

Semrock VersaChrome®

宽范围
可调滤光片

Ligang Wang
Turan Erdogan, Ph.D

索引

1. 介绍	3
2. 角度调节的薄膜滤光片	3
3. 其他类型的可调滤光片	5
4. VersaChrome [®] 可调滤光片独特	8
5. VersaChrome [®] 可调滤光片的应用	10
6. 结语	11
参考文献	12
作者	12

1. 介绍

薄膜滤光片由于具有很高的透射率（接近 100%），非常陡峭的光谱边缘以及在宽光谱范围内的高阻挡（OD 6 或更高），从而获得好的噪声抑制，因此是大多数光学系统中波长选择的理想解决方案。但是，直到现在，薄膜滤光片仅被视为“固定”滤光片，更改光谱特性需要切换滤光片。有一些机械装置可以执行滤光片切换，例如滤光片转轮，但这些装置通常尺寸较大，切换速度相对较慢（切换时间通常为 50 到 100 毫秒），并且它们仅能安装数量有限的滤光片（通常转轮包含 4 到 12 个滤光片位置）。因此，大小、速度和滤光方便性都受到限制。

当需要更高速度、更灵活的波长变化时，通常使用衍射光栅。光栅允许选择范围内的任何波长，并且由于仅需要旋转光栅，就可以相对的改变波长。因此，光栅是大多数扫描光谱测量系统的基础。但是，光栅不能提供很好的光谱辨别力 - 光谱边缘不是很陡，带外阻挡往往很差。基于光栅的系统还显示出对过滤的带宽控制不好。虽然可以调整带宽（通常通过调整机械缝隙的宽度），但边缘陡度会随着带宽的增加而降低。也许基于光栅的光谱仪器的局限性问题在于，至少需要一个空间维度才能以依赖于波长的方式散布光线，因此不可能直接用光栅来测量二维成像光束。

许多光学系统可从可调式滤光片中受益，可调式滤光片具有薄膜滤光片的光谱、二维成像性能特征，以及 CWL 调节速度和衍射光栅的方便性。液晶和声光可调滤光片和线性变量滤光片结合了其中的一些特性，但都不是理想的，并且都有其他限制。

Semrock 现在已经开发出一种新型光学滤光片技术：薄膜滤光片可以通过调节入射角（在很宽的波长范围内可调），而光谱性能基本上没有变化。目前有两类产品：具有可调式的带通滤光片和可调式的边缘滤光片。

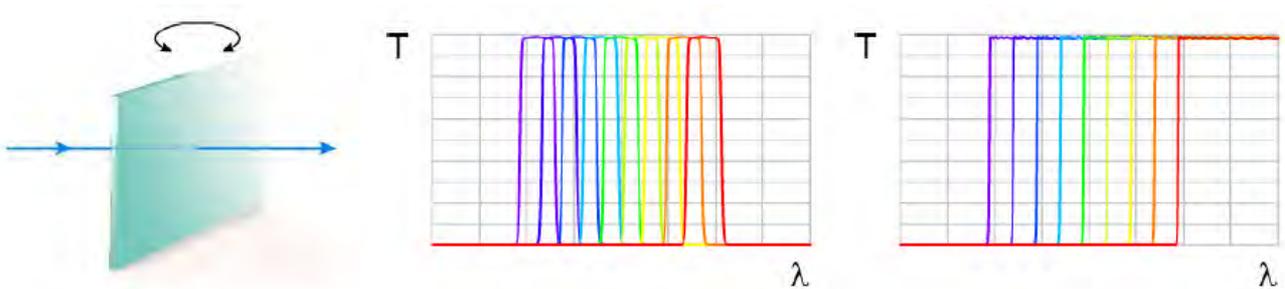
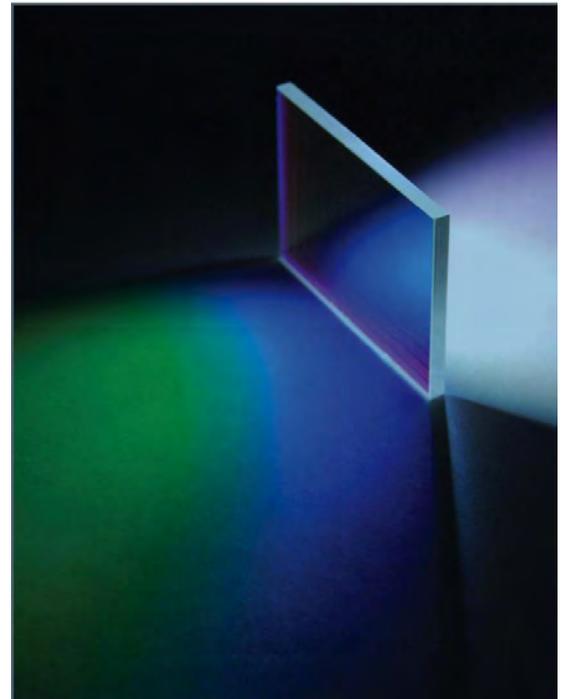


图 1：由于薄膜滤光片的角度调整（左图）而产生的可调带通（中图）和可调边通（右图）滤光片的图示。

2. 角度调节的薄膜滤光片

众所周知，当入射角（AOI）从 0° 增大到较大的角度时，任何薄膜干涉滤光片的光谱都会向较短的波长移动[1]。但是，总的来说，光谱在较大角度会变得高度失真，并且对于 S 偏振和 P 偏振光，其位移可能会明显不同，从而导致强烈的偏振依赖性。

