

我所光谱仪器研制工作的发展

陈 愈 焜

摘要 本文介绍我所光谱仪器研制工作的发展概况，叙述了研制成的一些典型的发射、吸收以及特种光谱仪器的主要规格和性能。对光谱仪器研制工作中取得的成果以及存在的问题作了概括的总结。最后，指出了今后我所在光谱仪器研制工作方面的发展方向。

我所从1958年开始研制光谱仪器，当年，研制成我国第一台中型石英摄谱仪和大型石英—玻璃棱镜摄谱仪。此后，在发射光谱仪器方面还完成了大色散摄谱仪和二米平面光栅摄谱仪的研制；在吸收光谱仪器方面研制并生产了双光束红外分光光度计；在单色仪方面完成了透射式和反射式棱镜单色仪、光栅双单色仪以及棱镜—光栅双单色仪的研制；此外，还研制了多种特殊用途的和专用的光谱仪器和设备，如强聚光光栅分光计，时间分辨光栅摄谱仪及小型干涉调频光谱仪等。总计研制的光谱仪器和设备二十多种。这些研制成果有的已在所内外科研、教学和生产实践中应用，有的已在所内外工厂推广生产。通过多年来光谱仪器的研制，发展了光谱仪器的总体设计和光学系统设计，建立了一批材料、元件、测试及精密加工技术基础，成长了一支包括光学、机械、电子学配套的科技队伍，为研制我国社会主义建设迫切所需的光谱仪器开辟了道路，奠定了基础。

我所在光谱仪器研制方面，虽然对社会主义建设作出了一定的贡献，但是，由于十年动乱造成的严重破坏，由于发展道路的曲折和中断，因此，光谱仪器研制工作的发展速度还不能满足我国社会主义建设事业发展的需要。

一、我所研制的一些典型的光谱仪器

(一) 摄谱仪和看谱仪

1. 中型石英摄谱仪

本仪器可用于进行钢铁、有色金属与合金、矿石与矿物等的定性和定量分析。其光学系统示于图1中。图中S为狭缝，M为凹球面反射准光镜，P₁为考组型石英棱镜，O为石英照相物镜，P₂为照相物镜的焦面（或称为谱面）。仪器的工作光谱区为2000—6000埃，在3100埃处的线色散率约15埃/毫米，仪器能清晰地分辨开铁3100埃处的三重线（3100.67，3100.31，

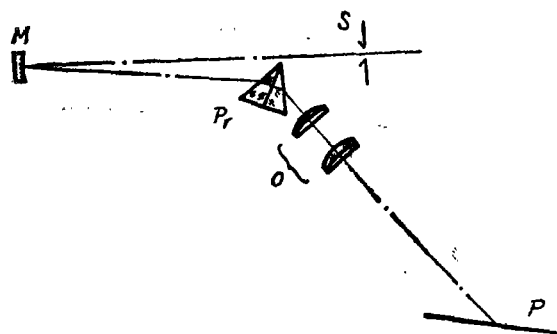


图1 中型石英摄谱仪的光学系统图

3099.97 埃)。本仪器的主要优点是谱面平直，因而使用方便。

2. 大型石英—玻璃棱镜摄谱仪（简称为大型摄谱仪）

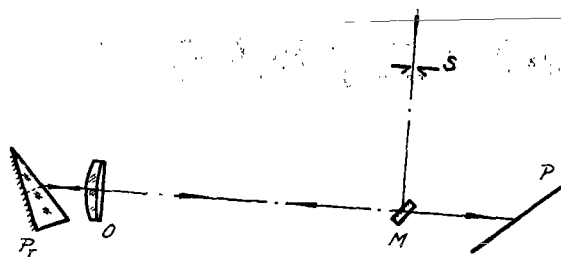


图2 大型摄谱仪的光学系统图

本仪器适用于分析研究具有密集的复杂光谱的试样。仪器采用自准式光学系统，见图2。由狭缝S射入的光束经平面镜M反射后射到物镜O上，因狭缝位于物镜的焦面上，所以光束通过物镜后变为平行光束射到自准棱镜P上，经棱镜色散后的光束返回并通过物镜，聚焦在谱面P上。由于使入射光束的光轴与色散后光束的光轴形成一个小的交角（在垂直图面方向），所以，色散光束自反射镜M的下方通过到达谱面，而并不反射回到狭缝处。由于仪器的色散很大，所以需要多次分段摄谱才能记录下全波段（2000—8000 埃）光谱。在变换摄谱波段时，需要同时完成三项动作：

