

綜 合 評 述

用光雷达作气象观察

M. G. H. Ligda

1. 引言

Q 开关激光器的发明,为雷达技术向电磁谱的光和近光波段的延伸提供了一种直接方法。虽然涉及的是散射、吸收和折射这些同样的现象,但欲观察的气象条件和欲得到的新知识是很新奇的,以致可能公认一个“光雷达气象学”^{*}新领域。现在使用的光雷达辐射的电磁谱的频率约比厘米波雷达高 50 倍。

目前,光雷达技术多半和 1930 年末的微波雷达的情况差不多。光学收-发开关还未发明,脉冲重复频率很低,此外,由于辐射很强,系统的某些元件的寿命也很有限。因此,前二十年间发展起来的雷达气象学的许多成熟的技术,还不能应用于气象光雷达的观察和分析。尽管有新仪器出现,而且到现在为止已得到很多新奇的观察资料,但越来越明显地看出,光雷达和微波雷达能相互补充。而且当一起使用时,所能得到的大气信息,将比它们当中任何一种单独使用时所提供的要多得多。

2. 历史背景

多年来,一直用光束来观测低层和高层大气的天气条件。最早的工作,正如赫耳贝斯特(Hulbest)^[1]所描述的,是采用稳定的或低频调制的光束。后来脉冲技术发展了,弗里德兰(Friedland)等人^[8]用它来观测高层大气,霍尔曼(Horman)^[10]用来测定能见度。现在,利用持续时间为微秒数量级的光脉冲(不是激光)的脉冲式光测高计已有商品出售。

激光器作为光源的可能性是由肖特兰(Schotland)等人^[17]提出的,他考虑了脉冲系统和连续系统的应用。在他们研究期间,Q 开关(产生激光单脉冲所必需的)还完完全全处于实验室的试验阶段,因此他们不能十分彻底的研究光雷达的应用。大约在同时,卡特(Canter)^[3]扼要提及了气象光雷达的可能性。早在 1963 年,阿特拉斯(Atlas)^[1]在其演说中就推测过,激光器在将来可能应用于气象学。同年末,贝特勒(Batelle)等人^[2]考察了激光雷达用于海军天气观测的可能性,利格待(Ligda)^[13]描述了斯坦福研究所制造的光雷达,以及由它得到的第一次观测结果。当然,还有些私人之间交流的研究结果、备忘录、计划书、进展报告等等,

^{*} 缩写“Lidar”(即 Light detecting and ranging)是 1953 年米德耳顿(Middleton)和斯皮耳豪斯(Spilhaus)在其著作“气象仪器”一书的第 207 页提出的,当然,这比激光光源的发明早几年。

在各种不同文件中都详细地处理该课题，可以期望，至少其中有些终将是有益的。

斯坦福研究所的工作于1963年1月开始。那时，他们用该研究所提供的资金，着手制造一台Q开关红宝石激光雷达实验装置，激光器头和电源是向里尔·西格勒公司仪器分借的。1963年7月中旬，用该光雷达在斯坦福研究所一个实验室屋顶上进行了第一次气象观测。直到现在观测还在进行，有时偶然中断，是为了修理和改进系统的元件。

第一台光雷达用火花隙^[10]或氩闪光灯作为能源。前者可得到1微秒量级的光脉冲，后者约20微秒。两者都属于“宽带”发射器，若在接收机上采用滤光片来滤掉天气噪声(后面将讨论)，那末光束中许多有用能量都被滤掉。这些光源发射出的光是非相干的，因此，若不使用相当大孔径的光学系统，就不能高度聚焦。

人们热衷于将固体激光器用于光学测距工作，其原因有四点。第一，有用的能量高度集中于一个单的、很窄的光谱带内。这样，就有可能区分或很尖锐地去掉不需要的辐射(或噪声)。第二，辐射能够很强，现已研制成大于500兆瓦的实验系统。当然这就可能在有用距离内探测目标。第三，在Q开关激光器中，能量是以一个单的、高斯型分布的脉冲发射出去。这个脉冲没有尾翼，其持续时间是几十毫微秒(10^{-9} 秒)。这就满足了距离测定的高精度和高分辨率。第四，激光器的辐射是非常相干的。这意味着，用以聚焦和准直光束的光学系统，本质上只受衍射的限制，因此，用一个适度大小的孔径就能产生很尖锐的光束。例如，一个直径为4吋的物镜或反射镜，就能从 $\frac{1}{4}$ 吋孔径的红宝石晶体获得角宽度约2弧分的光束。锐光束具有良好的角分辨率，并且在目标的单位面积上有最大的能量密度。

