

常规光谱仪器分光系统的比较

杨怀栋, 陈科新, 黄星月, 何庆声, 金国藩

清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 革新常规光谱仪具有现实的技术和经济价值, 是推动光谱仪器不断发展的重要途径。鉴于分光系统决定着常规光谱仪的基本性能, 是革新常规光谱仪的关键, 文章对常规光谱仪的分光系统进行了比较, 以揭示各典型分光系统的特色和内在衍化动力。文章从决定要素及公式、典型数据三方面对各典型分光系统的基本特性指标: (光谱范围、分辨率、色散率和光通量) 进行了逐一和综合的横向比较, 不但揭示出各分光系统的特色和互补性, 还表明分辨率与光通量的矛盾普遍存在于常规光谱仪中。以此为主线纵观常规光谱仪的衍化历史, 进一步揭示出分辨率与光通量的矛盾运动贯穿始终, 是推动其发展的重要动力。这为理解常规光谱仪的发展提供了新的视角, 正确的认识和把握分辨率与光通量的矛盾将有利于分析和解决光谱仪器面临的核心问题, 加速新型光谱仪器的研制。

关键词 光谱仪; 分光; 比较

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)06-1707-06

引言

光谱仪器历经百年发展, 已是一个庞大的家族。现有的光谱仪器中, 相当一部分从研究对象和仪器本身的设计制造原理上来讲都已成熟, 被称为常规光谱仪器, 如常用的各种色散光谱仪和傅里叶变换光谱仪; 还有一部分正在发展的光谱学研究和光谱技术研究的装置, 以及特殊应用的光谱仪则称为非常规的光谱仪器, 如一些激光光谱仪和调制光谱仪。光谱仪器的发展得益于常规光谱仪器和非常规光谱仪器发展两个相辅相成的方面。一方面随光谱学和光谱技术以及其他利用光谱学和光谱技术作为研究手段的科学技术领域的发展, 出现崭新的非常规的光谱仪器, 并在逐步成熟和普及后成为常规光谱仪器; 另一方面常规的光谱仪器也随相关技术进步不断升级换代, 面貌焕然一新, 并常常脱胎换骨, 催生出非常规的光谱仪器。可见, 研制非常规光谱仪器与革新常规光谱仪器二者同等重要, 不可偏废。此外, 与非常规光谱仪器某些性能卓越, 但不成熟, 与处于科学研究状态相比, 常规光谱仪器如光栅光谱仪、傅里叶变换光谱仪等则应用广泛, 在光谱仪器中处主导地位, 几乎占据着市场的全部份额。因此, 革新常规光谱仪还具有现实的技术和经济价值。鉴于上述分析, 有必要对常规光谱仪器进行对比研究, 以提供改进依据。

常规光谱仪器类型很多, 但它们的核心部分是分光系统, 光谱仪器的基本特性中测量光谱范围、色散率、分辨率和集光本领就直接取决于分光系统, 其余特性也与分光系统密切相关。分光系统根据分光原理可划分为色散式和调制式两大类, 色散式的又可根据具体色散原理不同划分为物质色散、衍射色散、干涉色散三种, 调制式的目前仅有傅里叶变换光谱仪一种较为成熟。显然, 根据分光系统进行比较研究, 易于从宏观上把握不同类别光谱仪器的特点。本文将简述典型常规光谱仪分光系统的原理, 从光谱测量范围、色散率、分辨率和光通量等方面对其进行横向比较, 进而从克服分辨率与光通量矛盾的视角纵观常规光谱仪衍化历程, 阐述光谱仪发展的重要驱动力——分辨率与光通量的矛盾运动。

1 分光原理简介^[1-3]

1.1 物质色散分光

利用不同频率的光波在同一介质中传播速度不同, 因而折射率不同的原理来分光。常见的是棱镜分光系统, 通常棱镜工作在最小偏向角条件下以使光路对称, 其原理如图1所示。色散特点可以由式(1)表示

$$\sin i = n \sin \left[\frac{\alpha}{2} \right] \quad (1)$$

其中, i 为入射角, n 和 α 分别为棱镜折射率和顶角。

收稿日期: 2008-01-06, 修订日期: 2008-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(60578002)和教育部科学技术研究重点项目(106014)资助

