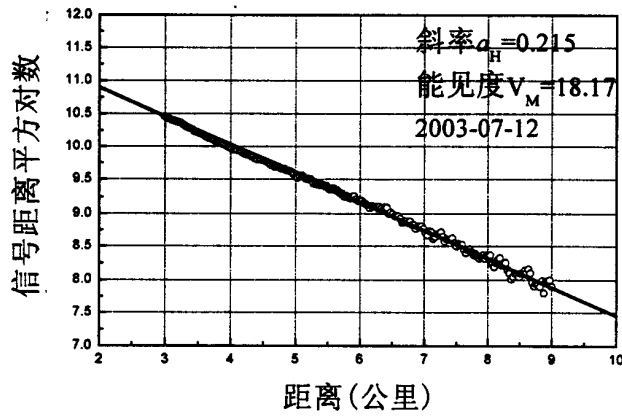


图 4

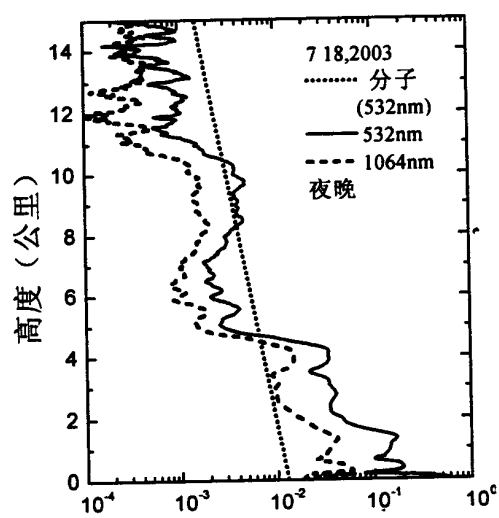


图 5

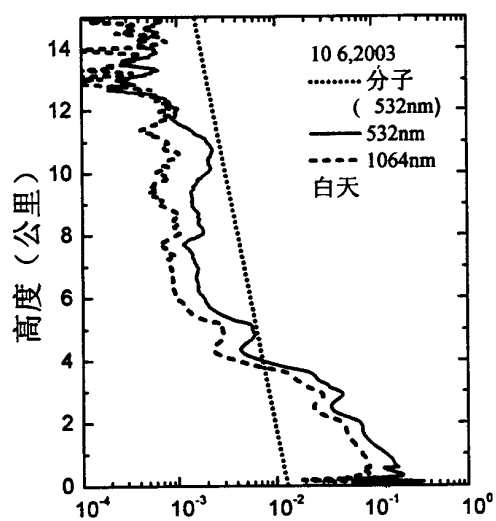


图 6

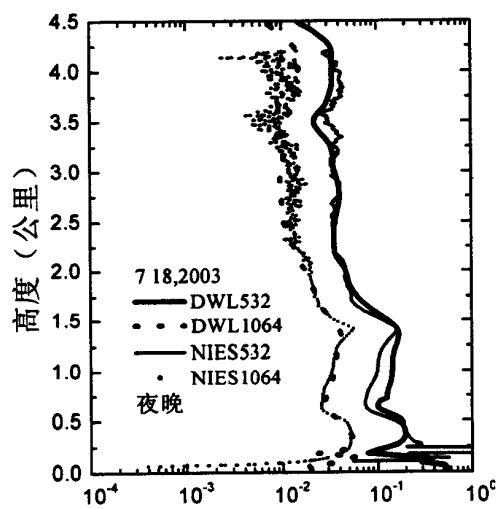


图 7

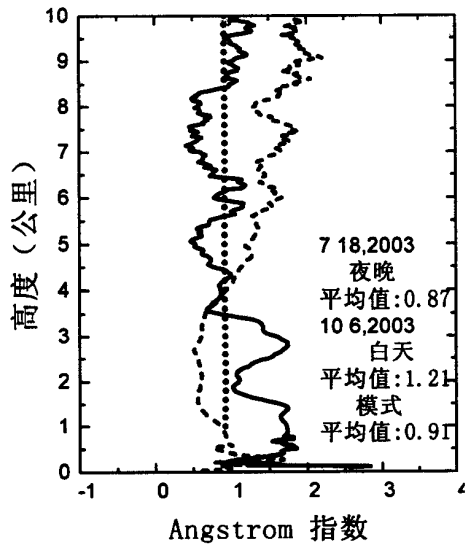


图 8

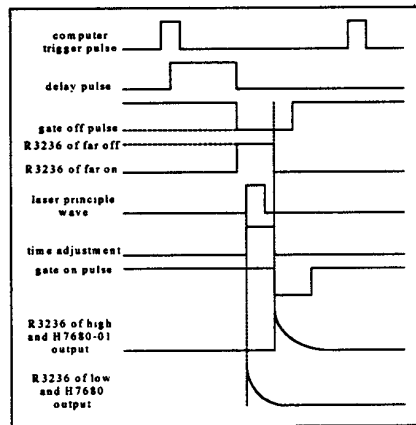


图 9