至少是在1961年以后，几个军事部门和电子学设备制造商^[16]就在发展用于军事测距的轻便Q开关红宝石光雷达。一般来说，这样设计的光雷达是不适宜于气象观测的，但经修改之后，其资料记录和显示部分对某些应用还是可以利用的。

3. SRI 光雷达

SRI光雷达(斯坦福研究所光雷达)的略图示于图1。原始装置示于图2。现在的仪器已经

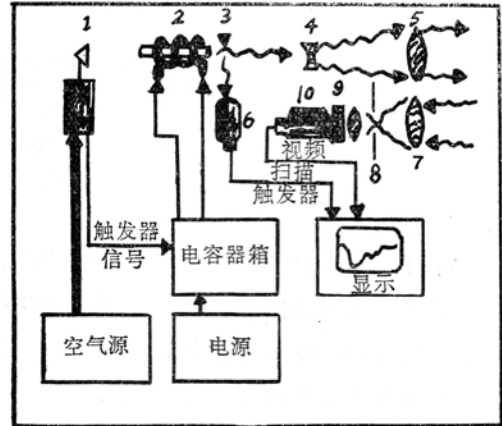


图1 光雷达示意图(SRI 2型)。

- 1—旋转棱镜Q开关；2—激光晶体和激励灯；
- 3—刀棱式光散射器；4—发散透镜；5—发射机物镜；6—发射机光检测器；7—接收机物镜；
- 8—接收机光束调整；9—太阳光滤光器；10—接收机电倍增管。

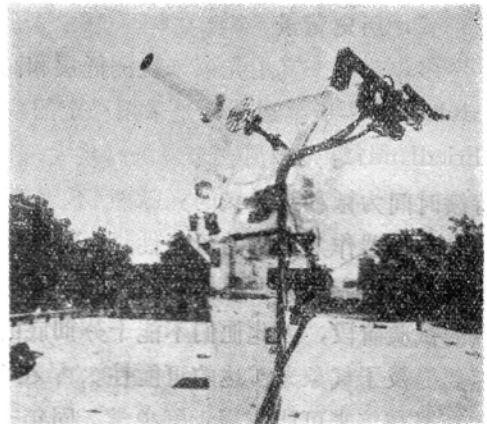


图2 SRI光雷达(1型)(右上是激光器头部)。

过第二次修改，它采用了里尔·西格勒公司借给的功率更大的、更有效的激光器。目前的计划是使这种光雷达便于由运输机或火车携带，这样，光雷达几乎就能架设在任何需要的地方，甚至是在船上，以进行实验观测。

这几种型号的装置的一般规格如下：

	1 型	2 型	3 型
	1963年7~10月	1964年1~3月	1964年6月~
激光器(都是红宝石)	C—轴, $3 \times \frac{1}{4}$ 吋, 90° 端面, 一端 50% 反射率, 另一端涂增透膜	同 1 型	$3 \times \frac{1}{4}$ 吋, 布儒斯特角端, 未镀膜
激励灯	螺旋状氙灯	同 1 型	直管氙灯
发射器光学系统	无, 光束直接由红宝石到大气	一折射望远镜, 孔径 4 吋	同 2 型
$\frac{1}{2}$ 功率的束宽	$\frac{1}{3}$ 度(近似)	$1/30$ 度(近似)	同 2 型
激光器功率	5~6 兆瓦	同 1 型	15~20 兆瓦
Q开关	转速为 1,000 转/秒的贝克曼-惠特利(Beckman-Whitley) 旋转棱镜	同 1 型	馥花青滤光片
接收器孔径	4 吋航空照相机物镜	同 1 型	同 1 型
冷却	无	强制的空气	强制的空气
接收器滤光片	694.3 毫微米电介质	同 1 型	同 1 型
带通	1.0 毫微米		
光电倍增管	10 级, 响应 S-20	同 1 型 S-20, 晚上工作	同 2 型
显示	A 和 R (方位和距离)	同 1 型	同 1 型
脉冲重复频率	每分钟 1~2 次	同 1 型	高达每分钟 4 次