作者简介: 杨怀栋, 1976年生, 清华大学精密仪器与机械学系助理研究员 e-mail: yanghd@tsinghua.edu.cn

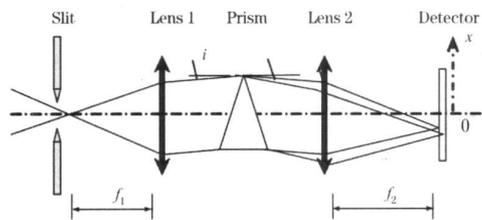


Fig 1 Diagram of prism spectrometer

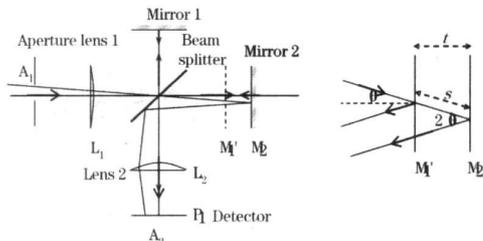


Fig 4 Diagram of Fourier transform spectrometer

1.2 衍射色散分光

利用不同频率的光波以相同入射角射到多缝上时，各频率光波同一级衍射主极大位置不同的原理来分光，最主要的是光栅分光系统。其原理如图 2 所示。色散特点可以由光栅方程(2)表示

$$d(\sin i \pm \sin \theta) = m\lambda \tag{2}$$

其中， d 为光栅常数， i 和 θ 分别为入射角和衍射角， m 为衍射级次， λ 为入射光波长。

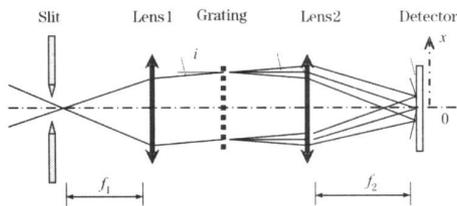


Fig 2 Diagram of grating spectrometer

1.3 干涉色散分光

利用不同频率的光入射到平板上发生分振幅多光束干涉时，各频率光波干涉主极大位置不同的原理来分光，最主要的是 Fabry-Perot (F-P) 分光系统，如图 3 所示。色散特点可由多光束干涉的极值条件式表示

$$2t \cos \theta = m\lambda \tag{3}$$

其中， t 为 F-P 间隔， θ 为中心偏角。

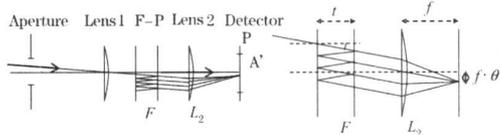


Fig 3 Diagram of Fabry-Perot spectrometer

1.4 傅里叶变换分光

利用不同频率的光波经双光束干涉过程调制后所得的干涉数据与光谱之间具有傅里叶变换关系的原理来分光。常用来实现傅里叶变换分光的 Michelson 干涉仪原理如图 4 所示。分光原理可由式(4)的傅里叶变换对表示

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} O(\bar{\nu}) \cos 2\pi \bar{\nu} x \, d\bar{\nu} \tag{4}$$

$$O(\bar{\nu}) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \cos 2\pi \bar{\nu} x \, dx$$

其中， I 为干涉数据， O 为光谱数据， $\bar{\nu}$ 为波数。

2 不同分光系统特性对比

在常规光谱仪中，光谱测量范围、色散率、分辨率和集光本领指标直接取决于分光系统相应的特性，本节将从这些方面对比分析不同的分光系统。

2.1 光谱测量范围和自由光谱范围

这里光谱测量范围是指分光系统能适用的光谱范围，自由光谱范围是指光谱不发生重叠的范围。具体仪器的光谱测量范围则取决于分光与探测等系统综合的结果。

(1) 棱镜分光系统的光谱测量范围主要受棱镜材料的透光率和色散率影响，通常用于可见光，当采用特殊材料后也可用于紫外区和红外区，但受材料一致性、稳定性，加工性能影响很少采用。该系统不产生光谱叠级现象，即自由光谱范围与光谱测量范围一致。

(2) 光栅分光系统的测量范围可从 X 射线直到微波，包含整个光谱区，而且当采用闪耀光栅时，还可以加强所关注光谱区的能量，因此被广泛采用。该系统的自由光谱范围为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m+1} \tag{5}$$

