

光无源器件技术综述

万助军

摘要：光无源器件是光纤通信中不可或缺的部分，本文综合介绍各种光无源器件技术原理、特点以及部分工艺考虑，内容包括高斯光束能量耦合、光纤头的 8° 减反射角、光纤准直器设计等单元技术和光纤连接器、晶体光学器件、波分复用器、光开关等器件技术，希望对从事光无源器件设计和制造的工程师有参考作用。

关键词：光无源器件，准直器，隔离器、环形器、光开关、FBT

一、 绪言

适应信息社会对通信容量的要求，光纤通信已经取代电子通信。低损耗光纤、半导体激光器和掺铒光纤放大器是使光纤通信成为可能的三个关键因素，而DWDM+EDFA使光纤通信容量得到空前扩展。在光纤通信系统中，各种光无源器件扮演着不可或缺的角色，本文将综合介绍各种光无源器件技术原理及特点^[1]。

下文的组织结构是，第二部分介绍光无源器件中用到的基础知识和单元技术；第三部分对光纤连接器的一些特性进行分析；第四部分介绍各种晶体光学器件的结构、原理和发展情况；第五部分介绍波分复用器的原理和结构；第六部分介绍各种光开关的原理、结构和特点；第七部分介绍各种光衰减器的原理、结构和特点；第八部分介绍光纤熔融拉锥器件的基本原理和各种具体器件的实现方式；第九部分为全文总结。

需要说明的是，限于本文作者的知识水平和研究经历，对某些技术有较深入的分析，如光纤头、光纤准直器、光纤连接器、光隔离器、光环形器、Filter 型波分复用器和光纤熔融拉锥器件等，对某些技术则大致介绍结构和原理，如 Interleaver、光开关和可调光衰减器等，这些都是为了聊补本文的完整性，以顶住光无源器件技术综述这顶帽子。考虑本文的读者对象是从事光无源器件设计和制造的工程师，作者尽量少用复杂的公式，但在某些场合，公式有助于理解问题和说明一些重要结论，因此本文中仍出现多达 50 个公式。

一.基础知识和单元技术

1. 高斯光束的能量耦合

在尾纤为单模光纤的光无源器件中，光束可用高斯近似处理，器件的耦合损耗可用高斯光束之间的耦合效率进行分析。两束高斯光束之间的能量耦合效率，取决于二者的光场叠加比率，可用（1）式计算^[2-4]。

$$T = \frac{\left| \iint E_1 \cdot E_2^* dx dy \right|^2}{\iint |E_1|^2 dx dy \cdot \iint |E_2|^2 dx dy} \quad (1)$$

两束高斯光束之间的耦合，可能存在三种失配模式：径向失配 X、轴向失配 Z 和角向失配 θ ，如图 1 所示。耦合失配造成光场重叠误差，从而影响耦合效率，根据（1）式计算得到耦合损耗与各种失配量之间的关系如图 2 所示，其中取光束束腰半径分别为 200um 和 5um 作对比，分别对应一般准直器和光纤的模场半径。束腰半径为 200um 的高斯光束，对角向失配比较敏感，对径向失配次之，对轴向失配则有较大容差；束腰半径为 5um 的高斯光束，对轴向失配比较敏感，对径向失配次之，对角向失配则有较大容差。

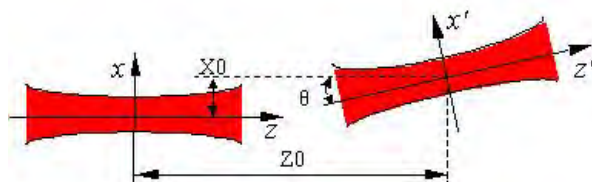


图 1.高斯光束的耦合失配情况

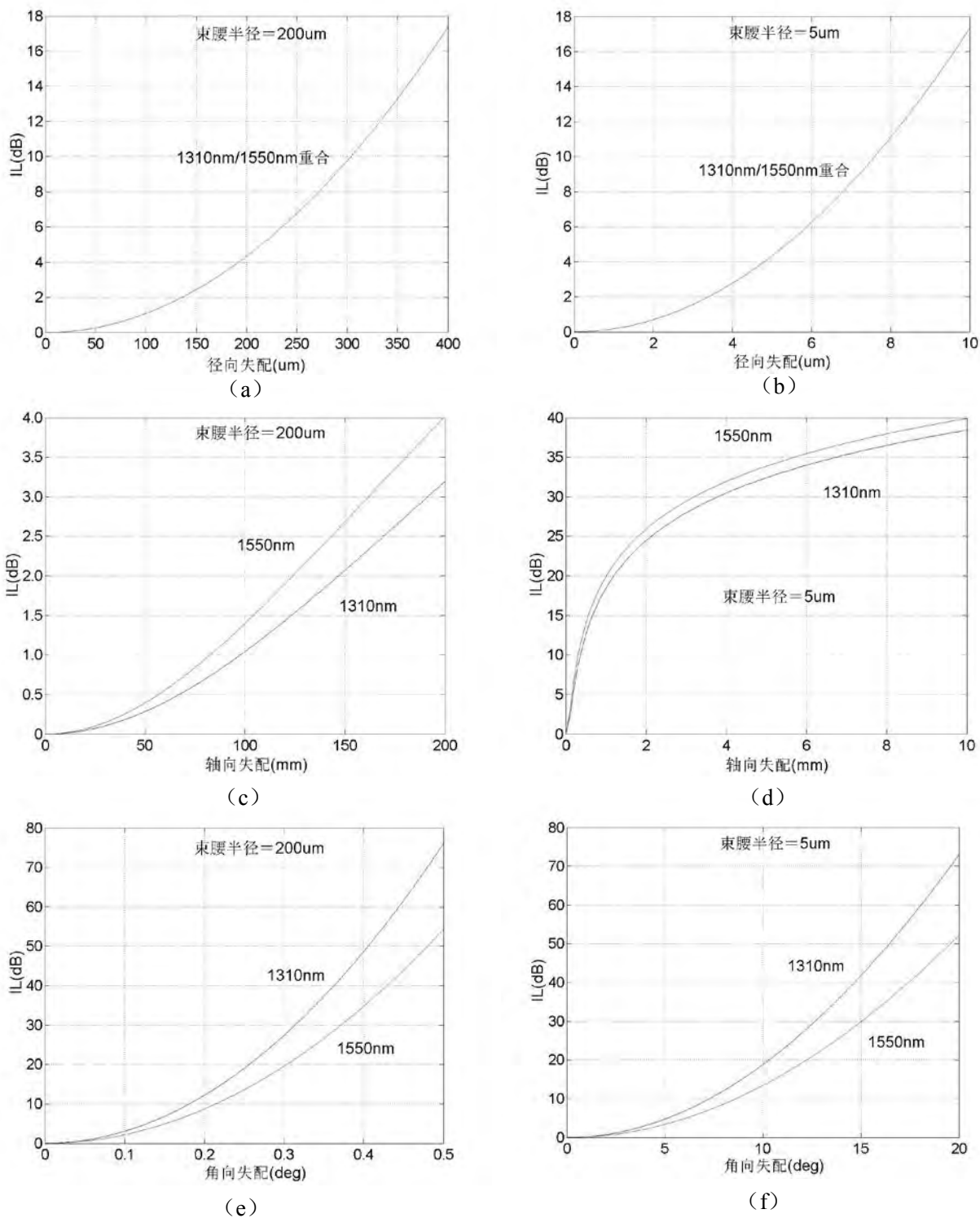


图 2. 两高斯光束耦合损耗与各种失配量之间的关系

2. 光纤头的 8 度减反射角

为了避免光器件中的反射光对通信系统造成影响，一般将光纤头的端面研磨成一定斜角以减少反射光^[2]。此端面斜角的选择依据是在保证回波损耗满足要求的情况下，尽量取小角

度以减少对插入损耗的影响。光纤端面研磨成一定斜角之后，回波损耗可视为反射光束与正向传输光束之间的耦合损耗，从图 2（f）可以看到，不同波长的光其回波损耗不同，但并非如图 2（f）所示差异那么大。这是因为，在角向失配量相同情况下，波长越短则耦合损耗越大，光束束腰半径越大则耦合损耗越大，而在光纤中波长越长则模场半径越大，因此两种因素稍微抵消。

下面我们取康宁公司的 SMF-28 型光纤作分析，其 1310nm 和 1550nm 的模场直径分别为 9.2 μ m 和 10.4 μ m，根据公式（1）计算得到两波长的回波损耗与端面角度关系如图 3 所示。当端面角度为 8 度时，1310nm 和 1550nm 光的回波损耗分别为 40dB 和 36dB，前者约比后者大 4dB；在端面未镀增透膜情况下，只有约 4% 的光反射回去，增加回波损耗 14dB，总回波损耗分别为 54dB 和 50dB；镀增透膜之后，剩余反射率<0.25%，增加回波损耗 26dB，总回波损耗分别为 66dB 和 62dB，选择 8 度斜角基本可以保证回波损耗大于 60dB。

