

# 恒偏向“变束棱镜对”的分光

张 国 威

(北京工业学院工程光学系)

## 提 要

本文介绍一种新型棱镜分光系统,它应用变束棱镜角色散放大分光的原理,它比传统三棱镜分光的色散和分辨率高 $10\sim 10^2$ 倍。当用这种变束棱镜成对地组成分光系统时,在分光过程中,出射光与入射光方向间的偏转角保持不变。

关键词: 变束棱镜, 分光系统, 角色散, 恒偏向。

## 一、引 言

现有的各种棱镜光谱仪器中,色散分光棱镜都采用等腰或等边棱镜(简称三棱镜),其棱镜顶角 $A_0$ 一般为 $58^\circ\sim 63^\circ$ 。棱镜工作于最小偏向角 $e_{\min}$ 状态,出射角和出射束宽度近似等于入射角和入射光束宽度,即两侧光束基本对称,简称“等束棱镜”。这种棱镜没有角色散的放大作用。至今,所有棱镜光谱仪器中的分光棱镜,均是这种棱镜或它的变形型式,如自准直棱镜和云格—托隆棱镜<sup>[1]</sup>。由这种棱镜组成的分光系统,其总色散为单个棱镜色散的代数和,分辨率一般在 $10^3\sim 10^4$ 范围。为了增加色散和提高分辨率,通常是增加棱镜数目和加大棱镜尺寸。如苏制 ИСП-67 型大型棱镜摄谱仪,其分光系统是棱镜底宽为150 mm的六棱镜系统,理论分辨率也才达到 $1.4\times 10^5$ ,约相当于一台中型光栅光谱仪水平。

本文采用一种新型的分光棱镜,光通过它时,光束的宽度和发散角都将发生改变,因此称它为“变束棱镜”<sup>[2]</sup>。由这种棱镜组成的分光系统,具有角色散放大作用,其放大倍率可达 $10\sim 10^2$ 。因此,一台中型棱镜光谱仪,它的理论分辨率也能达到 $10^5$ 量级,而可与光栅分光相媲美。

## 二、变束棱镜色散放大分光原理

变束棱镜(如图1所示)的角色散公式为<sup>[2]</sup>

$$\frac{d\alpha_4(\lambda)}{d\lambda} = \frac{\sin \angle A}{\cos \alpha_2(\lambda) \cos \alpha_4(\lambda)} \cdot \frac{dn}{d\lambda}, \quad (1)$$

式中 $\angle A$ 为棱镜角, $(dn/d\lambda)$ 为棱镜材料色散率, $\alpha_4$ 为出射角, $\alpha_2$ 为入射面的折射角。如果棱镜工作在缩束状态(出射光束宽度小于入射光束宽度),这时有小角入射,大角出射,并假设 $\alpha_1=0$ 则(1)式变为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\alpha_4(\lambda)}{d\lambda} &= m \tan \angle A \frac{dn}{d\lambda}, \\ m &= \frac{\text{入射光束宽度}}{\text{出射光束宽度}} = \frac{D}{d}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

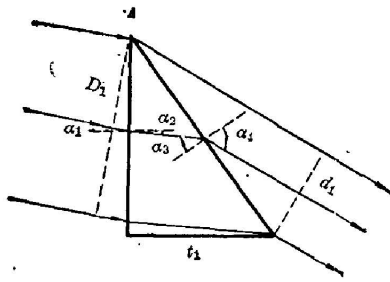


Fig. 1 VBP and its shrinking beam manner

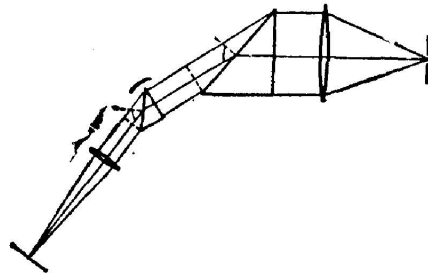


Fig. 2 A spectro-system consisting of two VBP ( $S_1$ —incident slit,  $S_2$ —exit slit,  $L_1$ —collimation lens,  $L_2$ —camera lens,  $P_1$  and  $P_2$ —VBP)