例如，对于波长为 500 nm 左右的 2 级衍射谱，自由光谱范围为 170 nm。

(3) F-P 分光系统的光谱测量范围主要考虑所对应波长的镜面反射系数要大，可用于从紫外到红外的光谱区。它的自由光谱范围为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2t} \tag{6}$$

例如，对于波长为 500 nm 左右，F-P 间隔为 5 mm 的情况，自由光谱范围仅 0.03 nm，可见是非常小的。

(4) 傅里叶变换分光系统的光谱测量范围主要受分束光学元件的限制，如通常用的分束棱镜限制了短波长的应用。因此常用于可见至红外光谱区。它的自由光谱范围取决于光程差的变化间隔，可表示为

$$\lambda_{\min} = 2\Delta x \tag{7}$$

例如当变化间隔为 1 μm 时，波长应不小于 2 μm。这决定了傅里叶变换分光系统通常用于红外区。

从不同分光系统的测量和自由光谱范围来看，光栅分光系统具有较强的适应性，棱镜则在无叠级方面有优势，F-P 干涉仪受限于很小的自由光谱范围，而傅里叶变换光谱仪目前受限于光程变化间隔难以太小，适用于红外波段。

2.2 色散率

色散率反映色散式分光系统将不同波长的光在空间散开的能力,通常表示为角色散和线色散,由于傅里叶变换光谱仪是调制式,该方面比较将不包括在内。

(1) 棱镜分光系统的角色散为

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{2s \sin \alpha / 2}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha / 2}} \frac{dn}{d\lambda} \quad (8)$$

其中 $dn/d\lambda$ 为折射率随波长的变化率。考虑到角色散和有效通光孔径的折中,通常棱镜分光系统顶角选择 60° ,若选冕牌玻璃,则 500 nm 处角色散约为 $0.10 \text{ mrad} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

(2) 光栅分光系统的角色散为

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta} \quad (9)$$

对于常用的 $600 \text{ line} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的光栅,二级光谱的角色散不小于 $1.2 \text{ mrad} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

(3) F-P 分光系统的角色散为

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = -\frac{k}{2d \sin \theta} = -\frac{1}{\lambda t g \theta} \quad (10)$$

对于常用的接近正入射的情况(如, $\theta \approx 0.02 \text{ rad}$),在 500 nm 附近,角色散约为 $100 \text{ mrad} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

从色散率对比来看,F-P 角色散较大,比光栅高约两个数量级,而棱镜的角色散率则最小,比光栅小一个数量级。

2.3 分辨率

分光系统在理想状况下的分辨率称为理论分辨率,是分光系统所能达到的分辨极限。

(1) 棱镜分光系统和光栅分光系统。它们具有相似的结构,如图 5 所示,通常认为它们的理论分辨率由仅受色散方向上孔径限制的理想单缝衍射像来决定。由瑞利判据可得

$$R = D' \frac{d\theta}{d\lambda} \quad (11)$$

其中 D' 为垂直色散方向上孔径的尺寸,它与系统孔径光阑(为充分利用色散器件,通常就由它充当孔径光阑)尺寸 D 的关系如式(12)

$$D' = D \cos \theta \quad (12)$$

此时,线扩散函数具有 $\sin \pi x / \pi x$ 的形式,即 sinc 函数,根据瑞利准则可以导出棱镜分光系统的理论分辨率为

$$R = t \frac{dn}{d\lambda} \quad (13)$$

其中 t 为棱镜底边长。

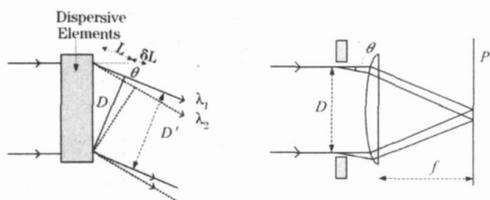


Fig 5 Diagram of prism/grating dispersion system

也可导出光栅分光系统的理论分辨率为

$$R = mN \quad (14)$$

其中 N 为光栅刻线总数。由式(8),(9),(11),(12)可知,在棱镜和光栅口径相同的情况下,通常光栅分光系统的分辨率比棱镜分光系统高一个数量级。

(2) F-P 分光系统。它的理论分辨率由多光束干涉形成的 Airy 分布决定。此时虽然瑞利准则不再适用,但可根据合成强度轮廓中心凹陷为最大光强的 80% 导出理论分辨率为