在数学上，当光的在所述滤光片中的 AOI 从 0°（垂直入射）增加至更大的角度，所产生的波长偏移，通常相当准确地由以下等式所描述：

$$\lambda(\theta) = \lambda(0) \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{n_{eff}^2}} \quad (1)$$

其中 θ 为 AOI, N_{eff} 称为“有效折射率”, 它对于每种滤光片设计和两个正交的偏振态都是特定的。该效应已被用于在有限的波长范围内调节光学滤光片的光谱。

例如, 图 2 (左上方) 显示了设计用于在 561 nm 处提供窄通带 (约 2 nm) 的多腔法布里-珀罗 Fabry-Perot 薄膜滤光片的计算光谱。显示了 s 和 p 偏振的光谱, 并且 AOI 值为 0°、30°、45° 和 60°。请注意, 随着 AOI 的增加, 通带的 s 偏振变得很窄, p 偏振变得更宽。还要注意, p 峰的峰移动速度比 s 偏振的峰移动速度更快。结果, 在较高的 AOI 值下, 滤光片变得与偏振密切相关。对于此滤光片示例, 可用的调节范围 (在发生光谱过度失真之前) 约为 10 至 15 nm, 或约为起始波长的 2% 至 3%。

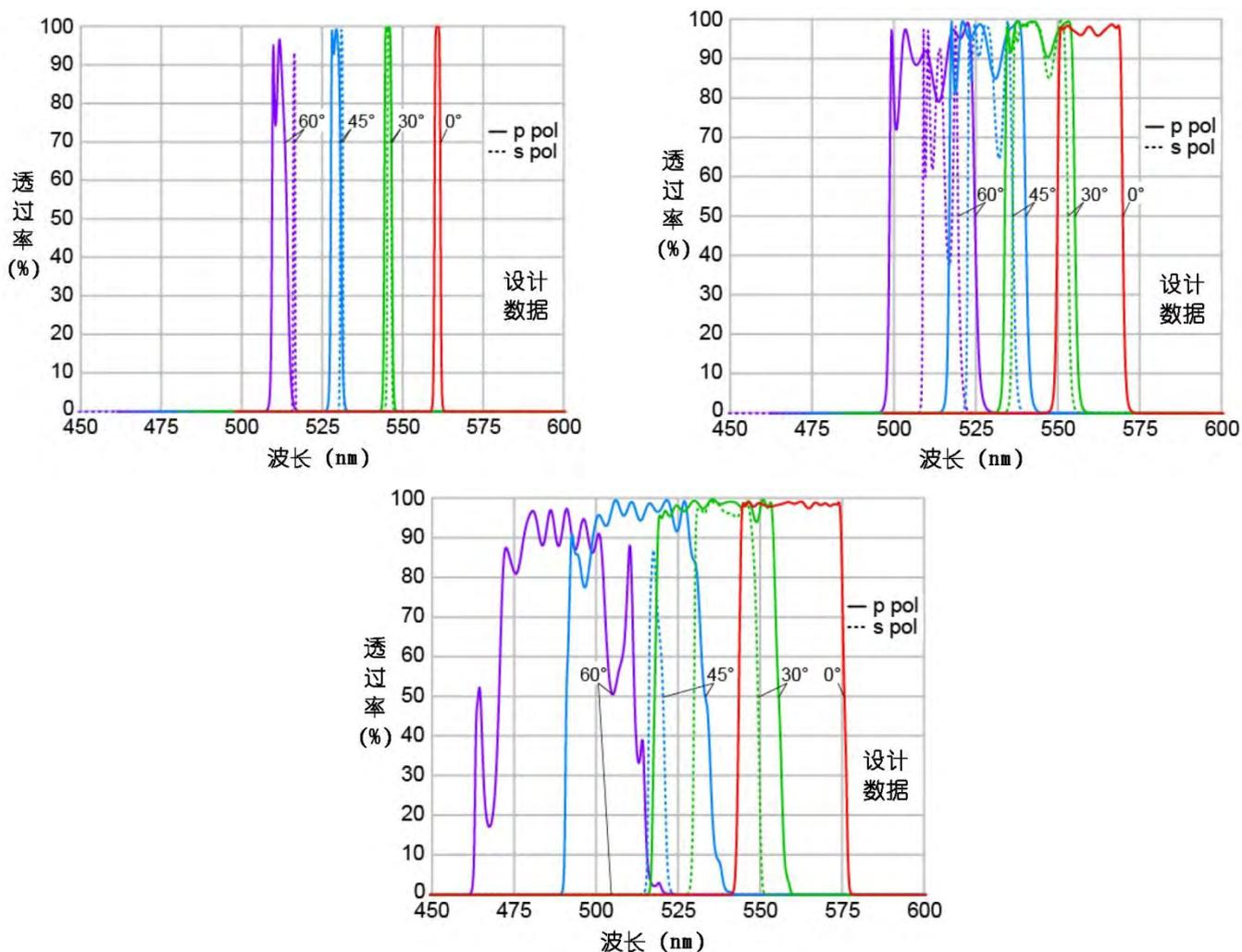


图 2 : (左上方) 窄带多腔 Fabry-Perot 薄膜滤光片 (FWHM ~ 2 nm) 的示例。(右上) 宽通带多腔 Fabry-Perot 薄膜滤光片 (FWHM ~ 20 nm) 的示例。(底部) 荧光带通薄膜滤光片的示例, 该滤光片由长波和短波边缘滤光片涂层 (FWHM ~ 35 nm) 组成。已计算所有光谱。