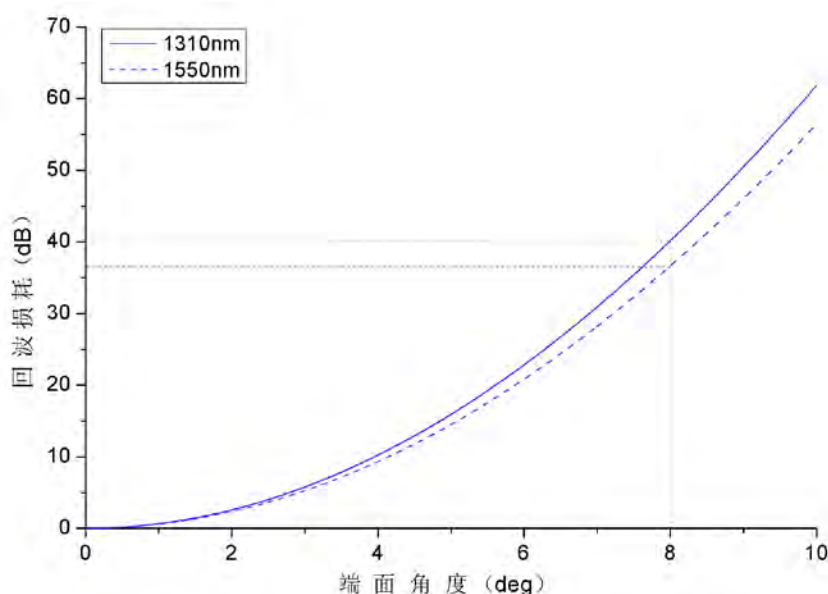


图 3. 光纤头回波损耗与端面角度的关系

当然，以上计算方法可能存在几个 dB 的误差，而且各种单模光纤的模场直径也存在差异，增透膜的实际剩余反射率也不尽相同，因此光纤头的实际回波损耗可能与以上计算结果存在一些差异，但实际证明选择 8 度斜角基本可以保证回波损耗大于 60dB。

3. 光纤准直器

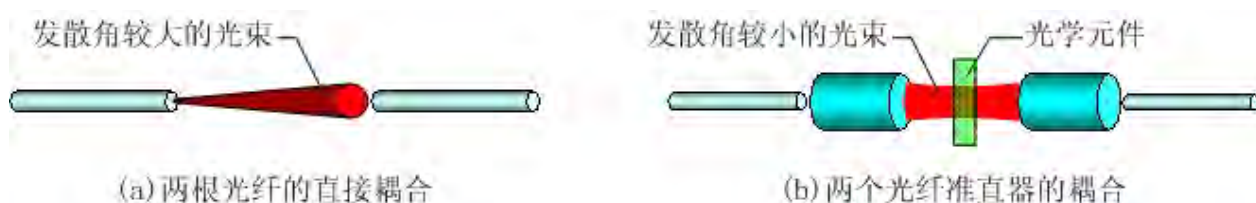


图 4. 光纤之间的耦合与光纤准直器之间的耦合情况

在自由空间型的光无源器件（如光隔离器、光环形器、光开关等）中，输入和输出光纤端面必须间隔一定距离，以便在光路中插入一些光学元件，从而实现器件功能^[4]。从光纤输出的高斯光束（实际为近高斯光束，可以高斯光束近似处理），束腰半径较小而发散角较大，两根光纤之间的直接耦合损耗对其间距极其敏感，光纤准直器扮演这样一种功能，将从光纤输出的光准直为腰斑较大而发散角较小的光束，以增加对轴向间距的容差，如图 4 所示，从

图 2 (c) (d) 亦可看出准直器对轴向容差的改善。

1) 光纤准直器的结构和参数

光纤准直器的结构参数如图 5 所示，因光纤头端面的 8 度斜角，造成输出光束与准直器轴线存在夹角 θ ，称为点精度。图 6 所示为两准直器的理想耦合情况，二者的输出光场完全重合，其间距为准直器的工作距离 Z_w 。准直器输出高斯光束的束腰距离其端面 $Z_w/2$ ，束腰直径为 $2\omega_t$ ，而高斯光束的发散角与其束腰直径成反比关系。到此我们介绍了光纤准直器的三个主要参数：工作距离、点精度和光斑尺寸。

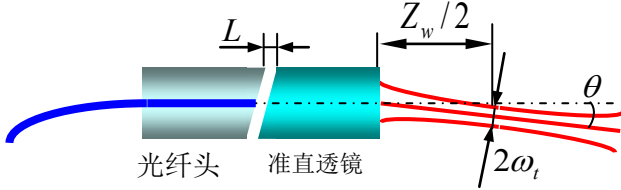


图 5. 光纤准直器的结构和参数

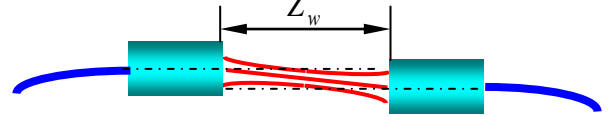


图 6. 两准直器的理想耦合情况

2) 光纤准直器的设计方法

光纤准直器的基本原理是，将光纤端面置于准直透镜的焦点处，使光束得到准直，然后在焦点附近轻微调节光纤端面位置，得到所需工作距离，因此准直器的工作距离与光纤头和透镜的间距 L 相关。光纤准直器的设计方法是，根据实际需求确定准直器的工作距离，依据高斯光束传输理论，确定光纤头和透镜间距 L 并计算光斑尺寸，然后依据光线理论计算准直器的点精度。具体设计步骤如下：

- a) 确定所需工作距离 Z_w ；
- b) 列出从光纤端面至输出光束束腰位置的近轴光线传输矩阵；
下面以 Grin-Lens 准直器为例：

$$\text{光纤头与透镜间隙: } \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{Grin-Lens: } \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\sqrt{A}Z) & \frac{1}{n_0\sqrt{A}}\sin(\sqrt{A}Z) \\ -n_0\sqrt{A}\sin(\sqrt{A}Z) & \cos(\sqrt{A}Z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{透镜端面至光束束腰: } \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_w/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{总传输矩阵: } \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

- c) 列出输出光束束腰位置的 q 参数；
我们知道，高斯光束的传输可用 q 参数及 ABCD 法则来描述，如 (6) 式和 (7) 式所示：

$$\frac{1}{q_i(z)} = \frac{1}{R_i(z)} - j \frac{\lambda_0}{\pi \omega_i^2(z)} \quad (6)$$

$$q_{i+1}(z) = \frac{Aq_i(z) + B}{Cq_i(z) + D} \quad (7)$$

一般考虑光纤端面高斯光束的模场半径为 ω_0 且波面曲率半径为 $R_0 = \infty$ ，因此光纤端面的 q 参数为：

$$\frac{1}{q_0} = -j \frac{\lambda_0}{\pi \omega_0^2} \quad (8)$$

根据 ABCD 法则，输出光束束腰位置的 q 参数为：

$$q_3 = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D} \quad (9)$$

d) 确定光纤头与透镜间距 L ；

在输出光束束腰位置，波面曲率半径为 $R_3 = \infty$ 即 $1/q_3$ 的实部为 0：

$$R_e \left[\frac{1}{q_3(L)} \right] = 0 \quad (10)$$

纵观以上推导过程， q_3 中只包含一个变量 L ，因此可依据（10）确定间距 L 。

e) 计算光斑尺寸和点精度；

根据确定的间距 L ，可由 q_3 计算光斑尺寸：

$$\omega_t = \sqrt{\frac{\lambda_0}{\pi \cdot \left| \operatorname{Im} \left[\frac{1}{q_3(L)} \right] \right|}} \quad (11)$$

点精度可用光线追迹的方式计算，此处不赘述。

光纤准直器常用 0.23 节距的 Grin-Lens，就是为了能够通过微调间隙 L 而得到不同工作距离的光纤准直器，C-Lens 的长度选择，也应作类似考虑。

3) 光纤准直器的分析和比较

Grin-Lens 最早用于光纤准直器的准直透镜，NSG 公司是最早的供应者，目前国内的上海中科光纤通讯器件有限公司、西安飞秒光电科技有限公司和西安同维通信技术有限公司均能供应 Grin-Lens。CASIX 公司的罗勇将 C-Lens 引入光纤准直器，因成本优势而得到顾客欢迎。

前面已经提到，准直器的工作距离与光纤头和透镜间距 L 相关，增加间距 L 可增加工作距离，但是对一个确定的准直透镜，工作距离不能无限增加。当光纤端面在透镜焦点附近调节时，光斑尺寸变化较大，然而将光纤端面置于透镜焦点上（此时工作距离接近 0），计算所得光斑尺寸仍有参考作用，有助于估算确定的透镜参数所能得到的光斑尺寸。点精度随光纤头位置变化不大，取间距 L 等于透镜焦距所得点精度可作为其他情况的近似。