运转系统时要求：电源与储能电容箱相联结，把旋转棱镜 Q 开关调整到适当的速度，装设显示器并加以调节，使作单扫描，光雷达对准需要的方向。然后操纵者接通连接电棱镜角信号和触发器的点火开关，令储能电容器箱放电。当棱镜转到合适位置时，电容箱通过氙灯放电，红宝石发生“激射作用”。光脉冲离开红宝石后，由发射机的光电倍增管检测，后者触发显示装置，使其开始扫描。沿途的物体或物质的反向散射光由接收器光电倍增管检测，它的输出加在显示器的垂直偏转板上。现在，由每一个图迹组成了一个独立的照片，当脉冲重复频率能充分增高时，这种程序既不实际，又不需要。

设计和制造供实验和专门观察使用的更有效的光雷达，现正在该研究所的实验室里进行。工作主要集中在三方面：较高的光频率；仪器对实验的进行有较大的适应性；对观察的

收集和分析程序的改进。

4. 光雷达天气观察中的气象和物理影响

虽然光雷达气象观测在原则上完全与微波雷达相似,但不同的射束特性以及非常短的波长,却完全改变了观测的信息内容和物理因素的性质,这些东西在理解时是必须给予考虑的。显然这个问题是十分复杂,即便我们的知识很完全(但在很多方面,这是不可能的),但由于篇幅所限,本文仍无法进一步作彻底分析。

问题的处理可化为三种基本现象的研究:衰减、散射和干扰。大气折射在将来可能是一个很重要而且有意义的因素,但目前在我们显然有限的观测经验中,显得并不重要。

衰减方面,除 K 带(特别是水蒸汽在 1.25 厘米的吸收线和氧在 0.5 厘米的吸收线)外,微波辐射的自由大气衰减轻微得可以忽略不计。

对于波谱的光频和近光频区域内的辐射,上述问题是远不正确的。有散射和吸收作用的烟、雾、尘埃、盐粒、花粉、霾、薄冰云和水滴云,都广泛地分布在各个对流层中,甚至借用气象学的术语,当天空是“晴朗”的时候也如此。埃耳特门(Elterman)^[5]发表了在“晴朗标准大气”模型条件下,可见和红外辐射的衰减表。该表在一段时间内对光雷达气象学家一定是有用的参考资料,这是因为其中列出的光谱和高度范围适当,并且还包含了实际的气溶胶分布情况。瑞利(分子的)和气溶胶衰减系数都列于表中。0.7 微米的瑞利系数是 8.157×10^{-3} (千米),表面层的气溶胶系数是 1.50×10^{-1} 。这是在能见度为(或调节为)20~25 千米的条件下,根据气溶胶浓度的测定算出的,由此容易看出,至少在低层大气中,晴空衰减对于颗粒远比分子浓度更灵敏,特别是因为分子浓度在任意给定水平上是相对稳定的。

朗(Long)^[14]在分析在红宝石激光器的可能工作带宽(受温度控制)内,衰减与波长的关系时,已对红宝石激光波长的气体衰减因素给予注意。观察到了氧和水蒸汽引起的若干大气吸收带以及太阳大气中的铁的一条强(55%)吸收线(十分之几埃宽,位于 0.6945 微米附近)。当能够制造几分之一埃带通的滤光片时,则注意力可能集中到这一吸收线的利用上;在这一波长运转的光雷达将能大大减低太阳噪声。

当然,云和雾沿观察路径有严重的衰减因子。而局部的浓烟羽和尘埃的衰减因子有时会超过这个值。云会蔓延相当大的厚度,粒子也会有很大的浓度;通过其中某些能看见星星,而对于其余的情况,当太阳很高时,就必须利用户外人工照明。红宝石光雷达射束可透过前者几公里远,但只能透过后者几十米。

云变为雨下降时,无疑不会(据我们有限的经验)很强烈地衰减光雷达的光束,这是因为每单位体积内的雨滴(雨的浓度)相当低。一般说来,雪的衰减可能比雨厉害,这是因为雪的粒子尺寸较大,且其向前散射因子较小。

考虑到大气和其他天然噪声源时,光雷达比之微波雷达,又一次暴露出其缺点。太阳偶然会在微波范围内辐射,而检测信号的天线几乎又必须直接指向太阳^[12]。然而,利用微量子放大器和参量放大器之后,雷达接收机的噪声水平几乎降低到了理论极限。

光雷达观测中的噪声有三种不同的来源:由目标反射的太阳光、由接收机和目标之间的大气散射的太阳光(如果目标没有遮断光束,就要考虑更远的大气散射)以及光电倍增管的

“暗电流”或热离子发射^[7]。

一般说来，太阳噪声阻碍了在白天检测微弱的回波。此时应用滤光片是有利的（但有一定限度）。使发射光束和接收光束尽可能变锐，也可减低日光噪声。降低太阳噪声的两种技术是，令发射和接收能量有合适的偏振角，以及如上面所提到的，采用同太阳大气中的吸收线相同的波长。这两者在斯坦福研究所都未试验过。