（1）旋转色散棱镜，（2）进行物镜系统的调焦，（3）转动照相板盒，使感光板与选用波段的谱面重合。在本仪器中，上述三项动作是通过复杂的联动机构加以实现的。棱镜和物镜共有两套：一套用石英制成，另一套用光学玻璃制成。前者可以分辨开铁 2825 埃双线（2825.689, 2825.560 埃）后一系统可分辨开铁 4055 埃双线（4055.039, 4054.883 埃）。

由于很难获得优质的大块石英材料，加以仪器的结构过于复杂，因而该仪器在当时推广困难。

3. 大色散摄谱仪

这是一台具有三个玻璃棱镜的多用途摄谱仪，共有三个可更换的暗箱：（1）焦距 120 毫米；（2）焦距 270 毫米；（3）自准式光系，焦距 1300 毫米。前两种暗箱主要用于联合散射光谱分析和研究其他弱光光谱，最后一个暗箱适用于分析具有极其复杂光谱的样品（例如希土元素等）。图3中示出了仪器的部分光学系统图。其中S为狭缝， O_1 为准光镜， P_{r1} 、 P_{r2} 和 P_{r3} 为棱镜系统， O_2 为照相物镜，P为谱面。

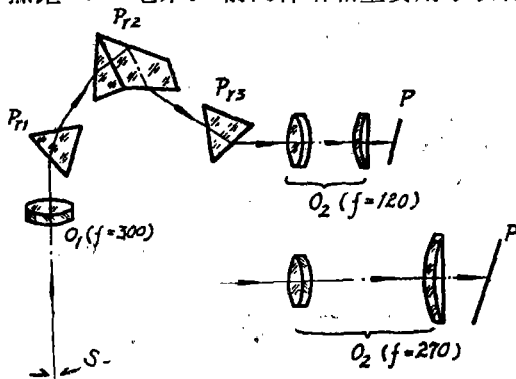


图3 大色散摄谱仪的部分光学系统图

仪器的工作光谱区为 3600—10000 埃。焦距 120 毫米的暗箱可分辨开钠双线（5890, 5896 埃），焦距 270 毫米的暗箱可分辨开铁 4067 埃双线（4066.98, 4067.28 埃），焦距 1300 毫米的暗箱可分辨开波长差仅为 0.1 埃的铁 3721 埃谱线组。除了多用途这一特点外，本仪器的另一主要优点是三个系统的谱面都是平直的，因而使用比较方便。

4. 二米平面光栅摄谱仪

随着我所光栅刻划技术的成熟，研制了平面光栅摄谱仪。仪器采取垂直对称式成象系统，其光学系统如图4所示。图中S为狭缝， M_1 是小平面反射镜， M_2 是凹球面反射镜，焦距为 2 米，其中一部分作准光镜，另一部分作为照相物镜，G为平面定向衍射光栅，其刻痕密度为 600 线/毫米，刻划面积为 100×45 毫米²，P是谱面。

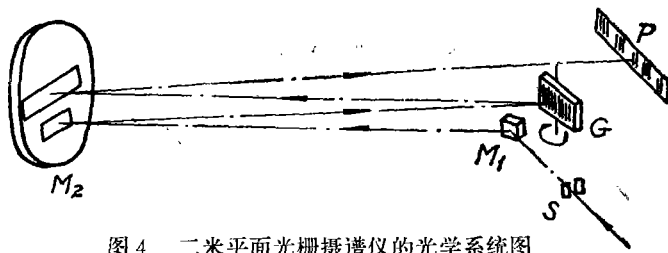


图4 二米平面光栅摄谱仪的光学系统图

本仪器的工作光谱区为2000—10006埃，线色散率为8.4埃/毫米（一级光谱），在二级光谱上，可以清晰地分辨开铁谱的3099.971，3099.897埃线对。仪器的结构简单、紧凑，谱面平直。