这种类型的滤光片用于光纤电信测试和测量以及系统应用的许多商用设备仪器中。这些设备的调节范围在 1550 nm 附近时约为 30 至 40 nm, 相当于起始波长的 2% 至 2.5%。

对于不涉及精确激光线或光纤电信的应用, 通常需要更宽的通带。图 2 (右上方) 显示了另一个多腔 Fabry-Perot 薄膜滤光片的示例, 该滤光片设计为具有大约 20 nm 的半高全宽 (FWHM) 的更宽的通带。该行为类似于较窄滤光片 (左上方) 的行为 - 光谱移至较短的波长, 在较高的入射角处变得越来越失真, 随着 AOI 的增加, 对于 S 偏振, 通带变得非常窄, 对于 P 偏振, 通带变得更宽, 并且 p 偏振的峰比 s 偏振的峰移动更快, 所有这些都导致在更高入射角下光谱越来越失真, 因此必须减小滤光片的可用调整范围。许多荧光成像和量化应用要求滤光片的宽度仍然更大 - 通常为 30 至 50 nm 或更大 (在可

见波长处)。对于这种更宽的滤光片，特别是对于涉及非相干光的应用，使用长波通和短波通边缘滤光片的组合来形成通带通常会更有效。边缘滤光片由“阻带”光谱区域的边缘形成，该“阻带”光谱区域是由高折射率薄膜层和低折射率薄膜层（大约四分之一波）叠层形成的。图 2（底部）显示了这种滤光片的示例。请注意，此滤光片在质量上与多腔 Fabry-Perot 类型的行为相似，但是随着 AOI 从法线入射（0 度）增加，频谱的失真会更大。实际上，对于 p 偏振光，通带纹波变得无法忍受，对于更高角度的光，s 偏振的通带完全消失（对于 AOI = 60°，甚至在该图中也不可可见）。因此，对于这种类型的滤光片，有用的角度调节范围仅为大约 10°至 15°，从而导致波长调节范围仅为大约 0.5%至 1%。

对于许多应用，使用非偏振光，因此平均偏振的滤光片光谱图更清楚地说明了实际的光谱性能。图 3（左）图 2 显示了与图 2 中所示的荧光滤光片相似的六个角度（从 0°到 60°）的平均偏振光谱。即使在 20°至 30°的角度处，光谱也高度失真，并且对于较大的角度几乎不可用。

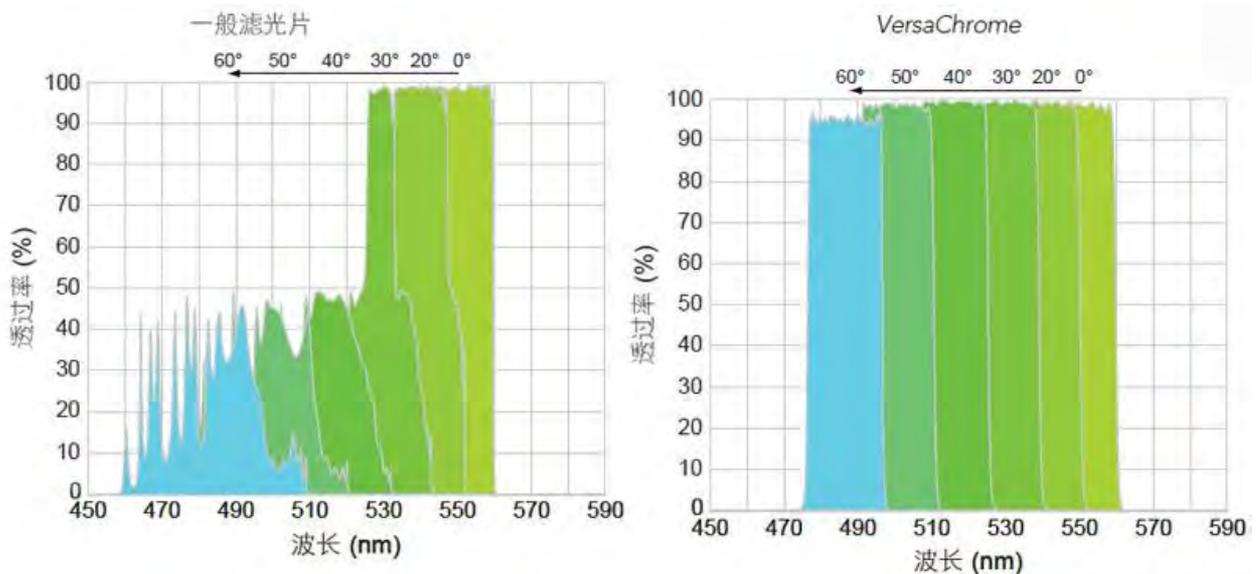


图 3：（左）荧光带通薄膜滤光片的示例，该滤光片由长波通滤光片和短波通滤光片镀膜涂层（FWHM - 35 nm）组成。显示了六个与平均偏振光相关的光谱，其角度范围为 0°到 60°。（右）显示了 Semrock VersaChrome 可调式滤光片，以进行比较。所有光谱被计算。相反，图 3（右）所示的类似 VersaChrome 带通滤光片的光谱在 0°至 60°的整个角度范围内均保持了高透射率、陡峭的边缘和出色的通带外阻挡。在第 4 节中，我们将说明如何实现这种性能。