如果没有任何如象太阳那样的外噪声源，当检测很弱的信号时，光电倍增管的散粒效应噪声就很重要了。在一定程度上，这个噪声源可减到最小，其方法是冷却光电倍增管，并除了接收机需要接收信号的那一瞬间以外，防止任何光线进入，此外，在设计管子时，使光敏表面积减到最小。在热离子噪声成问题的能量水平上，实际上是检测单光子，而且标的出现是建立在概率的基础上。这种气象观察多半可以最容易、最快速地进行数字处理，因为信号幅度不再有意义了。

由于光雷达的辐射波长比微波雷达短很多，故光雷达光束更易遭受小粒子的散射和反向散射作用。事实上，正如埃耳特门^[4]、弗里德兰^[8]和其他人所证实的，甚至必须注意分子散射，虽然，在对流层，甚至有时在同温层，似乎粒子散射会压倒气体散射。

由于当波长与粒子的大小大约相等时，散射是这两者的比值的灵敏的函数，故当用双频光雷达研究云的形成消散时，可以在几分钟时间内观测到光雷达回波的惊人变化。

对于大气的气体成分，分子大小与波长的比值有利于瑞利散射。在光雷达的大部分观测中，比较重要的对象将是固态和液态的悬胶体。它们的大小在几十分之一到几个微米之间。在这范围内，粒子大小与波长的比值将落在瑞利极限值 $d/\lambda \approx 0.1$ 之外，这时更一般的米氏方程是适用的。若雨、雪、雹这些水蒸汽的凝聚产物处于无云的空气中，则可用激光雷达进行观测，然而，微波雷达对于这种观测会更有效，至少其观测距离较长。当雷达受到地面杂乱回波限制时，可用光雷达观测降雨的情况，而且，借助于光雷达的很高的方位和距离分辨率，可得到有关降雨细微结构的新情报。

同吸收和折射相比，最大兴趣可能集中在光雷达气象观测的反向散射上面。然而，吸收与折射这两种现象是通信工程师目前集中研究的课题。已用连续激光器在单程通路内很好地检定了它们。

5. 观察仪器的考虑

由于尚未设计出一种实用的光学收-发开关，在作者所知的所有光雷达中，发射、接收光学系统都是分开的。这两个系统可以有公共的光轴，此时激光束直接射入接收系统物镜上的孔；也可以有彼此平行的光轴（例如在 SRI 光雷达中），此时两个光学系统并排的固定在一起。

在上述两种情况下，都产生一种有趣的效应：当散射和接收光束会聚并随着远离发射机而逐渐重迭时，接收机就开始收到附近大气气溶胶体的反向散射光。随着距离的增加被照射，因而能进入接收机视野的体积逐渐增大，由于受照射的散射质点的数目增多，回波讯号的强度也不断加大。但是，超过某一距离后，距离衰减逐渐起主要作用，于是回波讯号开始减弱，并渐趋于零。

若散射粒子的大小均匀，浓度也均匀，则根据 1 型 SRI 光雷达计算出的讯号强度与距离的关系示于图 3；(a) 图 3 (b) 绘出的是实际观测结果。理论曲线完全基于几何的考虑。实际曲线上的小小的“前峰”，其原因尚不清楚。在我们的观测中，在某种程度上，它总是出现，我们认为，从本质上说，原因应在大气方面而不在仪器^[13]。

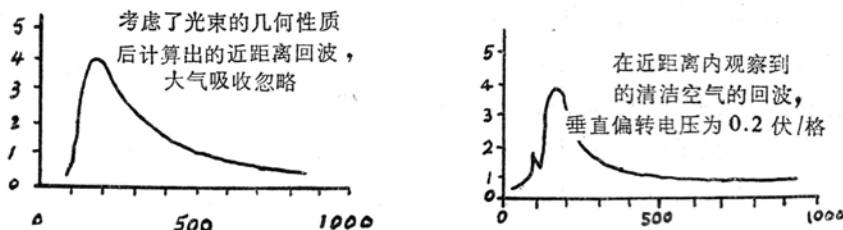


图 3

“近场”或短距离回波强度对于质点浓度非常微小的变化都极为敏感。有一天早晨，当能见距离从 20 哩变到 25 哩时，回波峰值的幅度变化非常显著。在有雾时，显示器的灵敏度必须调得很低，以免饱和。在这个区域中分析回波时，相对距离是更为重要的因素；例如，由 100 到 200 米，点目标回波幅值的差是 9 分贝，而从 1,100 米到 1,200 米时，只差 1.5 分贝。