$$R = m \frac{\pi \sqrt{P}}{1 - P} = mN_F \quad (15)$$

其中 P 为反射系数,对于间隔为 5 mm,反射系数为 90% 的 F-P,在 500 nm 处可达到 6×10^5 的分辨率,是 100 mm 口径 $1200 \text{ line} \cdot \text{mm}^{-1}$ 光栅的 5 倍。

(3) 傅里叶变换分光系统。它的理论分辨率由最大光程差决定。如果称光谱所在空间为物空间,其傅里叶变换所在空间为频率空间,那么最大光程差相当于在频率空间对光谱的傅里叶变换加窗截短。这导致即使待测物光谱为理想的线谱,测量结果也具有与窗函数的反傅里叶变换相同的形式。这样,傅里叶变换光谱的理论分辨率就取决于窗函数的反傅里叶变换了。如果只考虑最大光程差截短影响,可以认为窗函数为矩形窗,那么它的反傅里叶变换为 sinc 函数,由瑞利准则可导出此时的理论分辨率为

$$R = \frac{2L}{\lambda} \quad (16)$$

其中 L 为干涉仪可实现的最刁光程差。显然,傅里叶变换分光系统的理论分辨率可随最大光程差的增大而趋于无穷,但受干涉仪精密位移机构的制约,目前主要用于红外区,通常在 1000 左右($\bar{\nu} = 1000 \text{ cm}^{-1}$)。

在理论分辨率方面,目前 F-P 分光系统具有明显优势,其次是光栅和棱镜分光系统,傅里叶变换分光系统最具潜力,但目前其优势主要体现在红外区。值得说明的是,各分光系统理论分辨率可统一为系统可实现的极限光程差与波长之比: $R = L/\lambda$ 。这样,根据可实现的最大光程差,理论分辨率排序将依次为傅里叶变换系统、F-P 系统、光栅系统和棱镜系统。

2.4 光通量

分光系统的光通量取决于视场光阑的面积和它对孔径光阑所张的立体角,可由式(17)计算

$$T = A \cdot \Omega \quad (17)$$

由于棱镜和光栅分光系统结构相似,而 F-P 则和傅里叶变换分光系统结构相似,因此可分两类讨论。为方便比较,设准直透镜与成像透镜焦距均为 f 。

(1) 棱镜和光栅分光系统的光通量。在这类分光系统中,输入孔径是狭缝,输入立体角则是狭缝中心对色散元件的张角,因此,光通量为

$$T_1 = whWH \cos \theta / f^2 \quad (18)$$

其中 w 和 W 分别是沿色散方向的狭缝和色散元件宽度, h 和 H 则分别为垂直色散方向的狭缝和色散元件高度。仅从式(18)来看,当立体角一定时,狭缝的面积越大光通量就越大。而实际上狭缝的面积却不能任意扩大。根据光谱成像过程,谱面上的光谱线可看作是狭缝的衍射像,其轮廓会随狭缝增大而展宽。根据前述的分辨率判据,当色散率一定的情况下,过宽的狭缝必然导致分光系统实际分辨率的下降,因此光通量和分辨率间存在此消彼涨的关系。但值得指出的是,受衍射极限的影响,狭缝减小到一定程度后,分辨率就

几乎不再增加, 而光通量损失却很大。可见, 狭缝宽度存在最佳值, 仅考虑衍射影响时, 该值为^[4, 5]

$$w_0 = f\lambda / (W \cos \theta) \quad (19)$$

对于自准直式光路, 可导出受缝宽 w ($w > w_0$) 限制的分辨率与理论分辨率的关系为:

$$R_{\text{sh}} = \frac{w_0 R}{w} \quad (20)$$

易知, 当缝宽取最佳值时, 分辨率最接近理论值, 此时光通量为

$$T'_1 = w_0 h (D'_g / f)^2 \quad (21)$$

其中, $D'_g = WH \cos \theta$ 是光栅或棱镜在色散方向上的等效通光孔径。在此要说明的是, 虽然缝高增加带来负面影响远不如缝宽明显, 但过高时也会产生大的谱线弯曲等问题, 同样降低分辨率。