3. 其他类型的可调滤光片

人们已经开发了多种不同的可调式滤光片技术。但是，所有这些趋向于都要求至少在某些关键性能特征上做出折中才能实现可调节性，因此需要对给定应用的每种方法的优势和局限性进行仔细分析。如上所述，衍射光栅提供了实现高速调节的方法之一，但是它们不能调节携带二维图像的光束。在这里，我们将讨论限于用于成像应用的可调滤光片，并简要回顾一下薄膜光片的三种替代方案。

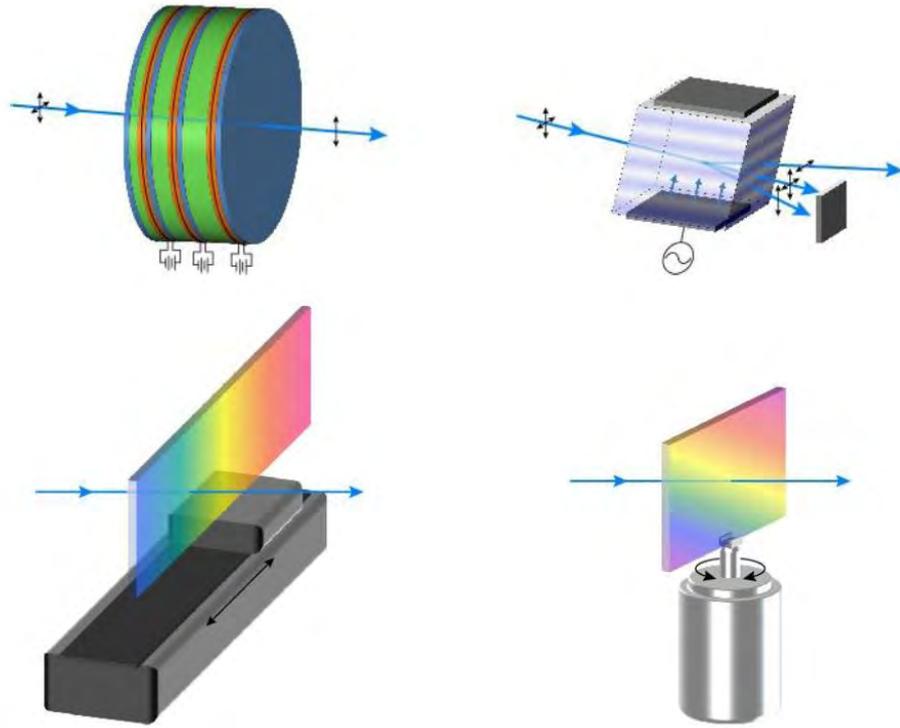


图 4：能够透射载有图像的光束的可调滤光片的示意图。（左上方）液晶可调滤光片；线性偏振片为蓝色，固定双折射板为绿色，液晶板为红色。（右上）声光可调滤光片；向晶体底部的声能转换器施加的 RF 电压会产生体积衍射光栅。（左下）线性变量滤光片；滤光片通过平台沿长轴平移来实现调节。（右下）Semrock VersaChrome 可调薄膜滤光片；滤光片的简单旋转（类似光栅）可实现高速调节。

液晶可调滤光片 (LCTF)：这种类型的滤光片基于 Lyot-Ohman 偏振干涉滤光片配置[2]，它是由线性偏振器隔开的一系列双折射晶体板（请参见图 4（左上））组成。该滤光片的每个“级”都会产生透射率与波长的正弦曲线变化，并且许多级的组合（每个级会产生具有不同频率的正弦曲线）会导致仅在一个波长（滤光片通带）上的整体传输特性的相长干涉。在液晶可调滤光片中，将双折射液晶板添加到每个部分中的固定双折射板中，以便通过施加光程来调节液晶双折射。这些板上的电压会改变发生相长干涉的波长，从而调整通带的波长。

液晶可调滤光片的优势也许是宽的调节范围-这些滤光片可以设计为调节 100 纳米以上的波长。特别是，滤光片可用于在整个可见波长范围 (<400 nm 至 > 700 nm) 内进行调节。像角度调节薄膜滤光片一样，它们具有大孔径和二维成像的能力。这些滤光片的主要缺点包括差的透过率、边缘陡度和带外阻挡、带宽固定以及低激光损伤阈值 (LDT)。而且，因为它们基于偏振，它们与偏振密切相关。实际上，它们仅透射线性偏振光，因此非偏振光的 Max 透射率为 50%。由于即使通过的偏振光的透射率也趋向于约 50%，因此所产生的非偏振光的总透射率通常不大于 25%。

声光可调滤光片 (AOTF)：这种滤光片的原理是基于体声波在由像二氧化碲 (TeO_2) 这样的单晶中传播的声切变波形成的体光栅上的衍射（见图 4（顶部）右）。波是由绑定到晶体的一侧的射频 (RF) 传感器产生的。光通过晶体传输，被分离成三个波，在不同（有角度的）方向上的每个行进：0 级非衍射光束，（线性）偏振，和衍射中的一个取向的衍射光束中的另一个光束（正交）偏振。未衍射光束包含所有波长，而由于体积全息图的衍射，衍射光束仅包含狭窄通带内的波长。为了将该装置用作滤光片，通常阻挡未衍射光束和偏振衍射光束之一，并且第二偏振衍射光束用于透射光。