下面针对 Grin-Lens 和 C-Lens，分析工作距离、光斑尺寸和点精度与透镜参数的关系。

a) 工作距离限制

对（10）式稍作变换，得到一个关于 L 的一元二次方程（12），该方程有解（两个解中接近于透镜焦距的解才是我们所需要的）的条件是满足系数条件（13）式。

$$aL^2 + bL + c = 0 \quad (12)$$

$$b^2 - 4ac \geq 0 \quad (13)$$

其中系数 a 、 b 、 c 与透镜参数相关且包含工作距离 Z_w ，因此由（13）式可得到工作距离的限制条件：

$$\text{Grin-Lens: } Z_w \leq \frac{\lambda_0}{\pi (n_0 \omega_0 \sqrt{A})^2} \quad (14)$$

$$\text{C-Lens: } Z_w \leq \frac{\lambda_0}{\pi(n-1)^2 \omega_0^2} R^2 + \frac{2}{n-1} R \approx \frac{\lambda_0}{\pi(n-1)^2 \omega_0^2} R^2 \quad (15)$$

b) 光斑尺寸

取间距 L 等于透镜焦距，得到光斑尺寸如下：

$$\text{Grin-Lens: } \omega_t \approx \frac{\lambda_0}{\pi \omega_0 n_0 \sqrt{A}} \quad (16)$$

$$\text{C-Lens: } \omega_t \approx \frac{\lambda_0 R}{(n-1)\pi \omega_0} \quad (17)$$

c) 点精度

取间距 L 等于透镜焦距，得到准直器点精度如下：

$$\text{Grin-Lens: } \theta \approx (n_0 - 1) \cos(\sqrt{A}Z) \cdot \alpha \quad (18)$$

$$\text{C-Lens: } \theta \approx (n-1) \left[1 - \frac{(n-1)L_c}{nR} \right] \cdot \alpha \quad (19)$$

以上关于光斑尺寸和点精度的计算是基于间距 L 等于透镜焦距，其结果仅作为选择透镜参数时的参考，精确的计算可依照上述光纤准直器的设计方法进行。

C-Lens 可通过增大端面曲率半径来增加工作距离，比 **Grin-Lens** 改变参数相对容易，因此在长工作距离应用中具有优势，而在普通应用中，也因其成本优势受到欢迎。但是在 **Filter** 型 **WDM** 中，需要在透镜的端面粘贴滤波片，**Grin-Lens** 因其端面为平面而占绝对优势。

4. 双光纤准直器

双光纤准直器的设计与单光纤准直器类似，也是依据高斯光束传输理论，由需要的工作距离确定光纤头与透镜间距并计算光斑尺寸，差别在点精度的计算。双光纤准直器依光纤头不同分为两种：垂直排列型和水平排列型，如图 7 所示，其中子午面对应端面斜角方向。水平排列型亦称等光程型，因其两束光是等光程的，本文仅对水平排列型双光纤准直器进行分析，垂直排列型可作类似分析。

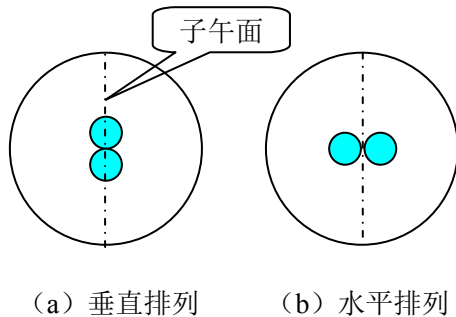


图 7. 双光纤准直器尾纤排列方式

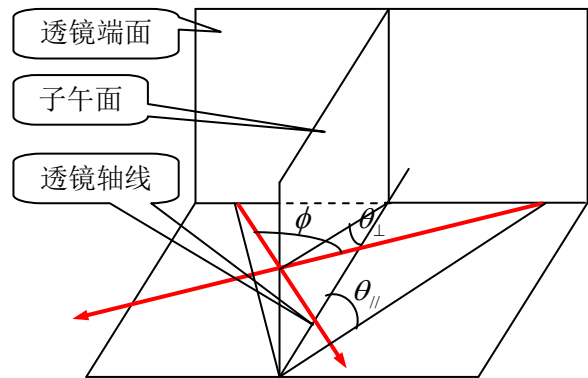


图 8. 双光纤准直器输出光方向

双光纤准直器的输出光偏角由水平偏角 $\theta_{//}$ 和竖直偏角 $\theta_{\perp}$ 两个分量组成，如图 8 所示，其中竖直偏角与单光纤准直器相同，是由光纤头端面的斜角引起，而水平偏角是因光纤位置离轴引起。双光纤准直器两束输出光交叉角可计算如下：

$$\phi = 2 \cdot \arctan(\cos(\theta_{\perp}) \cdot \tan(\theta_{\parallel})) \quad (20)$$

竖直偏角与单光纤准直器的点精度计算相同，可以确定 $\theta_{\perp} < 1^{\circ}$ ，即 $\cos(\theta_{\perp}) \approx 1$ （此近似所引入的误差，远小于工艺本身的误差），(20)式可简化如下：

$$\phi = 2\theta_{\parallel} \quad (21)$$

另外，对于一些特殊应用场合，如图9所示的光开关方案，要求双光纤准直器的两束输出光有一定的交叉长度，如图10所示。对于Grin-Lens和C-Lens，计算水平偏角 $\theta_{\parallel}$ 得到：

$$\text{Grin-Lens:} \quad 2\theta_{\text{cross}} \approx 2n_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{AZ}) \cdot r \quad (22)$$

$$\Gamma^{\text{cross}} \approx \frac{n_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{AZ})}{1} \quad (23)$$

$$\text{C-Lens:} \quad 2\theta_{\text{cross}} \approx \frac{2(n-1)}{R} \cdot r \quad (24)$$

$$L_{\text{cross}} \approx \frac{R}{n-1} \quad (25)$$

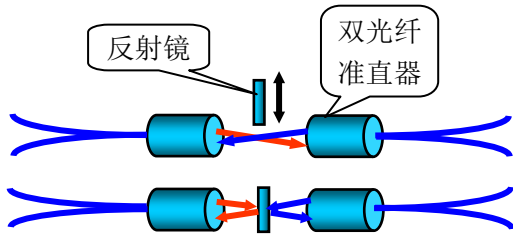


图9. 一种2X2光开关方案

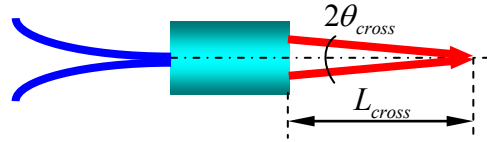


图10. 双光纤准直器的交叉角度和交叉长度

采用NSG公司SLW-18型Grin-Lens的双光纤准直器，其交叉长度约为0.25mm，而采用C-Lens，取 $R=1.8\text{mm}$ 和 $n=1.7447$ ，可得到交叉长度2.42mm，因此在要求一定交叉长度的应用场合，C-Lens双光纤准直器具有优势。

5. 双光纤准直器与屋脊棱镜和Wedge对的耦合

在光开关和环形器等器件中，为了减少准直器的数量和缩小器件体积，常用到双光纤准直器与屋脊棱镜和Wedge对的耦合，如图11和图12所示。

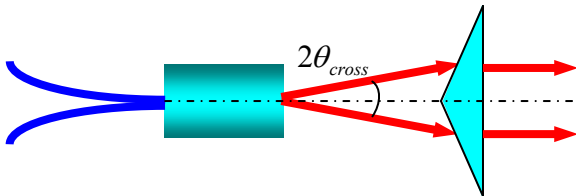


图11. 双光纤准直器与屋脊棱镜的耦合

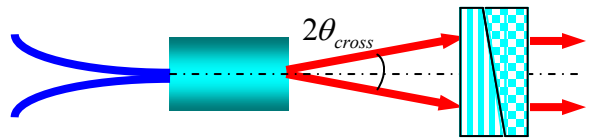


图12. 双光纤准直器与Wedge对的耦合

对图11中的屋脊棱镜在此不赘述，图12中的Wedge对，就是晶体光学中的渥拉斯顿棱镜^[5]，两片楔形晶体的光轴互相垂直，光从一片晶体传输到另一片晶体时发生o光和e光的转换（相应折射率发生 n_o 和 n_e 的转换），达到偏转光束方向的目的。光束经过Wedge对的偏转角 ϕ 如(26)式所示，其中 θ 为Wedge对的楔角，该耦合单元的设计原则是选择适当的Wedge对楔角，使偏转角 2ϕ 与双光纤准直器的交叉角 $2\theta_{\text{cross}}$ 匹配。

$$\phi = \arcsin[(n_o - n_e)\tan\theta] \quad (26)$$

屋脊棱镜和 Wedge 对由冷光学加工得到，其角度的精度和一致性可满足要求，而双光纤准直器角度的一致性则相对差一些，制作一系列细微角度差异的屋脊棱镜和 Wedge 对，选择性的与双光纤准直器匹配，有助于解决问题。