式中  $m$  称束宽比。在缩束状态工作时, 显然  $m > 1$ 。

对由两块这种变束棱镜  $P_1$  和  $P_2$  组成的分光系统, 如图 2 所示, 设棱镜间色散相长, 两棱镜的材料和棱镜角相同, 入射角  $\alpha_{21} = \alpha_{11} = 0$ , 则系统的角色散为<sup>[2]</sup>

$$\frac{d\alpha_{24}(\lambda)}{d\lambda} = (m_1 m_2 + m_2) \tan \angle A \frac{dn}{d\lambda}, \quad (3)$$

或

$$\frac{d\alpha_{24}(\lambda)}{d\lambda} = m_2 \frac{d\alpha_{14}(\lambda)}{d\lambda} + m_2 \tan \angle A \frac{dn}{d\lambda}, \quad (4)$$

式中  $m_1$  和  $m_2$  分别为两棱镜的束宽比, 这里  $m_1 = m_2 = m$ , 而  $m_1, m_2 = m^2 = (D_1/d_2) = M$ , 为系统总束宽比。

公式(4)中右边第一项表明, 棱镜  $P_1$  产生的角色散, 被棱镜  $P_2$  放大了因子  $m_2$ 。第二项为棱镜  $P_2$  自身的角色散。当分光系统由更多棱镜组成时, 如由  $N$  块棱镜组成, 这时每块棱镜产生的色散, 一方面不断地向后传递, 一方面还逐级累积地被放大。如果所有棱镜的材料和棱镜角都相同, 且棱镜间色散为相长的, 则系统的点角色散将是

$$\frac{d\alpha_{N4}(\lambda)}{d\lambda} = \tan \angle A \cdot \frac{dn}{d\lambda} \sum_{i=1}^N \prod_{j=i}^N m_j, \quad (5)$$

式中  $m_j = (\cos \alpha_{j1} / \cos \alpha_{j2})$ , 即束宽比。公式(5)表明, 累积的放大因子  $\sum_{i=1}^N \prod_{j=i}^N m_j$ , 其值远大于系统的总束宽比  $M = \prod_{j=1}^N m_j$ 。例如, 由四个变束棱镜组成的系统, 若每个棱镜  $m_j = 3$ , 总束宽比  $M = \prod_{j=1}^4 m_j = 3^4 = 81$ , 而  $\sum_{i=1}^4 \prod_{j=i}^4 m_j = 120$ 。因此相对单块棱镜来说, 有效的放大系数为 40, 而对普通的三棱镜, 仅为单棱镜色散的 4 倍, 相差 10 倍。如果进一步提高  $m_j$  值或增加棱镜数  $N$ , 有可能高二子数量级左右。

### 三、变束棱镜分光系统的理论分辨率

单变束棱镜的分辨率为<sup>[3]</sup>

$$R_1 = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = m_1 D_1 \tan \angle A \cdot \frac{dn}{d\lambda} = m_1 t_1 \frac{dn}{d\lambda}, \quad (6)$$

这里, 当  $\alpha_1 = 0$  时,  $t_1$  即为棱镜的底宽(见图 1)。而普通三棱镜的分辨率是

$$R_{01} = t_0 (dn/d\lambda), \quad (7)$$

$t_0$  也为棱镜的底宽。一般有  $t_0 > t_1 > (t_0/2)$ , 即使取  $t_1 = (t_0/2)$ , 如果  $m_1 = 4$ , 则  $R_1 = 2R_{01}$ 。

对多变束棱镜系统, 若限制入射光束宽度的棱镜  $P_1$  的高为  $D_1$ , 则同样可得到<sup>[3]</sup>

$$R_N = t_1 \cdot \frac{dn}{d\lambda} \sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^N m_j = \frac{R_1}{m_1} \sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^N m_j, \quad (8)$$