AOTF 的优势主要在于其宽调节范围（像 LCTF 一样，它还能够调节 100 纳米以上的波长），以及高的调节速度（与 ms 级别或更高的切换时间相比，波长切换时间为 $10\mu\text{s}$ ）。缺点为不好的光谱表现，包括差的边缘陡度和频带外的阻挡，缺乏可调节的带宽以及小的孔径（通常 3 至 10 mm），这限制了成像应用的实用性。像 LCTF 一样，AOTF 仅使用线性偏振光，因此对于非偏振光应用，会损失 50% 的光。

线性可变可调滤光片 (LVTF)：线性（以及圆形）可变薄膜滤光片基于不均匀的薄膜层厚度变化的概念，该变化是沿着线性方向（对于线性可变滤光片）或围绕圆角方向的位置的函数滤光片（用于循环变

量滤光片)。结果, 滤光器的光谱特性随层的厚度成比例地在空间上变化。因此, 通过改变光束在滤光片上的位置-通过将光束移过滤光片或将滤光片移过光束的路径-可以确定边缘滤光片的边缘位置或带通滤光片的通带波长变化(请参见图 4 (左下))。LVTF 的有用配置涉及两个边缘滤光片-一个是长波通滤光片, 另一个是短波通滤光片-这样, 当它们转换时, 不仅可以调节 CWL, 而且可以调节所得带通滤光片的带宽。

LVTF 具有其他可调节薄膜滤光片的优点, 例如高透射率, 高激光损伤阈值和好的成像性能。另外, 由于光总是以 AOI 0° 入射, 因此对偏振可能不敏感。使用上述配置, 可以针对任何 CWL 调节带宽。缺点包括较差的光谱性能(边缘陡度), 由于跨非零宽度光束的光谱特性的变化, 以及由于需要机械平移滤光片而导致的调节速度缓慢。对于给定的系统, 可以优化有限的频谱性能(通过权衡较小的光束所产生的较低透射率或空间分辨率与较高的频谱分辨率), 但是在大多数实际系统中, 这种折衷是很重要的。

其他可调滤光片: 对于可调滤光片, 存在许多其他薄膜和非薄膜方法, 它们可以从二维成像光束中选择波长带, 包括: 大块 Sagnac、Mach-Zehnder 和 Michelson 型干涉仪、法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 干涉仪和具有有源可调层和/或基片的薄膜滤光片, 或通过应力光效应通过机械诱导的光学特性变化进行调节的薄膜滤光片[3]。干涉仪往往涉及不适合许多应用的大型复杂和昂贵的仪器, 而由于材料和/或工艺的限制, 有源可调薄膜滤光片的方法尚未表现出实用的性能。表 1 比较了此处描述的不同方法的优缺点。显著的限制或优势用红色和绿色突出显示。

特性	液晶可调 (LCTF)	声光可调 (AOTF)	线性可变 (LVTF)	角度调节薄膜	Semrock Versachrom
高透过率	■	○	■	+	■
“顶帽”带宽形状	-	-	○	+	■
陡峭光谱边缘	■	■	■	+	■
高带外阻挡	■	■	+	+	■
整个波长范围内的稳定带宽	-	-	+	○	+
可调的带宽	■	■	■	-	■
宽的调节范围	■	■	+	-	○
可达任意波长	+	+	+	+	+
快的调节速度	-	■	■	+	+
二维图像成像能力	+	-	○	+	+
出色的成像调制传输功能 (MTF)	○	○	+	+	+
大的通光孔径	+	■	○	+	+
偏振不敏感	■	■	■	-	■
宽的视角范围	+	-	-	-	-
高激光损伤阈值 LDT	■	+	■	+	■
高环境牢靠度/重复度	+	+	+	+	+
小的物理厚度	-	-	+	○	○
低的能量损耗	○	+	○	○	○

表 1: 几种可调滤光片类型的属性比较。在表中, “+”表示光片类型相对于所需属性可以提供非常好的性能, 而“-”表示可以提供良好的性能, 而“-”表示可以提供有限的性能或较差的性能。

4. 为什么 VersaChrome 可调滤光片独特?

如图 5 中的示例 (右) 所示, VersaChrome 滤光片在大于 60° 的很大角度范围内仍可保持较高的透射率, 陡峭的边缘和出色的带外阻塞。本发明的核心是 Semrock 发明的一种制造高入射角陡边缘滤光片的方法, 该方法基本上没有偏振分离, 并且两个偏振的边缘陡度几乎相等。而且, 值得注意的是, 这些特性适用于各种角度。结果, 有可能在整个角度范围内调节这些滤光片, 而频谱的特性几乎没有变化, 而与光谱偏振态无关。光线穿过滤镜。实际上, Semrock 的 VersaChrome 系列滤光片的额定调节范围至少是垂直入射时滤光片边缘或中心波长的 12% !

图 5 (顶部) 显示了 VersaChrome 带通滤光片在 4 种不同 AOI (从 0° 到 60°) 范围内的两种光偏振的计算光谱。光谱证明在垂直入射时能够调节约 555 nm 至 490 nm 或 CWL 的约 12% 的能力, 同时在整个调节范围内, 无论偏振如何, 都保持高透射率和陡峭边缘。该滤光片的 FWHM 带宽约为 30 nm, 并且带宽在整个调节范围内保持恒定。