6. 应用

虽然经验还很有限，但已证明脉冲光雷达有一系列重要的应用，甚至还有大量的可能应用尚待试验。必须指出，现时激光技术尚处于比较原始阶段，因而气象方面的许多可能应用有待于今后技术的发展。

将脉冲光雷达用于测云，显然优于其他任何技术。它能在白昼测量 35~40,000 呎 远处极薄的不可见卷云的能力、可以测 20 哩远处积云顶的高度(同样在白昼)的能力以及易于穿过较低云层的隙缝而探测较高云层的厚度的特点，都完全证实了上述论断。由于脉冲长度很短(名义上是 25 呎)，离地面很近的云底的高度也很易测得，有雨时也可用这种仪器探测云底的高度。

可以看出，光雷达用于能见度的客观测定有一定的希望，至少在某种条件下是如此。通过对光束的反向散射和消光的分析，可以想象，大气透明度能以有用的精度确定下来。需要做些实验来证明，单色光的观测结果是否能代表实际气象观测中白光的观测结果。如果沿这些方向的某些设想是正确的，则测定斜向能见度及海上能见度等重要而又几乎是经典的问题就可迎刃而解了。

由于光雷达可以探测极其稀薄的、肉眼难以分辨的(或者是黑得完全看不见的)云和烟的浓度，这就有可能利用它根据烟和霾的浓度确定逆温层的位置，也可能根据它们的气溶胶浓度来区分气团。毫无疑问，混合层的厚度也可以测出，如果需要的话，当太阳加热地表面，破坏了夜间的逆温时，可以一点一点地测(见图 7)。这种仪器最终还可以广泛地用于大气污

染的观测和研究。

观测(图9)表明,在白昼,深入浓积云至少100米左右,仍可以得到可测的光雷达回波。薄的卷云可以穿透几公里。这些观测结果提示了光雷达的另一一些应用,即研究云的发展、云的不同部位的水滴浓度以及光在云内部的散射。随着仪器技术(如象光束的微波调制)和观测技术的进展,将有可能利用多普勒位移观测云滴的运动,如同多普勒气象雷达所作的那样。