5. 二氧化碳激光光谱线分析仪

本仪器用目视观测法监测二氧化碳激光器在9.1—11.3微米光谱范围内发射的诸谱线的波长，并能粗略地估计出某些谱线的相对强度。仪器的光学系统采用折迭式垂直对称布置的艾伯特系统，见图5。图中S为狭缝， M_1 为平面反射镜， M_2 为凹球面反射镜，其焦距为750毫米，G为划痕密度为100线/毫米的平面衍射光栅，其定向（或称闪耀）波长为10.2微米（一级光谱），P为热敏显示屏（由大连化学物理研究所提供）。在谱面的红外谱线的位置上，由于红外辐射的热作用，使屏上热敏材料局部受热退色变暗，呈现一系列暗（谱）线，其波长可从屏的上下两侧波长标尺上直接读出。激光束去掉后，暗线逐渐消失，热敏屏恢复原色。由于热敏屏的响应和退色时间较短，所以可以观测谱线的跃迁变化情况；根据在相同时间内谱线变暗速度及变暗程度的差别，还可以粗略地估计出谱线的强弱状况。

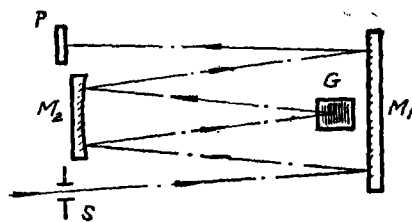


图5 二氧化碳激光光谱线分析仪的光学系统图

仪器的分辨率优于0.01微米，波长准确度 ± 30 埃，热敏屏响应时间约0.5秒；谱线退色时间为5~10秒。

本仪器的结构简单，体积小，操作简单。简单地更换光栅和波长标尺，已制成专用于监测一氧化碳激光谱线的分析仪。

此外，我所与应用化学研究所，自动化研究所等单位协作将三个棱镜的摄谱仪改造为光电直读光谱装置^[1]，这是一种采用积分电容的双光道光电装置。这一工作对促进我国光谱分析和仪器的光电化起过有益的作用。

(二) 单色仪和分光光度计

1. 透射式棱镜单色仪

这是我所早期试制的单色仪，其工作光谱区为3800—10000埃。光学系统图见图6， P_r 为恒偏向玻璃棱镜， O_1 、 O_2 分别为双胶合准光透镜和物镜， S_1 ， S_2 分别是入射和出射狭缝，本仪器在变换波长时还

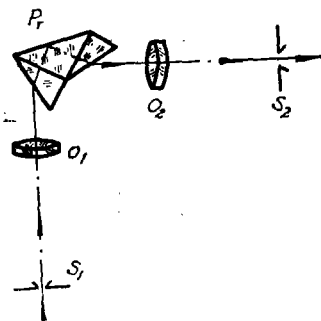


图6 透射式棱镜单色仪的光学系统图

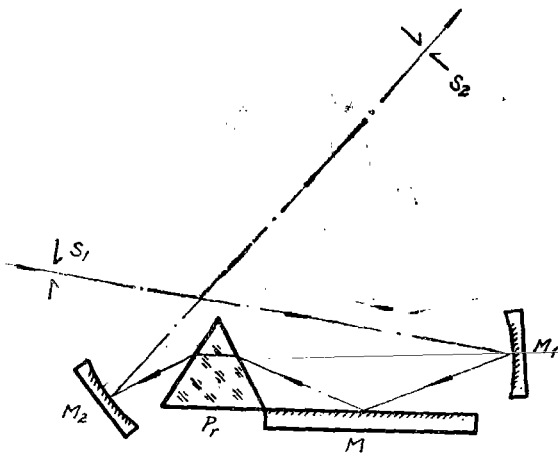


图7 反射式棱镜单色仪的光学系统图

这是一台由两台光栅单色仪组成色散相加的双单色仪，用数码管显示扫描的波长。仪器的焦距为0.5米，采用两组可更换的光栅：(1)划痕密度为1200线/毫米(定向于3000埃处，一级光谱)；(2)划痕密度为400线/毫米(定向于1.2微米处，一级光谱)。仪器的基本工作光谱区为2500埃—2微米，若换用其他合适的光栅组和滤光片，工作波段可展宽到等于或大于15微米。仪器的光学系统示于图8中。图中 S_1 、 S_2 及 S_3 分别是入射、中间及出射狭缝， G_1 、 G'_1 和 G_2 、 G'_2 为两组平面衍射光栅， F 为滤光片，以滤除不必要的高级光谱和杂散光， M_1 、 M_3 为准光镜， M_2 、 M_4 为聚焦物镜， M'_1 、 M'_2 、 M'_3 和 M'_4 为变更光束方向用的小平面镜，其中 M'_1 、 M'_2 和 M'_4 可插入光路或退出光路，以便选用各种不同的人射狭缝和出射狭缝的位置。