式中  $t_1$  为第一块棱镜  $P_1$  的底宽。而多一个三棱镜系统的分辨率仅为

$$R_{0N} = N \cdot t_0 \frac{dn}{d\lambda} = N \cdot R_{01}, \quad (9)$$

例如,  $N=4$ ,  $m_j=3$  时, 即使取  $t_1 = (t_0/2)$ , 仍有  $(R_4/R_{04}) = 20$ , 即为普通三棱镜组成的四棱镜系统分辨率的 20 倍。表 1 对照给出了上述两种四棱镜系统的角色散值和理论分辨率值, 棱镜材料都为 ZF-5 玻璃, 入射光束宽度  $D_1 = 90 \text{ mm}$ 。从表 1 可以看出, 在可见光谱区的长波段, 变束棱镜系统的角色散和理论分辨率, 比普通三棱镜系统大一个数量级左右; 而在短波段, 则相差两个数量级。

但一般的棱镜分光系统, 在工作过程中, 不仅要旋转每一个棱镜, 而且往往其偏转角也不恒定, 这给设计和使用都带来一定的困难。为此, 我们提出了多种由不同“变束棱镜对”组成的恒偏向分光原理。

Table 1 Angular dispersion and resolution values of a spectroscopy system consisting of four prisms

type	Variable beam prism		Normal dispersion prism	
	Angular dispersion (rad/nm)	resolution $R_4$	angular dispersion (rad/nm)	resolution $R_{04}$
766.5	$3.3 \times 10^{-3}$	$3.6 \times 10^5$	$4.8 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^4$
632.8	$5.2 \times 10^{-3}$	$4.5 \times 10^5$	$6.0 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^4$
587.6	$6.4 \times 10^{-3}$	$5.8 \times 10^5$	$6.7 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^4$
404.7	$9.4 \times 10^{-2}$	$8.2 \times 10^6$	$1.4 \times 10^{-3}$	$6.6 \times 10^4$

#### 四、恒偏向“变束棱镜对”分光

这种由一对变束棱镜组成的分光系统, 在分光过程中, 出射光相对于入射光方向的偏转角始终不变, 偏转角可恒为  $90^\circ$  (垂直), 或  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  (平行), 或其它的任意角度。

##### 1. $90^\circ$ 恒偏向“变束棱镜对”分光

这种系统的原理如图 3(a) 所示, 垂直入射到变束棱镜  $P_1$  上, 经棱镜折射后以出射角  $\alpha_{14}(\lambda)$  出射, 如果波长为  $\lambda$  的光又垂直投射到转向变束棱镜  $P_2$  上, 即可实现  $90^\circ$  的恒偏向出射。这里, 棱镜  $P_2$  可看成是一个由直角转向棱镜和普通变束棱镜组成的组合棱镜(如图中虚线所示), 它可由两块分离的棱镜组成, 也可加工成一整块。其中直角棱镜部分只起  $90^\circ$  转向作用, 不起色散分光作用, 而变束棱镜部分则有色散分光作用。如果两变束棱镜的材料相同(转向棱镜部分也可不同), 且棱镜角  $\angle A$  也相等(这时转向变束棱镜的组合棱镜

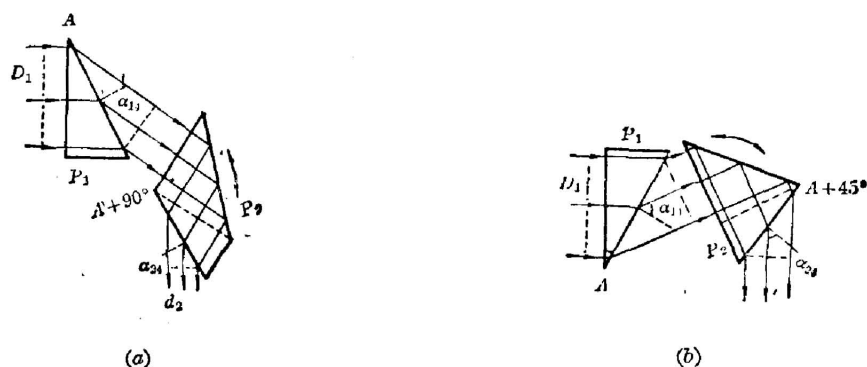


Fig. 3 Fixed 90°-derivation spectro-system of a VBP-pair

角应为  $90^\circ + \angle A$ ，容易证明，垂直入射到棱镜  $P_2$  上的某一波长的光，由  $P_2$  出射时，必垂直于棱镜  $P_1$  的入射方向。（证明略）