6. Displacer 晶体

Displacer晶体的功能是将o光与e光分离所需的距离，如图 13 所示，o光和e光分离角度 α 称为发散角，表示如下^[5]：

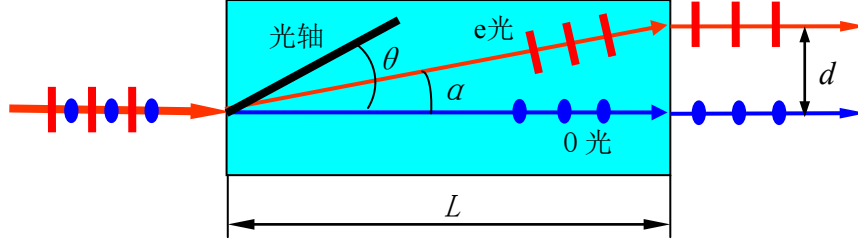


图 13. Displacer 晶体功能示意图

$$\tan \alpha = \left(1 - \frac{n_o^2}{n_e^2}\right) \frac{\tan \theta}{1 + \frac{n_o^2}{n_e^2} \tan^2 \theta} \quad (27)$$

经简单的数学处理可得到：

$$\text{当 } \theta = \arctan\left(\frac{n_e}{n_o}\right) \text{ 时,} \quad (28)$$

$$\text{有 } \alpha_{\max} = \arctan\left(\frac{1}{2}\left(\frac{n_e}{n_o} - \frac{n_o}{n_e}\right)\right) \quad (29)$$

对于钽酸钷 (YVO_4) 晶体，有 $n_o=1.9447$ ， $n_e=2.1486$ ，当 $\theta=47.85^\circ$ 时， $\alpha_{\max}=5.7^\circ$ ，晶体长度与e光偏移量的比值为 $L:d=1:\tan(5.7^\circ)=10:1$ ，这是钽酸钷晶体能够达到的最大偏移比率，此光轴方向是Displacer晶体中最常用的。

7. Displacer型Wedge对^[6]

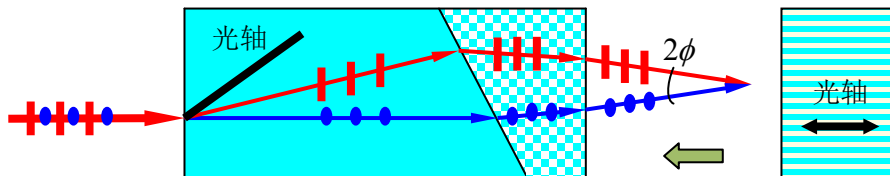


图14. Displacer型Wedge对

前面提到的Wedge对，即渥拉斯顿棱镜，两片楔形晶体的光轴相互垂直且平行于入射表面，Displacer型Wedge对稍有不同，如图 14 所示，其第二片晶体光轴方向与渥拉斯顿棱镜相同，而第一片晶体的光轴方向与Displacer晶体相同，两片晶体的光轴方向仍保持相互垂直。Displacer型Wedge对兼有Displacer晶体和Wedge对的功能，o光和e光在第一片晶体中分离，而在进入第二片晶体时亦发生了o光和e光的转换，因此光束方向发生偏转，偏转角如（30）式

所示，与（26）式不同的是 n_2 取代了 n_e ， n_2 可根据光轴方向由晶体光学定律计算。Displacer型Wedge对各种参数，需根据实际应用场合，进行严格的光线追迹来确定。

$$\phi = \arcsin[(n_o - n_2)\tan\theta] \quad (30)$$

二.光纤连接器

作为最基本的光无源器件，光纤连接器的应用最为广泛，其种类也非常繁多，有FC、SC、ST、LC、MU、E2000，等等，本文抛开这些种类分别，对广受关注的端面三项值和重复性问题作一些探讨。

光纤连接器的基本原理是利用某种机械结构，使两个抛光的光纤端面精确对准并紧密接触。从图2（b）可知，两根光纤之间的对接耦合，对径向错位非常敏感，因此要求固定光纤的陶瓷插芯外径具有非常高的圆度，内孔具有非常高的同心度，内孔径尺寸非常精确。为了保证两根光纤的紧密接触，要求陶瓷插芯端面研磨成球面而非平面，这样有助于其中心的光纤相互接触，另外光纤连接器对接时，借助弹簧施加一定压力，使陶瓷插芯的球端面发生轻微变形以保证两光纤端面的紧密接触，如图15所示。需要说明的是，光纤连接器就是靠这种紧密接触来避免菲涅尔反射，而不在端面镀增透膜。试想如果在端面镀增透膜，经多次插拔之后，膜层必然破坏脱落。



图 15. 两光纤连接器之间的对接耦合情况

光纤连接器依端面形状分为PC（Physical Contact）和APC（Angled Physical Contact）两种，其中APC连接器的端面一般研磨成 8° 倾角。对于PC型连接器，其端面三项值为端面曲率半径（10~25mm）、球面顶点偏心（ $<50\mu\text{m}$ ）、光纤内缩/突出量（ $\pm 50\text{nm}$ ）；对APC型连接器，除PC型连接器的三项值外（端面曲率半径要求为5~15mm），对端面角度亦提出要求（ $\pm 0.3^\circ$ ），制定这些要求的目的都是为了保证光纤的精确对接和紧密接触，并考虑长期可靠性。增加研磨压力和使用较软的研磨垫，会得到较小的球面曲率半径；提高研磨机的稳定性和使用较软的研磨垫，可以减小球面顶点偏心；降低研磨机转速和使用较小研磨颗粒，可以减小光纤内缩/突出量，这些都为从事光纤连接器研磨工艺的人员所熟知，此不赘述。PC型连接器的端面三项值比较容易达到，本文重点讨论APC型连接器的端面三项值和角度问题，以及连接器的互换性问题。

1. APC型光纤连接器的端面特性

APC光纤连接器的光纤内缩/突出量与PC连接器并无差异，并且容易达到要求，我们将重点讨论球面曲率半径、顶点偏心、倾斜角度之间的关系，以及它们与研磨设备和工艺之间的关系，指出问题的解决方向。

APC型光纤连接器的球面顶点偏心存在三种模式，如图16所示。其中（a）为一个标准的 8° 角APC接头，在用干涉仪测试时，通过夹具将陶瓷插芯倾斜 8° 角，球面上相对于干涉仪参考平板的最低点位于端面中心。（b）为一种普通的偏心模式，球面上相对于参考平板的最低点偏离端面中心，这种偏心模式由研磨机不稳定和研磨参数等各种因素引起，可通过改进研磨机和研磨参数来减小。（c）为由研磨角度误差引起的偏心，图示为一个大于 8° 角的APC接头，测试时也是将插芯倾斜 8° 角，虽然球面没有误差，但因倾斜而使最低点偏离端面中心。（d）为由于定位插销方位误差引起的偏心，每种光纤连接器都有一种定位方式来指示端面斜角的方向，此处抽象为一个定位插销，用干涉仪测试时定位插销插入夹具的卡槽中，如果定位插销存在方位误差，则会因此引起偏心。对第三种偏心模式用（e）中的立

体图来描述，其中原点取为 (a) 中的 E 点，当定位插销插入夹具的卡槽中时，球心从 O 点旋转至 O' 点，球面最低点也因此从 A 点旋转至 A' 点。

需要说明的是，在描述以上三种偏心模式时均以干涉仪测试方法作参考，并不是说我们的分析是以测试为导向的，而是以应用为导向，因为干涉仪测试方法与实际应用相符合。

建立偏心模式的模型之后，稍作处理就可得到后两种偏心模式的量化公式，而第一种偏心模式为随机量，可通过改善影响因素来降低，前面已经述及。

$$Apexoffset_2 = R \cdot \Delta \quad (31)$$

$$Apexoffset_3 \approx R \cdot \sin(8^\circ) \cdot \delta \quad (32)$$

其中 R 为端面曲率半径， Δ 为端面角度误差， δ 为定位插销方位误差角。

我们作一些计算来看看偏心值有多大，取 $R=10\text{mm}$ ， $\Delta=0.1^\circ$ ， $\delta=1^\circ$ ，得到 $Apexoffset_2=17.5\mu\text{m}$ ， $Apexoffset_3=24.3\mu\text{m}$ 。