图 5 (左下图) 显示了该滤光片在从 0° 到 60° 的六个不同入射角以及每个角度的两个偏振态下的实际测量光谱。该滤光片是使用 Semrock 先进的 IBS 离子辅助离子束溅射技术和专有的光学监测工艺制造的。因此, 所得的硬涂层滤光器显示出高透射率以及优异的环境牢靠性和光学耐久性。使用 Perkin Elmer Lambda 950 商业分光光度计测量光谱, 分辨率设置为 0.1 nm。在使用的配置中, 滤光片上的光束不能完全准直; 锥半角 (CHA) 约为 2.5° 。这个角度范围解释了随着 AOI 增加。准直光的实际边缘陡度保持相对恒定, 但是当使用覆盖 5° 角度范围的探测光测量滤光片时, 会出现平均效应, 导致明显变陡的边缘, 就像滤光片被测量时一样在分光光度计上具有更宽的波长分辨率设置。

为了说明这种效果, 图 5 (右下图) 显示了该滤光片的计算光谱, 假设探测器光的 CHA 为 2.5° 。这些光谱显示出与测得光谱上几乎相同的边缘陡度值。

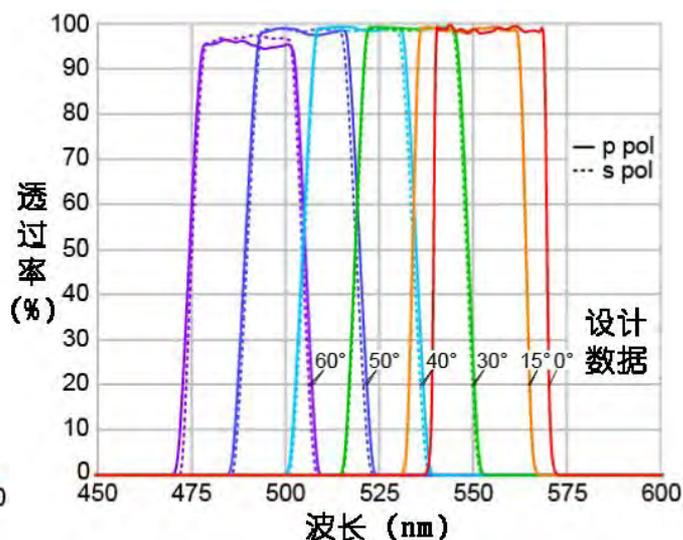
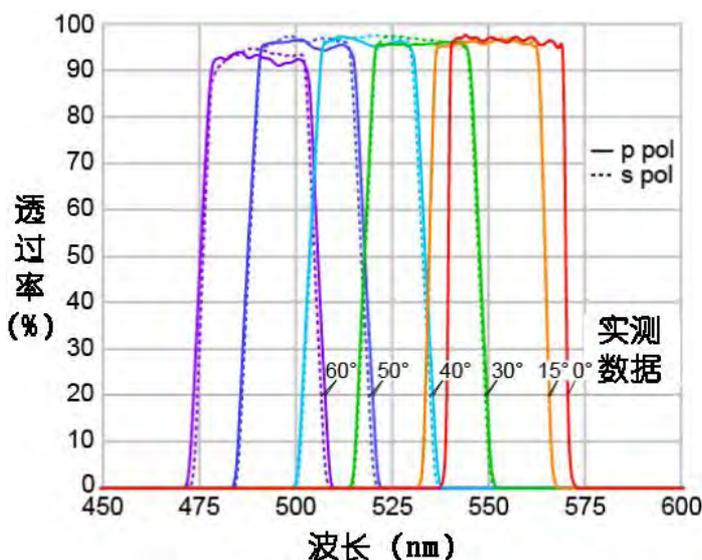
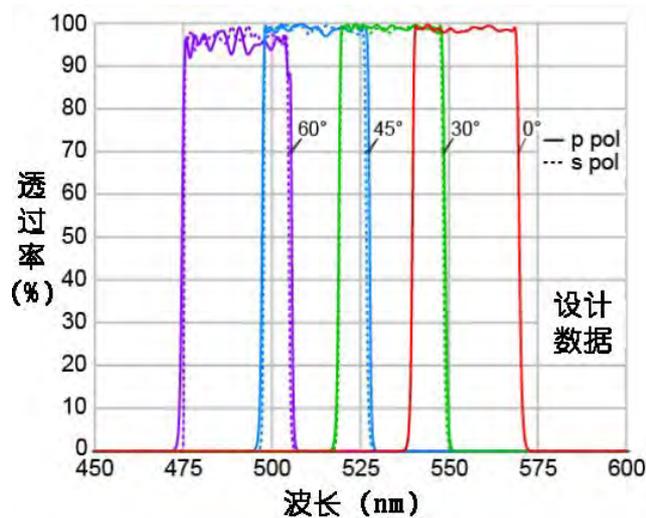


图 5: 自定义 VersaChrome 可调带通滤光片的示例。(顶部) p 和 s 偏振的 AOI 在 0 至 60° 范围内的计算光谱。(左下) 使用市售分光光度计测量的实际光谱, 分辨率为 0.1 nm, 锥半角 (CHA) 为 2.5°。(右下) 假设 CHA 为 2.5°, 则同一滤光片的计算光谱, 表明在较高角度明显减小的边缘陡度是非准直光的伪影。