这种棱镜系统分光时，棱镜  $P_1$  保持不动，旋转棱镜  $P_2$ ，当某一波长的光满足入射角相同时，可实现对该波长的  $90^\circ$  恒偏向分光。顺时针旋转  $P_2$ ，光谱线向短波方向变化；逆时针则向长波方向。

图 3(b) 是另一种  $90^\circ$  恒偏向分光的设计方案，它与图 3(a) 的差别，除把棱镜  $P_1$  倒置之外，棱镜  $P_2$  的组合方式也有异，这时的组合棱镜角为  $45^\circ + \angle A$ ，而且对  $P_2$  来说，出射光与入射光之间的偏转角也为一锐角，我们称它为“锐角转向变束棱镜”；对比图 3(a) 方案， $P_2$  的组合棱镜角和偏转角都大于  $90^\circ$ ，则称“钝角转向变束棱镜”。

系统图 3(b) 在分光时，也只旋转棱镜  $P_2$ ，不过顺时针旋转是向长波方向变化，情况恰好与图 3(a) 相反。

2.  $0^\circ$  或  $180^\circ$  恒偏向“变束棱镜对”分光

如果由两个同样类型的转向变束棱镜组成的棱镜对（且材料和棱镜角相同），则没有方向偏转（图 4(a) 与图 4(b)）；如果由不同类型的转向变束棱镜所组成，则方向正相反（ $180^\circ$  恒偏向）。同样，以上棱镜对分光时，也只旋转棱镜  $P_2$ ，对图 4(a) 和图 4(c)，顺时针转向长波方向；而对图 4(b) 和图 4(d)，顺时针转则向短波方向。

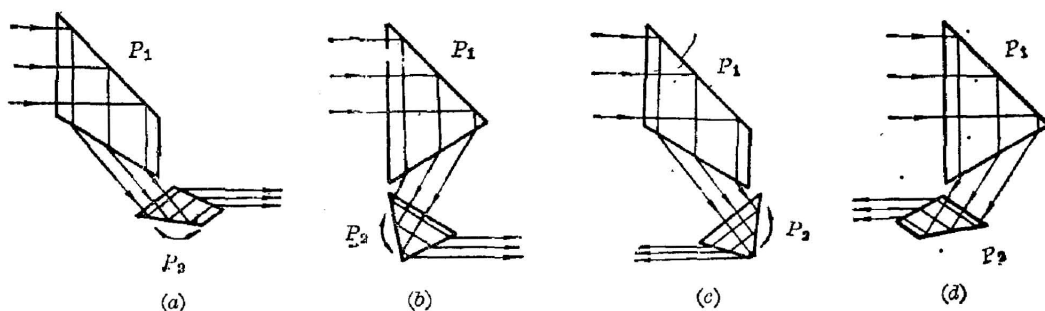


Fig. 4 Fixed direction spectro-system of a VBP-pair

3. 多“变束棱镜对”的恒偏向分光系统

上述各种“变束棱镜对”也是组成多变束棱镜恒偏向分光系统的基本单元，将两个不同或相同的棱镜对组合起来，可组成 36 种形式的四棱镜系统（图 5 仅为其中两个例子）。而对