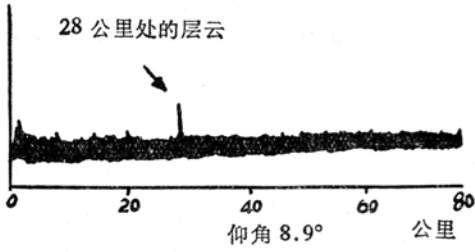


图 4

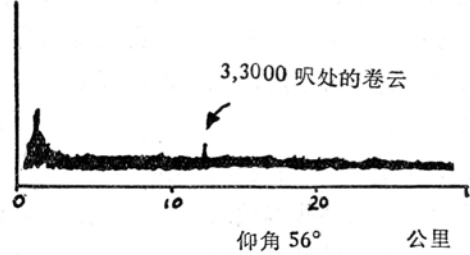


图 5

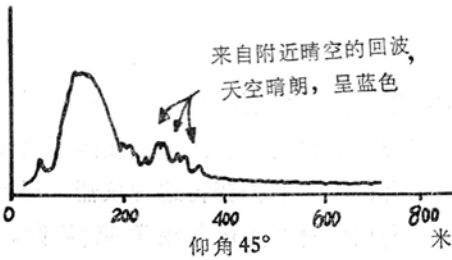


图 6

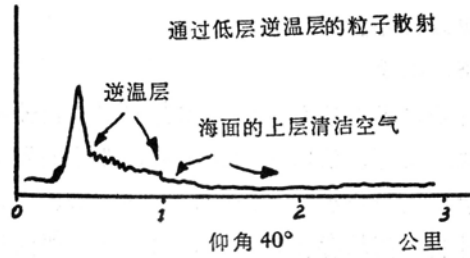


图 7

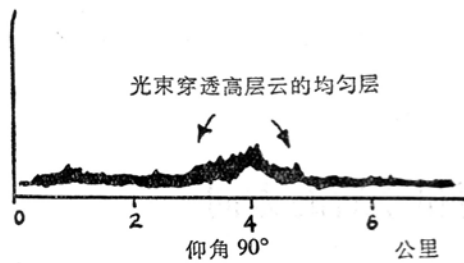


图 8

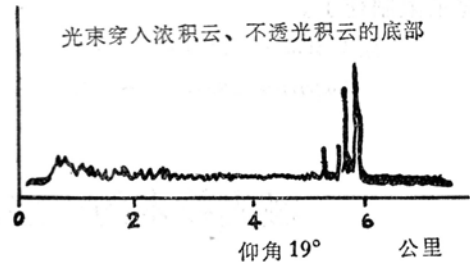


图 9

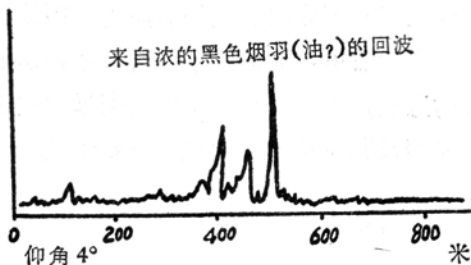


图 10

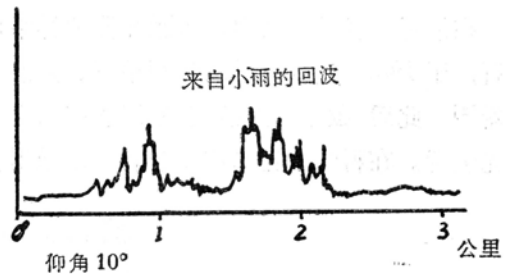


图 11

还可以提到其他一些可能的应用，例如利用追踪喷烟和火箭的尾迹来测风。但光雷达最有意思的用处之一，或许将是借探测漫延在对流层中的稀薄的烟、尘埃等粒子来观测小规模的大气运动。象微波雷达能够借检测雨滴和雪片的水平和垂直分布（风使它们形成一些特殊的花样）来描绘飓风和旋风的旋涡、垂直风剪力和前沿区那样，光雷达也可以通过尘埃的不同分布，间接描绘出无云地区内大气的活动情况。在这想法实现之前，我们必须等待高脉冲重复频率光雷达的进展，这是因为仍不可能在适度的时间内产生 PPI（平面位置指示器）、RHI（距离高度指示器）或 Z-t（方位角-时间）光雷达图案，但是，能够实现这一想法的日子并不十分遥远。可以预料，由光雷达得到的尘埃图与由雷达得到的降雨图有显著的不同，这是因为存在着下落速度、源区以及观测尺度和分辨能力这些主要的差别。

7. 观测

图 4 到图 11 是到现在为止所得到的许多观察中的很少的一部分例子。选取它们是想说明光雷达观测的某些本质问题，而不是说明有关大气的新情况。这些图片是实际光雷达摄影的精确描述，并且必须记住，每一张图片只不过是单独的描述。很显然，由于我们只用了不到一年的时间进行观测实验，我们尚须进一步究明有关仪器的能力和所受的限制，并对观测结果加以解释。

8. 结论

看来，光雷达在气象工作者的很多仪器中，一定处于一个很重要的地位。目前，对于探索性观测研究、仪器试验和光雷达理论的发展都存在着极好的机会。有两个重要因素会促进光雷达的进一步进展。第一，这种仪器比雷达简单，这会促进人们去获得这种仪器，尽管还没有过剩的商品存在；第二，由于在一段时期内，每一台仪器都必须由气象学家定做。这样，发明和改进的机会远比当时的雷达大——雷达的设计实际上已被探测点目标和描绘地形图的要求限制死了。

原载 *World Conference on Radio Meteorology Incorporating the Eleventh Weather Radar Conference*, 1964, 482~489(赵燕曾、林海译, 孙占鳌、杨香春校)

激光技术的一些问题和今后的方向

堀崎賢治, 高桥 忠

在最近的科学发明中，象激光器那样举世瞩目的东西是不多的。最初的激光器^[1]使用红宝石，于 1960 年制成；接着，利用氦、氖混合气体的高频放电，制成了第一台连续振荡的激光器^[2]。此后，激光器的研究、发展和应用有了巨大的进展；现在已制成了比初期远为先进的激光装置。在科学上已形成了包含微波激光器、激光器及其应用的新领域——量子电子学。

激光器的现状

表 1 给出了各种激光工作物质。在这些工作物质中，不仅有气体、液体、固体、激发方