仪器的分辨率为0.23埃，波长重复性为 ± 0.22 埃，波长准确度为 ± 0.62 埃，杂散光水平为 2.9×10^{-6} (对连续光谱)。

本仪器备有钨丝灯、氘灯，光电倍增管及硫化铅探测器，光源及探测器用的聚光镜，以及测光系统等附件，可组成一台分光计。

4. 自动记录双光束红外分光光度计

本仪器的光学系统示于图9中。图中 S_0 为红外辐射源， C_1 为样品池， C_2 为补偿池， M_1 至 M_4 为球面镜， M_5 、 M_6 、 M_8 、 M_{12} 、 M_{13} 和 M_{14} 为平面镜， M_7 为旋转扇形镜， M_{11} 为抛物镜， M_9 和 M_{15} 为椭球镜， L 为场镜， W 为减光器， S_1 、 S_2 为入射和出射狭缝， P 为氯化钠棱镜， F 为滤光片， T_c 为半导体热电偶探测器：

仪器的工作光谱区为2—15微米。其主要性能指标如下：

- 分辨本领 1.7厘米^{-1} (在10.5微米波长处)
- 波长重复性 ± 0.01 微米
- 波长准确度 ± 0.02 微米

需要进行附加的调焦。

2. 反射式棱镜单色仪

本仪器的工作光谱区为2100埃—15微米。其光学系统图示于图7中。 S_1 、 S_2 分别为入射和出射狭缝， M_1 和 M_2 分别为准光镜和聚焦物镜， P 为棱镜，由氯化钠或玻璃制成，可根据需要更换，棱镜和平面镜 M 组成瓦兹渥士棱镜系统。

该仪器能分辨开钠 D 线(5890, 5896埃)。由于采用反射式光系，没有色差，在变换工作波长时，物镜不需要重新调焦，使用较为方便。

3. 光栅双单色仪

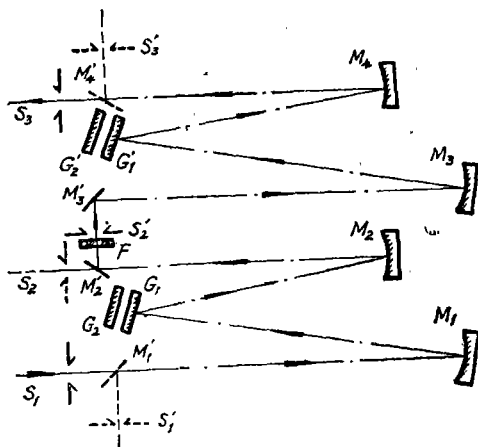


图8 光栅双单色仪的光学系统图

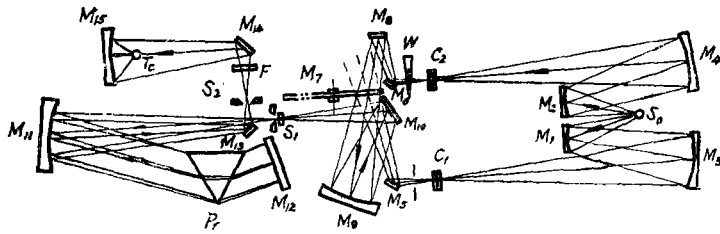


图9 双光束红外分光光度计的光学系统图

透过率准确度 $\pm 1.0\%$

(三) 特殊用途和专用光谱仪器

1. 强聚光光栅分光计

为了研究弱光光谱，例如微弱的荧光光谱，设计试制了一台采用大的狭缝长度与焦距之比（达1:10）及大平面光栅的强聚光光栅分光计。

仪器的光学系统示于图10中。图中 S_1 和 S_2 分别是入射狭缝和出射狭缝， M 是小平面反射镜， M_1 和 M_2 分别是球面准光镜和聚焦物镜， G 为平面定向衍射光栅，划痕密度为600线/毫米，划痕面积为 150×140 毫米²，定向波长区为4100—6500埃（二级光谱）， L_1 和 L_2 是费涅尔透镜， PM 为光电倍增管。用电子电位差计自动记录光谱。