(2) F-P 和傅里叶变换分光系统。这类分光系统利用光的干涉现象, 谱面上的干涉图样为圆环, 因此要用圆孔分离所关心的区域。该圆孔及其对系统孔径光阑所张的立体角决定了光通量, 可由式(22)计算

$$T_2 = \pi a^2 (2D'_F / f)^2 \quad (22)$$

其中 a 为圆孔半径, D'_F 为干涉孔径光阑。虽然由式(22)来看, 当立体角一定时, 光通量与圆孔的面积成正比, 但实际情况与狭缝类似, 圆孔直径也是光通量与分辨率的折中。较大的圆孔会包含过多的干涉条纹, 使得光程差变化所引起的光强改变难以觉察, 从而降低分辨率。与此同时, 过小的圆孔对分辨率的增加也几乎无贡献, 光通量却会损失很多。可以导出圆孔半径的最大值与分辨率的关系为^[2, 3]

$$a_0 = f \sqrt{2/R} \quad (23)$$

此时光通量为:

$$T'_2 = \pi a_0^2 (D'_F / f)^2 \quad (24)$$

当 F-P/傅里叶变换分光系统与棱镜/光栅分光系统立体角相同时, 二者光通量的比值将等于圆孔与狭缝的面积比值, 当它们均取最佳参数时有

$$\frac{T'_2}{T'_1} = \frac{\pi a_0^2}{w_0 h} \quad (25)$$

对于同等的理论分辨率, 该比值通常在几十到几百之间。如, 对于 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的 $1200 \text{ line} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的光栅, 其一级光谱在 500 nm 处分辨率为 1.2×10^5 , 当焦距为 1 m 时, 最佳狭缝的宽约为 $10 \mu\text{m}$, 缝高约为 100 mm 。而同等分辨率和焦距的干涉仪, 最佳圆孔直径约为 5 mm 。此时, 它们光通量之比为 $1:20$ 。可见干涉分光系统在光通量上有显著的优势。

2.5 综合比较

通过上述基本性能的比较, 可以看出各分光系统均有其特点。棱镜分光系统分光性能较低, 已逐步被光栅分光系统所替代, 但它是唯一光谱无叠级的系统, 且结构简单, 适合做多级色散光路中的预色散器^[6]。F-P 干涉色散系统, 具有突出的分辨率和光通量性能, 但自由光谱范围很窄, 结构和装调复杂, 常用于研究超精细结构等高要求的场合。当然, 也可以通过与棱镜或光栅预色散器联用来克服自由光谱范围过窄的弊端, 扩展光谱测量范围, 但这会增加系统的复杂

度, 所以它的应用面始终很有限^[7]。光栅分光系统具有宽的光谱测量范围和高的分辨率, 且与干涉系统相比结构、装调要求较低, 是目前综合性能较为突出的系统, 也是应用最为广泛的系统。傅里叶分光系统虽然综合性能潜力较高, 但受现阶段干涉系统极限光程差和光程差变化间隔限制, 目前优势主要体现在红外波段。