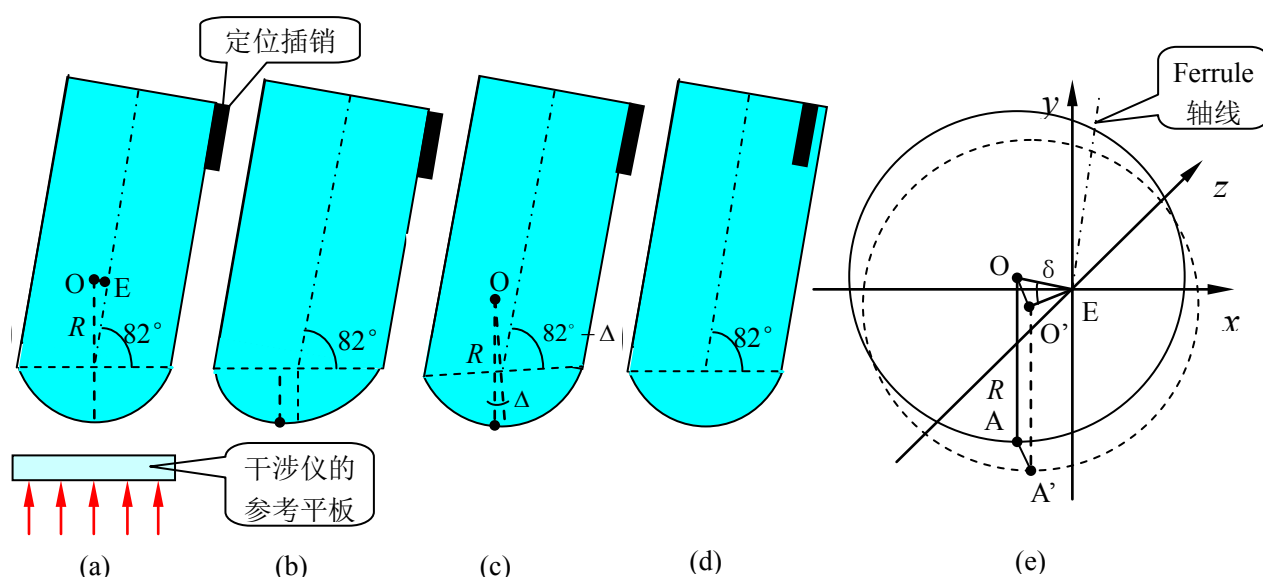


图 16. APC 跳线的球面顶点偏心情况

我们已经看到研磨角度误差和定位插销方位误差对偏心值影响非常之大，而且考虑各种因素的叠加，我们并不能为前者预算 0.3° 而为后者预算 2° 。对前者，改进方向是提高夹具的角度精度和通过工艺试验确定所需角度，因为我们知道并不是 8° 角夹具研磨出来的 APC 跳线就是 8° 角。对于后者，改进方向是提高定位插销和研磨夹具卡槽的方位精度，注意此种偏心模式并不仅发生在部件设计和装配中，也会发生在研磨过程中。所有这些改进都对机械设计和加工提出很高要求，另外，在规格允许范围内减小球面曲率半径也会有一定帮助。

2. 光纤连接器的互换性

作为最简单而最成熟的光无源器件，光纤连接器存在一个最大的缺点就是互换性差，随机抽取两个连接器配对测试，得到的插入损耗差异很大，其原因是两根光纤的对接对径向错位太敏感，而插芯孔或多或少存在一定偏心且偏心方向又是随机的。质量较好的插芯，外圆度、内孔与外圆的同心度和平行度均较好，可改善互换性。另一种做法是，将所有光纤连接器的偏心方向均调至同一个方向，比如定位插销的方向，如图 17 所示，这样做的缺点是须相应设备和夹具，且影响效率。

关于光纤连接器的测试，一般用一根标准测试线作为母线，母线的光纤偏心量和端面三项值均严格控制，这样测试可以反映被测跳线的真实水平，但不能反映实际应用情况，实际应用

是随机配对的。一般做法是用母线测试每根待测线，并按比例抽取一定数量待测线随机配对测试，统计插入损耗分布，作调芯处理之后的跳线，对母线测试值不会有改进，而随机配对测试值会有很大改进，即改善了互换性。

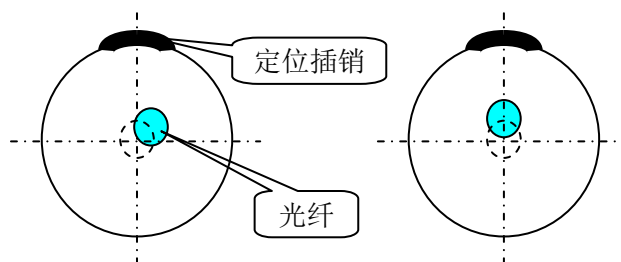


图 17. 光纤连接器的调芯

四. 晶体光学器件

1. 光隔离器

光隔离器的功能是让正向传输的光通过而隔离反向传输的光，从而防止反射光影响系统的稳定性，与电子器件中的二极管功能类似。光隔离器按偏振相关性分为两种：偏振相关型和偏振无关型，前者又称为自由空间型（Freespace），因两端无光纤输入输出；后者又称为在线型（in-Line），因两端有光纤输入输出。自由空间型光隔离器一般用于半导体激光器中，因为半导体激光器发出的光具有极高的线性度，因而可以采用这种偏振相关的光隔离器而享有低成本的优势；在通信线路或者 EDFA 中，一般采用在线型光隔离器，因为线路上的光偏振特性非常不稳定，要求器件有较小的偏振相关损耗。

光隔离器利用的基本原理是偏振光的马吕斯定律和法拉第（Farady）磁光效应，自由空间型光隔离器的基本结构和原理如图 18 所示，由一个磁环、一个法拉第旋光片和两个偏振片组成，两偏振片光轴成 45° 夹角。正向入射的线偏振光，其偏振方向沿偏振片 1 的透光轴方向，经法拉第旋光片时逆时针旋转 45° 至偏振片 2 的透光轴方向，顺利透射；反向入射的线偏振光，其偏振方向沿偏振片 2 的透光轴方向，经法拉第旋光片时仍逆时针旋转 45° 至与偏振片 1 的透光轴垂直，被隔离而无透射光。自由空间型光隔离器相对简单，装配时偏振片和旋光片均倾斜一定角度（比如 4° ）以减少表面反射光，搭建测试架构时注意测试的可重复性，其他不赘述。下面详细介绍在线式光隔离器的发展情况。

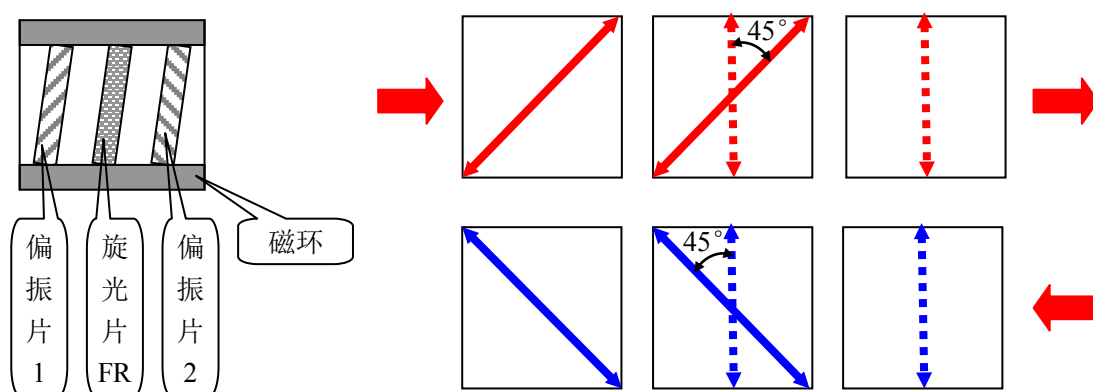


图 18. 自由空间型光隔离器结构和原理

最早的在线式光隔离器是用 Displacer 晶体与法拉第旋光片组合制作的，因体积大和成本高而被 Wedge 型光隔离器取代；在线式光隔离器因采用双折射晶体而引入 PMD，因此相应出现 PMD 补偿型 Wedge 隔离器；某些应用场合对隔离度提出更高要求，因此出现双级光隔

分离器，在更宽的带宽内获得更高隔离度。下面依次介绍这些在线式光隔离器的结构和原理。

1) Displacer 型光隔离器

Displacer型光隔离器结构和光路如图 19 所示，由两个准直器、两个Displacer晶体，一个半波片、一个法拉第旋光片和一个磁环（图中未画出）组成^[2]。正向光从准直器 1 入射在Displacer1 上，被分成o光和e光传输，经过半波片和法拉第旋光片后，逆时针旋转 $45^\circ + 45^\circ = 90^\circ$ ，发生o光与e光的转换，经Displacer2 合成一束耦合进入准直器 2；反向光从准直器 2 入射在Displacer2 上，被分成o光和e光传输，经过法拉第旋光片和半波片后，逆时针旋转 $45^\circ - 45^\circ = 0^\circ$ ，未发生o光和e光的转换，经Displacer1 后两束光均偏离准直器 1 而被隔离。

Displacer 型光隔离器的缺点是，为了满足隔离度要求，反向光路中的两束光需偏移较大距离，可参考图 2（a），而双折射特性较好的钽酸铋 Displacer 晶体，其长度与偏移量的比值也只能做到 10:1，这就要求 Displacer 晶体体积非常大，造成器件体积大和成本高昂。