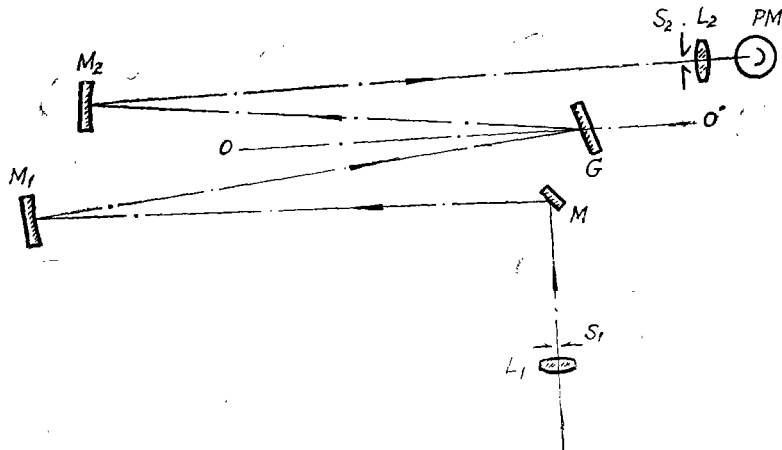


图10 强聚光光栅分光计的光学系统图

本仪器采用校正彗差的光学系统^[2]，其残余彗差减少到为艾伯特——法斯蒂型（即球面水平对称光系）的约 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 。入射狭缝的长度为133.5毫米，出射狭缝的长度为120毫米，两狭缝都是圆弧形，其曲率半径分别等于各自的狭缝长度，两缝圆弧的中心落在仪器轴 $O-O'$ 上。

本仪器具有很高分辨率，在二级光谱可清晰地分辨开波长差仅为0.249埃的两条氦黄线（5875.867，5875.618埃）。仪器中采用精密正弦传动机构进行线性扫描波长，在二级光谱，其波长准确度达 ± 0.1 埃。

2. 时间分辨光栅摄谱仪

本仪器用于研究入射辐射的光谱信息随时间迅速变化的情况。仪器包括摄谱仪、聚光、时标和比较光谱等光学系统。图11是摄谱仪部分的光学系统图。图中 S 为入射狭缝，它是在玻璃片上镀铝后刻制而成， L_1 是场镜， M_1 是准光镜， M_2 是中间穿孔的平面反射镜，

L_2 和 L_3 分别是准光镜和照相物镜的同心校正板，用于校正光学系统的象差， G 为平面衍射光栅，其划痕密度600线/毫米，划痕面积为 120×120 毫米²，定向波长为4500埃（二级光谱）和6000埃（二级光谱），可根据需要选用。 M_3 是照相物镜， M_4 是平面反射镜， L_4 是场镜，用于校正谱面弯曲。 P 是谱面。