3 常规光谱仪器发展中的矛盾运动

常规光谱仪器分光系统的比较既说明了它们的特点和现状, 也从另一个侧面反映了分光系统的发展历程。上一节的分析表明在常规分光系统中均存在分辨率和光通量的矛盾, 进一步纵观整个光谱仪器的发展历史, 可以发现分辨率与光通量的矛盾运动贯穿始终, 并且推动着光谱仪不断发展。前文已提及, 高性能的光谱仪器追求分辨率、光通量、波长精度、光度精度等指标, 其中分辨率和光通量指标最为基础。分辨率决定了光谱仪器分辨光谱精细结构的能力, 而光通量则限制了光谱仪的灵敏度——弱信号光将导致低信噪比, 难以保证测量精度。该矛盾在棱镜和光栅分光系统中集中体现在狭缝上, 高分辨率要求缩小狭缝, 而大光通量要求扩大狭缝, 二者不可调和, 只能折中, 往往是在满足分辨率要求的情况下, 尽可能扩大狭缝提高光通量。在棱镜分光系统中, 由于棱镜光谱透过率和色散率都较低, 该矛盾比较突出, 仪器性能难以提升。光栅光谱仪利用高性能的衍射光栅避免了光谱透过率问题, 并使色散率提高了数十倍, 有效缓解了该矛盾, 显著提升了光谱仪的性能。为进一步缓解该矛盾, 人们又研制了阿达玛变换光谱仪^[8, 9], 虽然利用狭缝阵列提高了光通量, 却无法摆脱狭缝对分辨率的限制, 且狭缝阵列机构复杂, 难以实用。F-P 和傅里叶变换光谱仪的出现使该问题的解决有了新的突破。它们利用干涉原理, 又用圆孔取代狭缝, 显著提高了光通量和分辨率。但改由小孔体现的光通量和分辨率的矛盾依然如故。在不断寻求彻底解决该矛盾的过程中, 人们除革新分光系统外, 还积极探索新的光源和探测技术^[10-12]。而各种高性能光源和高灵敏度光电探测器的采用也有效缓解了该矛盾。最重大的突破是激光的引进和随之而来的激光光谱技术^[13]。激光突出的单色性、会聚性和高亮度等特点使光通量和分辨率获得前所未有的解放, 也为解决该矛盾带来了新的希望。但激光光谱仪等非常规光谱仪器受其它因素制约, 目前远不及常规光谱仪成熟, 而且由于特色不同, 也难以取代常规光谱仪, 因此该矛盾还将在相当长的时间内广泛存在。

近些年来, 随空间、环境、质量控制等科学的发展, 光谱仪的微型化要求日益迫切^[14, 15]。由于非常规的微型光谱仪距实用尚很遥远, 常规光谱仪的微型化就显得尤为重要^[16, 17]。图 6 是具有代表性的小型平面光栅光谱仪 USB2000(美国 Ocean Optics)。

在常规光谱仪微型化的过程中, 分辨率和光通量的矛盾则表现的更为突出。它不但围绕分光系统展开, 还围绕探

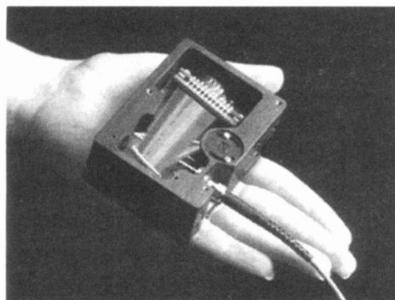


Fig 6 Miniature grating spectrometer USB2000

测器展开。先看分光系统。微小型化的设计难以减小孔径的衍射和各种像差,也难以保证装调精度,这使光谱像的质量下降在所难免,为保证分辨率就必须牺牲更大的光通量。再看探测系统。现代微小型光谱仪基本采用阵列探测器^[18],因为它除响应线性好、灵敏度高、动态范围大、时间分辨率高外,还具有多通道的优点,有效地避免了常用的光谱扫描探测方式需要运动件,机构复杂,体积大的弊端。但它有一个明显的缺点:空间分辨率低。这表现在两个方面:一是像素

较大,通常在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 左右,约比感光胶粒大 $5\sim 10$ 倍,这样它在空间对光谱像积分所产生的模糊就大。二是抽样率低,它的抽样间隔取决于像素尺寸,通常略大于它,但绝不会小于它,可以说,也比感光板的抽样间隔大 $5\sim 10$ 倍。阵列探测器空间分辨率对测量光谱图的负面影响取决于像素尺寸与光谱像尺寸的对比。当像素尺寸与光谱像尺寸相比足够小时,负面影响就不明显,反之,就会导致测量光谱图明显失真。减轻探测器空间分辨率的影响,要么减小小像素尺寸,要么放大光谱像。微小型化的设计使成像系统放大率难以提高,只能减小像素,但小的像素会导致信噪比下降,过小的像素还会因不能保证必需的信噪比而失效,在 $0.35\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺下,探测器像素的极限尺寸约为 $5\ \mu\text{m}$ ^[19]。这样,光通量与分辨率的矛盾又以信噪比和像素尺寸的形式展开了。可见,分辨率与光通量的矛盾运动还主导了光谱仪的微小型化进程。