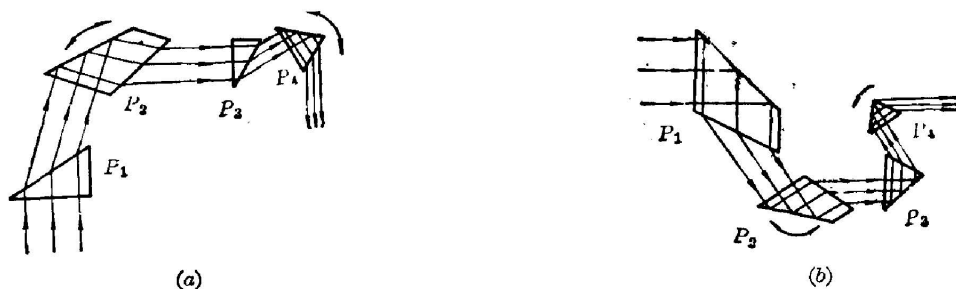


Fig. 5 Examples for fixed derivation spectro-system of multi-VBP-pairs

六棱镜系统,就有 216 种组合形式,等等。

这种系统不仅可以根据需要,组成不同恒偏向角的分光系统,而且还有一个重要的特性,分光时只要旋转每对棱镜中的第二个棱镜。如果所有棱镜用同样材料制成,且它们的棱镜角  $\angle A$  也相同(对转向变束棱镜,其组合棱镜角则分别加  $45^\circ$  或  $90^\circ$ ),这时只要同步旋转所有偶序数的棱镜以相同大小的角度,而与棱镜对数目多少无关,即可实现不同分辨率要求的分光,特别有利于产品的系列化。

当对这种系统再增加一个无色散的折射或反射,则可获得任意角度的恒偏向分光。

## 五、结论和讨论

### 1. 与普通三棱镜分光比较

(1) 理论分辨率高。原则上,  $m_j$  越大,  $N$  越多,则分辨率越高,但受光能损失和仪器尺寸的限制,一般取  $m_j = n \sim 3n$  (折射率),  $N = 2 \sim 8$ , 即  $1 \sim 4$  对为宜。

(2) 易加工,用料少,尺寸小。普通变束棱镜是一种小棱镜角 ( $< 45^\circ$ ) 的直角棱镜,加工方便。需要的料也少,而棱镜的尺寸又逐个缩小,不仅省料,也减少了仪器的大小和重量。

(3) 成象质量好。因照相物镜的相对孔径小,便于象差的校正。

(4) 分光机构通用性好。只要棱镜的有关参量相同,由任意数目棱镜对组成的系统,可用相同的分光机构。

(5) 恒偏向输出。偏转角可根据需要,随意选择。

### 2. 与光栅分光比较,有如下优点

(1) 理论分辨率相当。如一个四棱镜系统的分辨率 ( $> 3.6 \times 10^5$ ), 即使对  $1800$  (line/mm) 的光栅,必须有工作面宽为  $200$  mm 以上,也才能达到。而且在短波端则更有利。

(2) 光栅有光谱级重迭,特别对高刻线数光栅,自由谱区很小,而棱镜则没有此问题。

(3) 刻线光栅有可能出现假谱线,从而在实验时造成错误的判断。

(4) 照相物镜的象差校正,比光栅分光容易,而且相对孔径又小,就更容易。

(5) 光谱强度分布比较均匀。

(6) 比光栅便于保管和维护,适于在一般环境条件下工作。

因此,这种恒偏向变束棱镜对分光,有可能取代现有的三棱镜分光,而在某些应用范围,如紫外分光技术中,可与光栅分光媲美。

## 参 考 文 献

- [1] 吴国安;《光谱仪器设计》, (科学出版社, 1978)。  
[2] 张国威;《光学学报》, 1986, 6, No. 1 (Jan), 29~33。  
[3] 张国威; *CN Patent* 85109457 (1985)。  
[4] 张国威; *CN Patent* 86101835 (1986)。

**A fixed derivation spectro-sysctem of "Variable Beam Prism Pairs"**

ZHANG GUOWEI

*(Department of Engineering Optics, Beijing Institute of Technology)*

(Received 2 December 1986; revised 16 February 1987)

**Abstract**

This paper reports a new type of prism spectro-system, which is comparable to the grating. The adgular dispersion amplification of VBP (Variable Beam Prisms) is applied to this spectro-system, so that its dispersion and resolution are greater than that of normal prism spectro-system by 10-10<sup>2</sup>times. When the VBP is pair-wise set into a spectro-system, the derivation between the incident and exit beams is always fixed in operation.

**Key Words:** Variable beam prism (VBP); spectro-system; angular dispersion; fixed derivation.