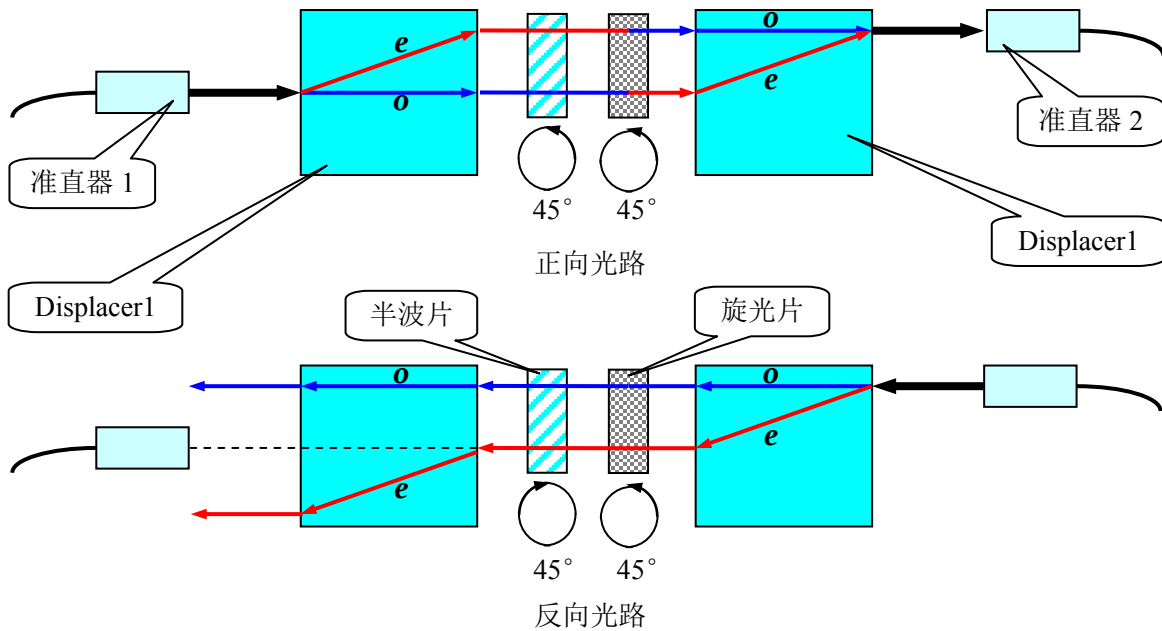


图 19. Displacer 型光隔离器结构和原理

2) Wedge 型光隔离器

Wedge型光隔离器的结构和光路如图 20 所示，由两个准直器（图中未画出）、一个磁环、一个法拉第旋光片和两个楔形双折射晶体组成，两个楔角片的光轴成 45° 夹角^[2, 7-8]。来自输入准直器的正向光被Wedge1 分成o光和e光分别传输，经过旋光片时偏振方向逆时针（迎着正向光传播方向观察，以下同）旋转 45° ，进入Wedge2 时未发生o光与e光的转换，因此两束光在两个楔角偏中的偏振态分别是 $o \rightarrow o$ 和 $e \rightarrow e$ ，两个楔角片的组合对正向光相当于一个平行平板，正向光通过后方向不变，耦合进入输出准直器；来自输出准直器的反向光被Wedge2 分成o光和e光分别传输，经过旋光片时偏振方向仍逆时针旋转 45° ，进入wedge1 时发生o光和e光的转换，因此两束光在两个楔角片中的偏振态是 $o \rightarrow e$ 和 $e \rightarrow o$ ，两个楔角片的组合对反向光相当于一个渥拉斯顿棱镜，反向光通过后偏离原方向，不能耦合进入输入准直器。

注意正向光分成两束通过后，相对于入射光发生横向位移 Offset，两束光分开一定距离 Walkoff，两束光在楔角片中的的折射率不同，因而引入 PMD。封装设计时应考虑 Offset 加以考虑；Walkoff 一般约为 10um，会引入少许 PDL，但关系不大；对于 PMD，视需要进行补偿，

PMD 补偿方法是在后面增加一个双折射晶体平板，其光轴与 Wedge2 的光轴垂直，厚度经光路追迹计算后得到，此不赘述。

与 Displacer 型光隔离器相比，Wedge 型光隔离器对反向光的隔离机制大为不同，前者使反向光相对于输入准直器发生横向位移，后者使反向光相对于输入准直器发生角度偏离，从图 2 (a) 和 (c) 可以看到，后者的隔离效果更好。Wedge 晶体的截面积只要对通过的光斑保证有效孔径，厚度只要便于装配即可，因此 Wedge 型光隔离器的晶体体积小，因此器件体积小而且成本低，已经取代 Displacer 型。

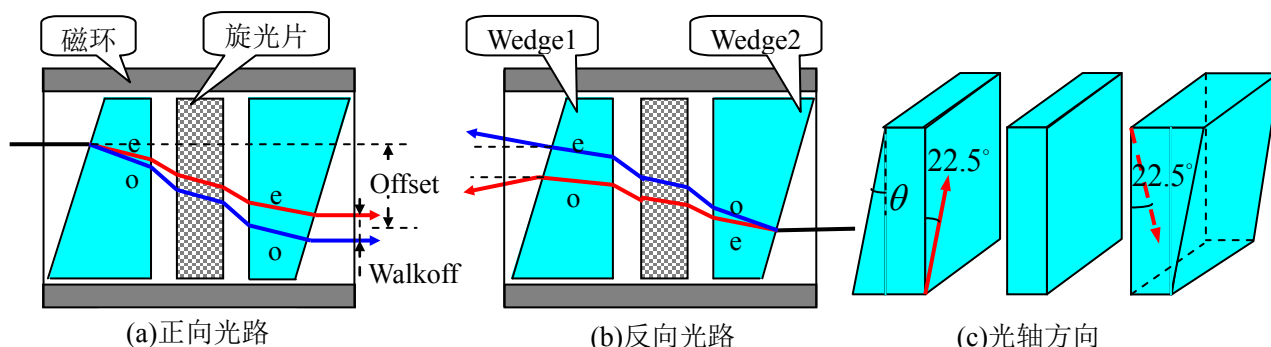


图 20 Wedge 型光隔离器结构和光路

3) 双级光隔离器

图 21 所示为双级光隔离器方案一，两个单级光隔离器芯串接起来，各楔角片的光轴方向亦如图所示，正向光在第一级和第二级中分别为 o 光和 e 光，因此两级产生的 PMD 相互补偿，这种方案的缺点是对装配精度要求非常之高，否则隔离度指标比单级光隔离器还差，后面将会有详细分析。

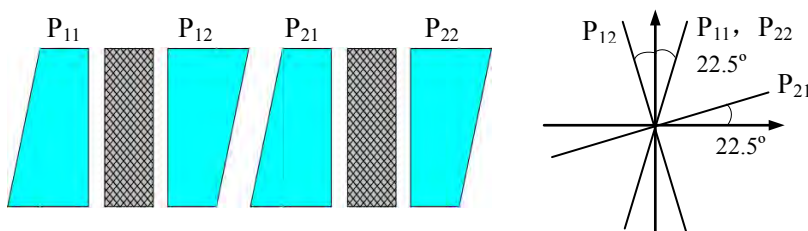


图 21. 双级光隔离器方案一

图 22 是双级光隔离器方案二，两个如图 20 所示的单级光隔离器相对旋转 45° 串接，这种方案的缺点是在旋转时很难同时将隔离度和 PMD 调至最佳状态，因此两级先分别进行 PMD 补偿，再相对旋转组装，这样能做出合格的双级光隔离器，但仍因工艺复杂而导致良率不高和效率低下。

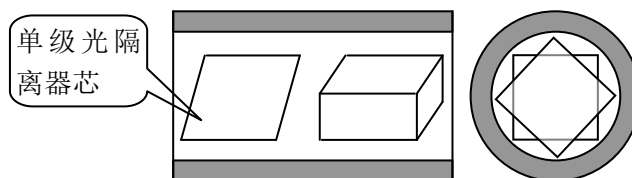


图 22. 双级光隔离器方案二

图 23 是双级光隔离器方案三，与方案一相比，唯一的差别是前后两级楔角片的角度不同，下面我们通过分析方案一以了解方案三的改变^[9]。

首先我们来了解双级光隔离器能获得比单级光隔离器更高隔离度的原因，前面提到 Wedge 型光隔离器使反向光偏离准直器一个角度以达到隔离目的，对 5° 角的钽酸铋楔角片

和 13° 角的铌酸锂楔角片，反向光被偏移的角度约为 1° ，从图 2 (e) 可以看到，单考虑此偏角，单级光隔离器的隔离度就可以远超过 60dB。真正制约其隔离度的原因是法拉第旋光片的消光比和波长相关性，前者约为 40-50dB，后者约为 $-0.068^\circ/\text{nm}$ ，因此单级光隔离器的峰值隔离度约为 40-50dB，在 30nm 带宽内的隔离度 $>30\text{dB}$ 。双级光隔离器使反向光偏移更大角度，但属锦上添花，真正起作用的是两级串接克服旋光片的消光比和波长相关性制约。