对于给定的角度变化, 或者为了更好的调整滤光片的速度, 使给定角度的变化的波长变化尽可能大 (等效于使 N_{eff} 在调整方程中尽可能小)。该速度是有益的, 因为惯性限制了滤光片在给定时间内可以旋转给定的速度。例如, 振镜扫描仪可以在较小的角度范围内更快地运行。但是增加的波长对角度灵敏度降低了由非零角度范围构成的真实光束的光谱分辨率 (例如, 边缘有多陡峭)。基于激光的光学系统通常在系统中具有非常良好地准直光的区域 (通常少于几个毫弧度)。但是, 对于大多数成像系统, 光线角度范围通常至少为 $\sim 2^\circ$ 或更大。在荧光显微镜下, 物镜与镜筒之间的准直空间 (发射滤光片所在的位置) 中的 CHA 大约受相机传感器的半对角线与镜筒焦距之比的正切限制。因此, 例如, 一个 $1,000 \times 1,000$ 像素照相机用 10 微米像素间隔 (半对角线的 $\frac{1}{2} \times \sqrt{2} \times 1000 \times 10 \mu m = 7.1 \text{ mm}$) 在一个具有 200 毫米焦距管透镜显微镜具有反正切的 $(7.1 / 200) = 2.0^\circ$ 的 CHA。

有效折射率不能任意调整—尽管设计方便性很小，但它受到滤光器高折射率和低折射率薄膜层所用材料的选择的强烈限制图 6（左）显示光谱绿到蓝 Semrock 目录（TBP01-550 / 15）中有现货供应 VersaChrome 滤光片。图 6（右）中的图显示了该滤光片的调式曲线。蓝色曲线表明 CWL 遵循上面公式（1）的熟悉形式，并且对应于约 $n_{eff} = 1.85$ 的有效折射率。绿色曲线表明，FWHM 带宽在整个调式范围内保持恒定在约 20 nm。 n_{eff} 的值对于许多应用程序是好的，并且与其他目录 VersaChrome 滤光片相似。

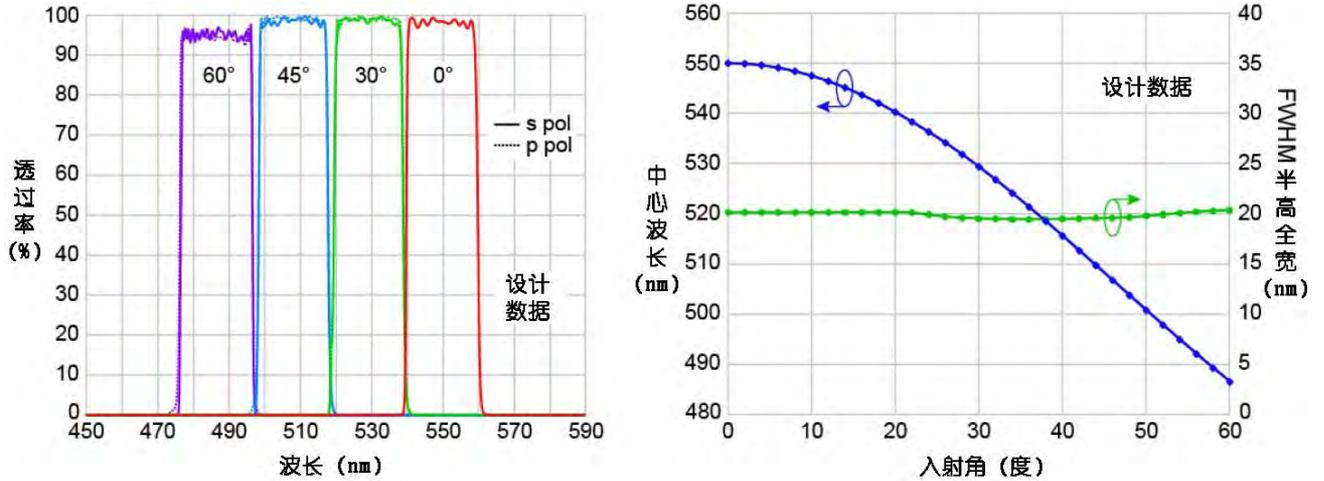


图 6: TBP01-550 /15 滤光片的 s 偏振和 p 偏振在几个大角度的（左）透射光谱—注意几乎不存在偏振相关性。（右）此滤光片的 CWL 随入射角的增加而移动；Max 半宽（FWHM）带宽固定为 20 nm。