综上所述,分辨率和光通量的矛盾运动为理解光谱仪器的发展提供了新的视角,正确的认识和把握这对矛盾有利于分析和解决光谱仪器面临的核心问题,从而加速新型光谱仪器的研制。

参 考 文 献

- [1] Thorne U, Litzén S Johansson. Spectrophysics: Principles and Applications. Berlin, New York: Springer, 1999. 22.
- [2] LIN Zhong, FAN Shi-fu(林中,范世福). Spectroscopic Instrumentology(光谱仪器学). Beijing: Machine Industry Press(北京:机械工业出版社), 1989.
- [3] Vidi Saptari. Fourier Transform Spectroscopy Instrumentation Engineering, Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 2004.
- [4] Mielenz K D. JOSA, 1967, 57(1): 66.
- [5] Anne P Thorne. Spectrophysics. London: Chapman and Hall, 1988.
- [6] Becker-Ross Helmut, Florek Stefan, Franken Helmut, et al. JAAS, 2000, 15(7): 851.
- [7] Iwata Tetsuo, Koshoubu Jun. Applied Spectroscopy, 52(7), 1998: 1008.
- [8] Martin Harwit, Neil J A Sloane. Hadamard Transform Optics. New York: Academic Press, 1979. 5.
- [9] Riesenber R, Nitzsche G, Voigt W. Hadamard Encoding and Other Optical Multiplexing. VDI-Berichte 1694, 2002. 345.
- [10] Rust Jennifer A, Nobrega Joaquim A, Calloway Jr. Clifton P, et al. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2005, 60(5): 589.
- [11] Utter S B, Lopez-Urrutia J R C, Beiersdorfer P, et al. Rev. Sci. Instrum., 2002, 73(11): 3737.
- [12] Magnan Pierre. Detection of Visible Photons in CCD and CMOS: A Comparative View. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 5(1-3): 199.
- [13] Demtroder W. Laser Spectroscopy: Basic Concepts and Instrumentation/Wolfgang Demtroder. Berlin; New York: Springer, 2003.
- [14] Bacon C P, Mattley Y, DeFrece R. Rev. Sci. Instrum., 2004, 75(1): 1.
- [15] Wolfenbuttel R F. IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement, 2004, 53(1): 197.
- [16] Daly James T, Johnson Edward A, Bodkin Andrew, et al. Proc. SPIE, 2000, 3953: 70.
- [17] Delage Andre, Bidnyk Serge, Cheben Pavel, et al. Proceedings of 6th International Conference on Transparent Optical Networks, 2004, 2: 78.
- [18] ZHANG Zhan-xia, LIU Hong-tao, HE Jia-yao(张展霞,刘洪涛,何家耀). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2000, 20(2): 160.
- [19] Eid E S. Proceedings of the Eighteenth National Radio Science Conference, 2001, 1(27-29): 15.

Comparison of Dispersion Parts of Conventional Spectrometers

YANG Hua-dong, CHEN Ke-xin, HUANG Xing-yue, HE Qing-sheng, JIN Guo-fan

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Innovation of conventional spectrometers is of actual technical and economical value. It is also an important way to accelerate the development of spectroscopic instruments. When improving a conventional spectrometer, its dispersion part is pivotal, because it is decisive to the basic performance of the spectrometer. In the present paper, the typical dispersion parts of conventional spectrometers are compared to feature them and find the evolution force among them. The basic characters of the dispersion parts, including spectral range, dispersion power, resolution and throughput, are compared separately and comprehensively by reviewing their decisive factor, formula and typical data. The results not only conclude the feature and the complementarity of the dispersion parts, but also indicate that the trade-off between resolution and throughput is ubiquitous in traditional spectrometers. Further reviewing from this point, the evolution history of traditional spectrometers shows that the conflict between resolution and throughput is an important evolution force. This is a new way to understand the evolution of traditional spectrometers. Moreover, dealing with the trade-off between resolution and throughput correctly will help to analyze and settle the core problem of spectrometers.

Keywords Spectrometer; Dispersion; Comparison

(Received Jan. 6, 2008; accepted Apr. 8, 2008)