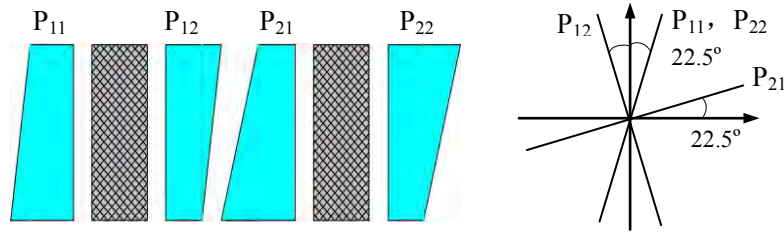


图 23. 双级光隔离器方案三

我们接下来考察方案一，反向光在 P_{22} 中开始分成两路传播，在各楔角片中的偏振态为 $o \rightarrow e \rightarrow o \rightarrow e$ 和 $e \rightarrow o \rightarrow e \rightarrow o$ ，相当于通过两个渥拉斯顿棱镜，因此偏离角度约为单级光隔离器的两倍。以上假设各楔角片的光轴处于理想方向，现在我们假设楔角片 P_{12} 和 P_{21} 的光轴并非完全垂直，其夹角为 $90^\circ - \Delta$ ，那么从 P_{21} 进入 P_{12} 的两路光将各分为两路传播，因此除以上偏振态的两路光，另外两路光的偏振态为 $o \rightarrow e \rightarrow e \rightarrow o$ 和 $e \rightarrow o \rightarrow o \rightarrow e$ ，这两束光的强度为 $\sin^2(\Delta)$ 。考虑后两路光的偏振态， P_{12} 和 P_{21} 组合对其相当于一个平行平板， P_{11} 和 P_{22} 组合对其相当于另一个平行平板，因此这两路光通过之后方向不变，或者解释为前后两级相当于两个倒装的渥拉斯顿棱镜，被第二级偏离的光束，又被第一级折回，如图 24 所示。这两路光直接耦合进入输入端准直器，成为制约隔离度的主要原因。分别取 $\Delta = 0.1^\circ$ 和 0.2° ，得到隔离度为 55dB 和 49dB，可见对装配精度要求之高。方案三对两级中的楔角片取不同角度，被第二级偏离的光束，并不会被第一级完全折回，因为偏折角与楔角大小近似成正比。

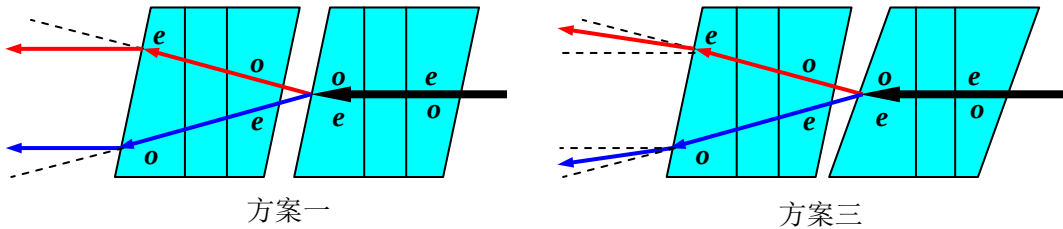


图 24. 偏振态为 $o \rightarrow e \rightarrow e \rightarrow o$ 和 $e \rightarrow o \rightarrow o \rightarrow e$ 的两路反向光轨迹示意图

方案三的核心在于了解到， P_{12} 与 P_{21} 光轴非严格垂直对隔离度的影响至关重要，对此提出了解决办法，采用相应的装配工艺，可以制作出高隔离度的双级光隔离器，并因装配容差大而提高效率。

2. 光环形器

光环形器的端口功能如图 25 所示，光沿箭头方向传播，反向则被隔离。一个普通三端口光环形器的原理如图 27 所示，注意 Displacer1 和 Displacer3 使 e 光水平偏移，而 Displacer2 使 e 光垂直偏移。为便于理解其光路，图 26 中描述了一个法拉第旋光片与半波片组成的旋光单元功能，正向光偏振方向旋转 90° ，反向光偏振方向不变。在实际的光环形器方案中，一般在 Displacer2 与旋光单元 2 之间插入一个 Wedge 对或者屋脊棱镜，与双光纤准直器进行耦合，如图 28 所示。Wedge 对与双光纤准直器耦合代替两个单光纤准直器，可以减小晶体体积，从而降低器件体积和成本。Wedge 对选择图中插入位置，是因为双光纤准直器与 Wedge 对的耦合需要一定间距，这样插入可以缩短整个器件长度。注意图 28 中红色光线从 Displacer2 出射时的偏转方向是由 Wedge 对产生的，图中 Wedge 对与 Displacer2 间距太小，不便画出，可

参见图 29 的 PBC。另外，两个准直器的轴线不在同一直线上，封装设计时应加以考虑。

如果将图 28 中的 Displacer2 和 Wedge 对用图 14 中的 Displacer 型 Wedge 对代替，则得到改进型的光环形器，减少了一个元件，因而提高可靠性和降低成本^[6]。

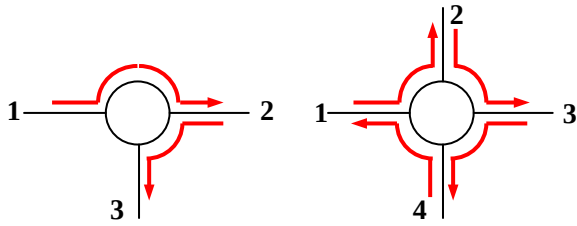


图 25. 光环形器的端口功能

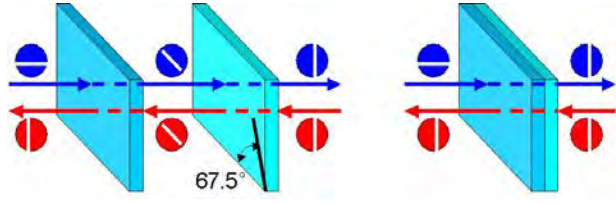


图 26. 法拉第旋光片与半波片组成的旋光单元功能

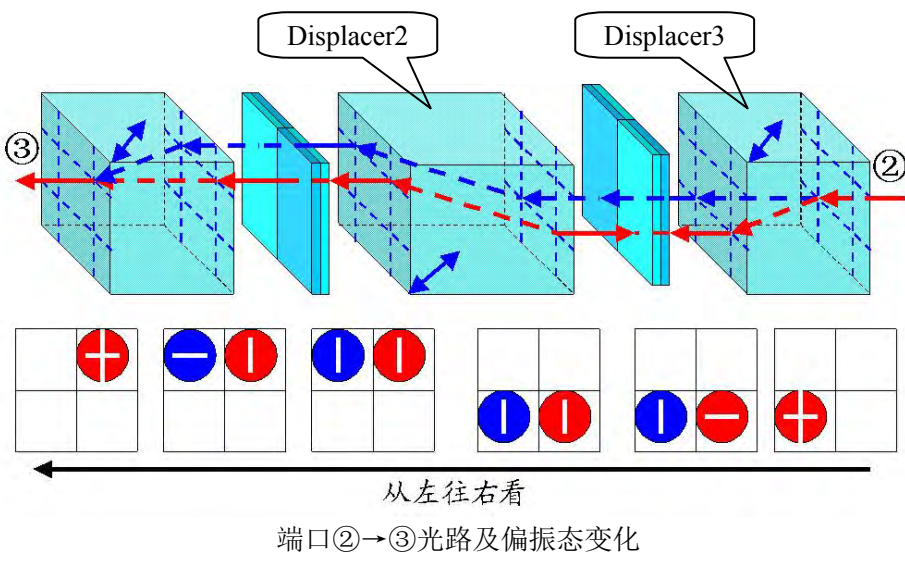
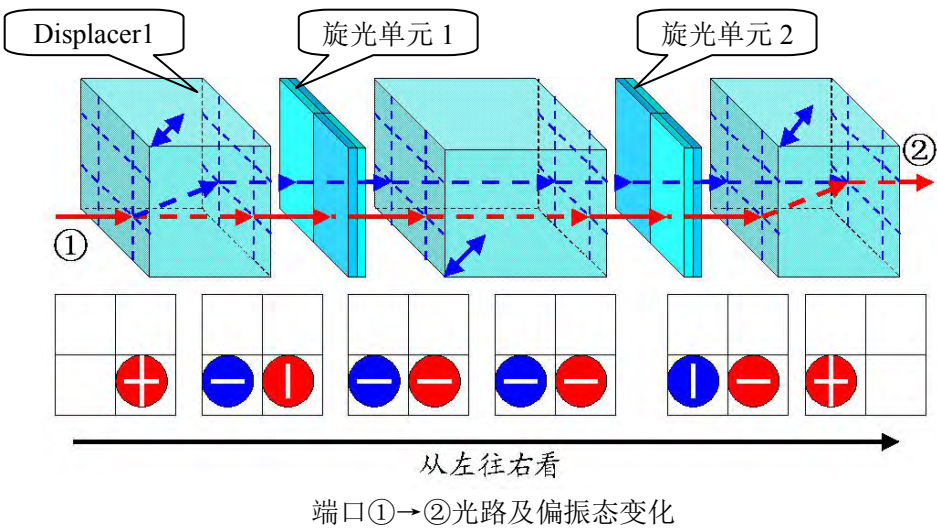