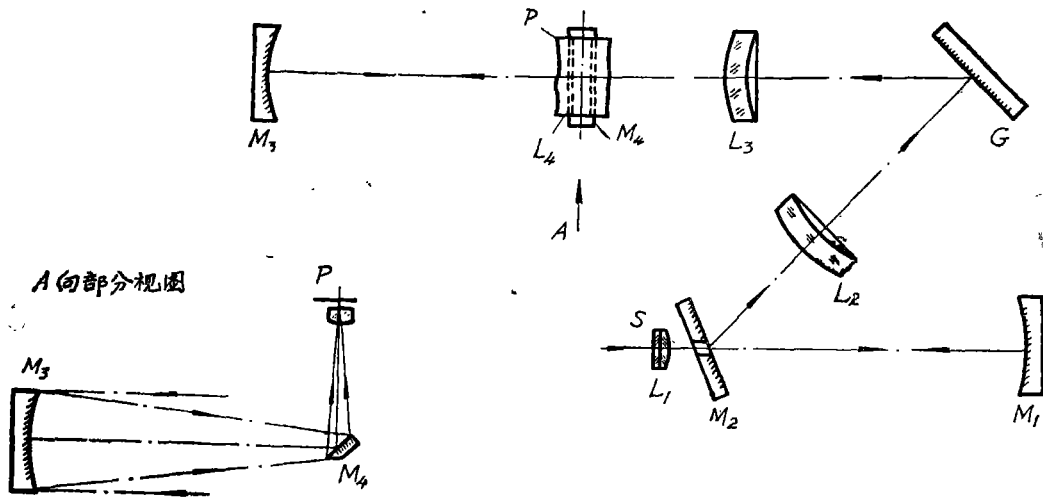


图11 时间分辨光栅摄谱仪主体部分的光学系统图

在狭缝前方设置一个转盘，在转盘边缘圆周上开了60个等分的透光斜槽。当转盘旋转时，各透光槽依次扫过狭缝，起着快门作用。当槽越过狭缝时，光谱以相应的速度扫过谱面，在此同时，输片机构使感光片以相同的线速度与相同的方向通过谱面，因此，在每一帧曝光过程中，感光片与光谱之间没有相对运动。

仪器的工作光谱区为3800—7400埃。相对孔径为1:3.3。分辨率高达约1埃（使用窄宽度狭缝挡时）谱面平直，感光胶卷宽度为120毫米，最高摄谱速度为3000帧/秒。

3. 小型干涉调频光谱仪

这是一种利用新的干涉调制原理的光谱仪器。它能快速地研究辐射源发射的微弱的红外辐射的特征。仪器的工作光谱区为 $5000-1000$ 厘米⁻¹，扫描时间为1—2秒钟。

仪器的光学系统示于图12中。利用迈克尔逊干涉仪调制入射辐射，使调制后的频率处于光电探测器灵敏的频率范围内，从而得到干涉图。然后再用电子计算机进行傅里叶变换计算，最后得到所需的光谱图。

在图12中， S_1 是分束板，在它的一面镀三硫化二锑作为分光膜， S_2 是补偿板， S_1 和 S_2 都用氟化钙制

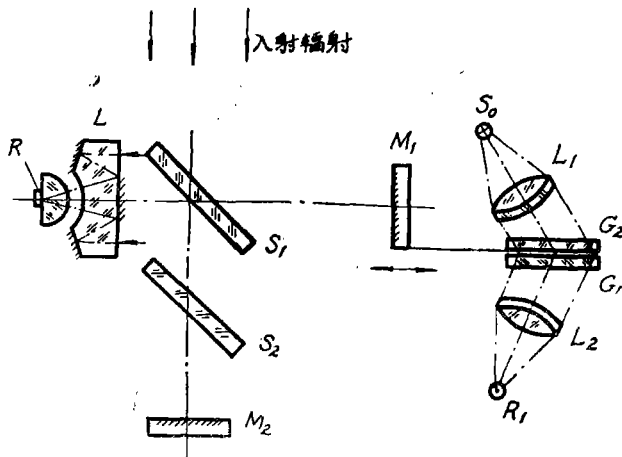


图12 小型干涉调频光谱仪的光学系统图

成, M_1 是匀速移动的可动反射镜, M_2 是固定反射镜, L 是氟化钙制的折反射式聚光镜, R 是具有锗浸没透镜的热敏电阻探测器。仪器中的参考条纹系统能提供准确的采样间隔。它由下列各部分组成: S_0 是小灯泡, L_1 和 L_2 分别是准光和聚焦透镜, G_1 和 G_2 都是划痕密度为1200线/毫米的透射光栅, 其中一块固定(G_2), 另一块(G_1)与可动镜 M_1 同步运动。 R_1 是光电三极管探测器。

在实验室内对本仪器的性能进行初步粗略测定, 得到仪器的分辨极限优于 40厘米^{-1} , 波长准确度优于 $\pm 40\text{厘米}^{-1}$ 。

此外, 我所还研制成研究地震前发生地光的地光光谱仪, 研究光栅性能的四米和八米焦距的光栅分辨率检验(光谱)仪以及光栅能量分布检验(光谱)仪等。

二、简要的小结

我所的光谱仪器研制工作可概括地小结如下:

1. 在光谱仪器研制方面, 由开始仿制逐步走上独立设计的道路, 研制的仪器由低性能向高性能发展; 仪器的工作光谱区由紫外、可见区发展到中红外区, 目前正在向真空紫外区扩展; 完成了最常用的棱镜摄谱仪基本系列的研制; 从1966年开始, 新设计的仪器中普遍地采用各种规格的衍射光栅代替棱镜; 由研制经典的利用空间色散原理的仪器发展到利用调制原理的新型光谱仪, 并发展了可调谐激光器; 由研制一般通用光谱仪进而发展特种光谱仪。

2. 由于光谱仪器研制工作的进展, 促进了光谱仪器总体设计及光学系统设计的发展, 一些有代表性的研究工作包括: 系统地分析研制的红外分光光度计的总体性能参数与各组成部分性能参数之间的关系^[3]; 发展了强聚光本领的长狭缝光栅单色仪的光学系统^[2]; 提出了强聚光本领的长狭缝棱镜单色仪的光学及总体系统; 发展获得平直谱面的光学系统, 以及利用同心折射面校正板的消象差系统等。

3. 光谱仪器整机的研制, 特别是通过一些较为复杂的光谱仪器(例如红外分光光度计)的研制, 带动了有关材料、元件、测试及工艺技术的发展。这些单元技术包括: 人工培养光学晶体(如氯化钠、氯化钾、氟化锂、氟化钙等)^[4]; 红外辐射源; 光栅的刻划与复制; 半导体热电偶探测器; 非球面镜与晶体棱镜的精密光学加工工艺以及其他精密机械工艺等。上述一些单元技术, 其中有些已陆续推广。今后, 新型材料和元件的研制将为发展新型光谱仪器创造条件。

4. 必须进一步加强使用、研究、生产单位之间的密切协作。光谱仪器的研制单位除了不断研制新型仪器, 并缩短其研制周期外, 还应该重视推广生产工作, 考虑采取更快的途径, 缩短推广周期。仪器投入生产阶段后, 还应该做许多巩固、提高的工作。

5. 我所在光谱仪器研制方面, 虽然对社会主义建设做出了一定的贡献, 但是, 发展的道路是曲折的, 由于十年动乱, 对光谱仪器研制工作造成严重破坏; 由于历史的原因, 该方面研制工作曾被中断。在“四人帮”被粉碎后, 光谱仪器研制工作逐步恢复发展, 但是, 发展的速度还不够快, 新技术的发展不够多。因而还不能满足我国社会主义建设事业发展的需要。

三、今后的发展方向

目前, 我国的光谱仪器制造工业已迅速形成一定的生产能力, 能批量生产多种型号及系

列的通用光谱仪器，其中包括若干技术复杂程度较高的仪器，并且已建立起一支研制新产品的技术队伍。在这种新的形势下，对我所的光谱仪器研制工作提出了新的要求。我们将发展科学研究（特别是前沿学科）及尖端技术所需的高精度光谱仪器和技术；发展解决国民经济中具有重大经济效益的关键问题所需的高精度光谱仪器和技术。我们的发展工作将主要集中于下列三个方面：

1. 发展激光光谱技术与仪器：这一新技术的发展为利用新工作原理的光谱仪器开辟了道路，使光谱技术发生巨大的变革。例如，与经典仪器相比，激光光谱仪器的分辨率能有好几个数量级的提高。目前，我所已研制成高分辨率可调谐环形染料激光器，今后的工作将发展各种可调谐激光器，以扩展工作光谱区。

2. 发展真空紫外光谱仪器与技术：各种类型的真空紫外光谱仪是同步辐射应用和等离子体诊断等方面的重要研究设备，在天体物理学研究中，它也得到广泛的应用。这方面的研制工作的进展将填补我国在该光谱区内的空白。

3. 发展新技术与新元件：例如发展电视技术，电子计算机技术，调制技术，全息技术和外差技术等；发展新型的探测器和分光元件等。这些新单元技术是发展新型光谱仪器的基础，可应用于如遥感、空间及其他各种光谱仪器中。

参 考 文 献

- [1] A. Г. 克列斯基杨诺夫、杨家墀、黄本立、陈愈焜、畅快、常增实、李文冲；
物理学报，（1959）15，6，297—304.
- [2] 王之江，薛鸣球；
物理学报，（1963）19，11，705—716.
- [3] 唐九华；
光学机械，（1976）2，7—14.
- [4] 王守武等；中国科学院编译出版委员会主编
“十年来的中国科学（1949—1959）物理学”
科学出版社，1962，74页。