图 7 显示了标准目录 VersaChrome 滤光片的光谱，说明需要五个滤光片即可覆盖整个可见光谱。

5. VersaChrome 可调滤光片的应用

VersaChrome 可调薄膜滤光片在以下领域具有广泛的潜在用途：荧光显微镜和其他荧光成像和定量应用，光谱成像，高通量光谱学和电信。

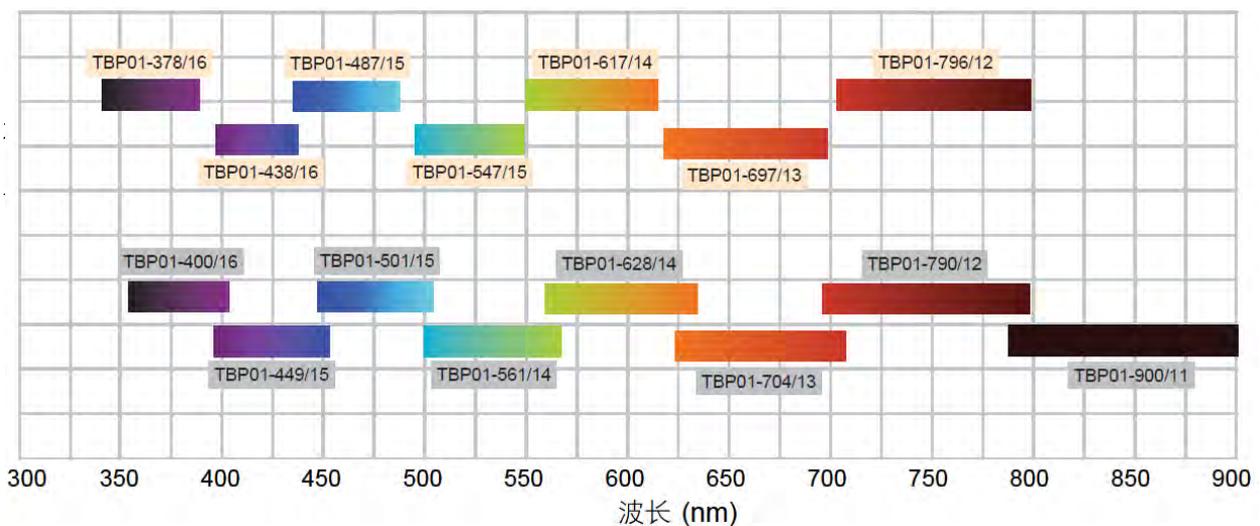


图 7: 五个 Semrock VersaChrome 滤光片在 0°，30°，45°和 60°处的光谱（仅 TBP01-440 / 16）。当从 0°调式到 60°时，每个滤光器都能调式到垂直入射 CWL 的 12%以上（在零件号中指示），在整个调式范围内，带宽保持固定在 20 nm。需要五个滤光片即可覆盖整个可见波长范围。

在荧光显微镜和其他荧光测量中，滤光片对于控制激发和发射光的光谱至关重要。滤光片可以使样品仅“看见”标记有荧光团的吸收带内的光，并且检测器只能“看到”发射波段内的光。如果没有滤光片，检测器将无法从散射的激发光（特别是在发射带内）中区分出所需的荧光，并且无法从样品、基板和系统中的其他光学器件中区分出自发荧光。要在弱信号实验中实现好的测量速度、灵敏度以及信噪比，以实现清晰的信噪比和辨别力，都需要对光学滤光片光谱进行筛选，尤其是在尝试区分标记有明显但重叠的多个成分时荧光团。通常，仅由于以下事实，成功分离荧光发射光谱会失败：仪器未配备好的过滤器。可调滤光片克服了这个问题，同时在更改实验或给定实验中的条件时实现了大的仪器方便性，甚至实现了实时优化。

光谱成像的应用领域多，从用于地球资源的遥感到医学成像，农业分析，法医，制造等。例如，遥感分析多年来采用光谱成像研究如何太阳的光从地球表面和在大气中的散射。对卫星图像数据集中存在的频谱频率进行详细分析后，可以得出不同的物体，风景，以及要区分和表征的地形。光谱成像技术是指捕获一系列二维图像，每个二维图像处于不同的波长，从而导致数据的“图像立方体”，其中每个体积像素（或“体素”）都包含与两个空间维度和一个波长。通常，光谱成像是通过“蘑菇”图像捕获技术实现的，其中连接到光栅光谱仪的二维 CCD 阵列捕获沿 CCD 的一个轴具有一维空间信息而沿另一轴具有光谱信息的单个帧。然后沿着另一个空间轴扫描系统（当飞机飞越飞机上方时自然发生），例如地球，以便每个连续的帧捕获随时间移动的新的空间信息行。但是，可以使用传输二维成像光束的好的可调光学滤光片来实现通常更理想的捕获模式，其中每个帧捕获二维空间信息（通常受益于需要更多像素的高分辨率），而较低分辨率的光谱测量会随时间移动。

近年来，基于光谱成像的卫星成像方法已被类似地应用于生物样品的光谱核型分析、共振能量转移、共定位、染色组织分析和自体荧光消除。在大多数情况下，多重标记实验中的发射光谱重叠太多，无法清晰地“看到”标记。光谱成像与一类称为“线性分解”的数学算法相结合，可以用于对直接数据进行后处理，并获得清晰地分离出不同成分的图像，从而不仅找到了生物学相关目标的精确位置，而且还有关它们之间相互作用的信息。随着现代计算机的速度和计算能力的提高，这种后处理甚至可以几乎实时地完成。

可调式光学滤光片还可以实现简单，紧凑的光谱测量系统，尤其是在光通量比光谱分辨率更重要的情况下。可调滤光片是光纤电信系统中的重要元素，无论是出于测试还是测量目的，因为它们都有可能通过创建“波长敏捷性”来大大简化已安装系统中波长辨别组件的复杂性。

6. 结语

VersaChrome 现在通过调整入射角而基本不改变光谱性能，现已使薄膜带通和边缘滤光片成为可能，该滤光片可在很宽的波长范围内进行调式。结果，许多光学系统现在可以从可调滤光器中受益，这些滤光器具有薄膜滤光器的光谱和二维成像性能特征以及 CWL 调式速度和衍射光栅的方便性。

参考文献：

- [1] Optical Waves in Layered Media, Pochi Yeh, Wiley, New York, 1988, Section 7.6.
- [2] Ibid., Section 10.1.
- [3] See, for example, “Tunable thin-film filters: review and perspectives,” M. Lequime, Proc. SPIE, Vol. 5250, pp. 302-311, 2003 (C. Amra, N. Kaiser, H. A. Macleod, Eds.).

作者：

Turan Erdogan博士是IDEX Corporation的子公司Semrock, Inc.的联合创始人兼首席技术官，而Ligang Wang是首席光学工程师。电子邮件：terdogan@idexcorp.com；电话：（585）594-7001；传真：（585）594-7095

翻译：

Wang Qi