图 27. 普通三端口光环形器原理图

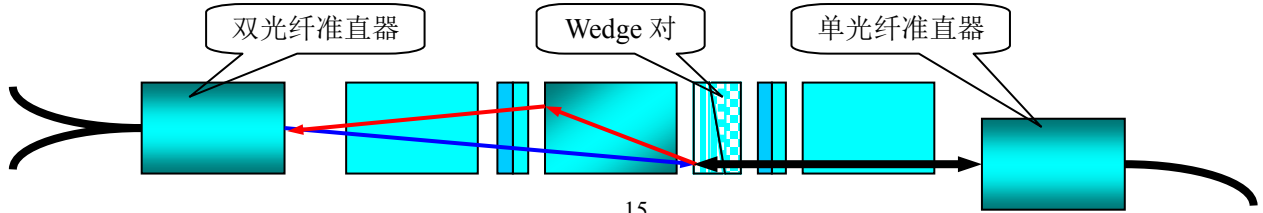


图 28. 光环形器中 Wedge 对与双光纤准直器的耦合

3. 偏振光合束器

偏振光合束器（PBC）的功能是将两束偏振方向正交的线偏振光合成一束，一个典型应用场合是，在 Raman 光纤放大器中，增益取决于信号光与泵浦光的偏振态关系，也就是说增益是偏振相关的，因此将两束正交的泵浦光合束以进行泵浦可以改善增益的偏振相关性。

普通 PBC 结构如图 29 所示，双光纤准直器与 Displacer 晶体和 Wedge 对的组合进行耦合，输出端用单光纤准直器。Wedge 对也可以用屋脊棱镜取代。

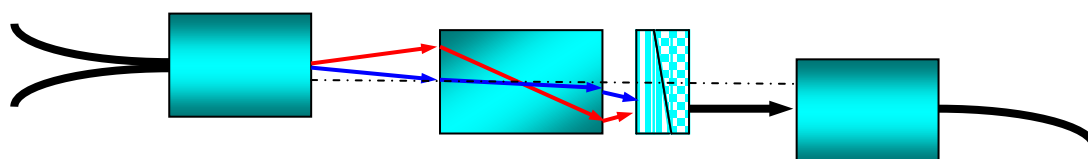


图 29. 普通 PBC 结构

将图 29 中的 Displacer 晶体和 Wedge 对用图 14 中的 Displacer 型 Wedge 对代替，则得到改进型的 PBC，减少了一个元件，因而提高可靠性和降低成本^[6]。

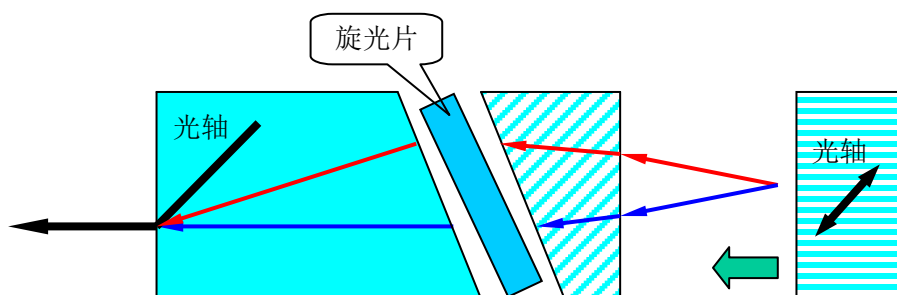


图 30. 反向隔离的 PBC

将 Displacer 型 Wedge 对的两片楔角片分开，中间插入法拉第旋光片，并且取第二片楔角片的光轴方向为 45° ，则为一个反向隔离的 PBC，如图 30 所示，注意对比图 30 与图 14 的晶体光轴方向。反向隔离的 PBC 兼有 PBC 和光隔离器功能，两束偏振光可以合为一束，而反之则被隔离。

五. 波分复用器

1. Filter 型波分复用器

Filter 型波分复用器结构如图 31 所示，Filter 粘贴在 Grin-Lens 端面上，与双光纤头匹配将反射端插损调至最小固定，再将公共端与透射端插损调至最小固定。

因 Filter 型波分复用器结构和原理相对简单，主要为工艺问题，此不赘述，本文将着重介绍反射端选用 0.25 节距 Grin-Lens 的原因（准直器一般采用 0.23 节距的 Grin-Lens）。

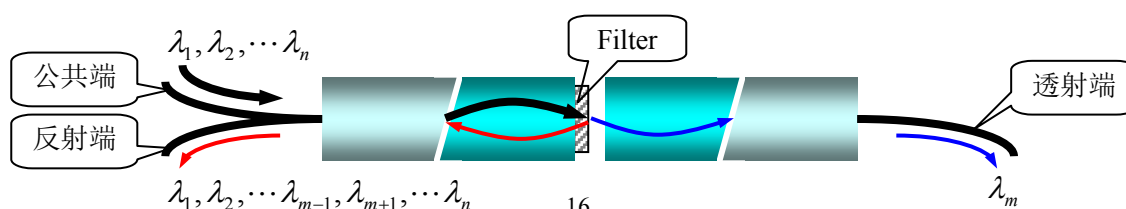


图 31. Filter 型波分复用器结构

由图 8 看到，双光纤准直器的输出光偏角由水平偏角和竖直偏角合成，其中前者由双光纤头中光纤的离轴造成，后者由端面的 8° 斜角造成。光在 Filter 端面的反射情况如图 32 所示，光束①的反射光束①'与光束②存在夹角 δ 。

$$\delta = 2 \cdot \arctan(\cos(\theta_{//}) \cdot \tan(\theta_{\perp})) \quad (33)$$

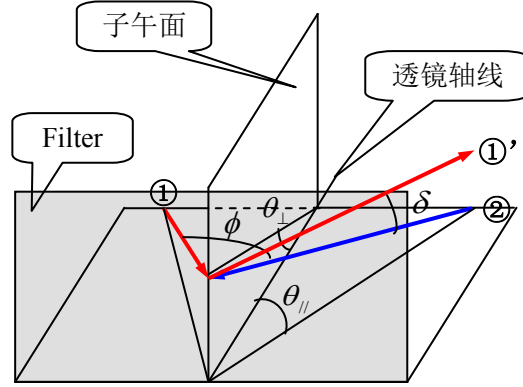


图 32. Filter 型波分复用器反射端光路

从 (33) 式看到，夹角 δ 主要取决于竖直偏角 $\theta_{\perp}$ ，对 0.23 节距的 SLW-18 型 Grin-Lens， $\theta_{//}=1.84^\circ$ ， $\theta_{\perp}=0.6^\circ$ ， $\delta=1.2^\circ$ 。当然，反射端双光纤头轴线与 Grin-Lens 轴线未必要求重合，适当倾斜一定角度可有补偿作用，但未必能补偿 1.2° 这么大的角度。

下面我们来考察 (18) 式单光纤准直器的点精度，相当于此处的垂直偏角 $\theta_{\perp}$ ，选取 0.25 节距的 Grin-Lens， $\cos(\sqrt{AZ})=0$ ，因而 $\theta_{\perp}=0$ ，得到 $\delta=0$ 。如果采用 0.25 节距的 Grin-Lens，考虑加工误差，某些可能超过 0.25 节距，焦点在 Grin-Lens 内部，因而反射端插损调不下来，所以在 Filter 型波分复用器反射端，常用 0.248 或者 0.246 节距的 Grin-Lens。

2. Interleaver

Interleaver 的功能是将频率间隔为 ν 的多波长信号，按奇偶波长分解成频率间隔为 2ν 的信号，如图 33 所示。

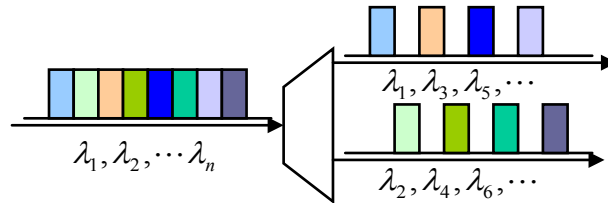


图 33. Interleaver 功能示意图

Interleaver 的基本原理是位相差为 δ （程差 ΔnL ）的两束光相干涉，干涉频谱及自由频率范围（即 Interleaver 的频道间隔）为：

$$I = |1 + e^{j\delta}|^2 = \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = \cos^2\left(\frac{\pi \cdot \Delta nL}{c} f\right) \quad FSR = \frac{c}{\Delta nL} \quad (34)$$

产生程差的方式多种多样，如折射率差和干涉臂长差，因此 Interleaver 的实现方式也是

多种多样的，此处仅介绍晶体型和 Mach-Zehnder 型，其他请参考文献[10]。

1) 晶体 Interleaver

a) 基本原理

图 34 是一种典型的晶体 Interleaver 结构，Displacer1 和半波片组合，将随机偏振的入射光转换成线偏振光；其偏振方向与位相延迟单元的快轴成 45° 夹角，分解为沿快轴和慢轴的两个分量传输并产生位相差；Displacer2 相当于两个正交的检偏器，分别输出到端口 1 和端口 2^[10]。直观理解是，如果延迟单元对某频率为全波片，则线偏振光偏振方向不变，输出到端口 1；如果对某频率为半波片，则偏振方向旋转 90° ，输出到端口 2；对其他介于中间的频率，则被变换成椭圆偏振光，不能这样直观解释，下面用矩阵描述。

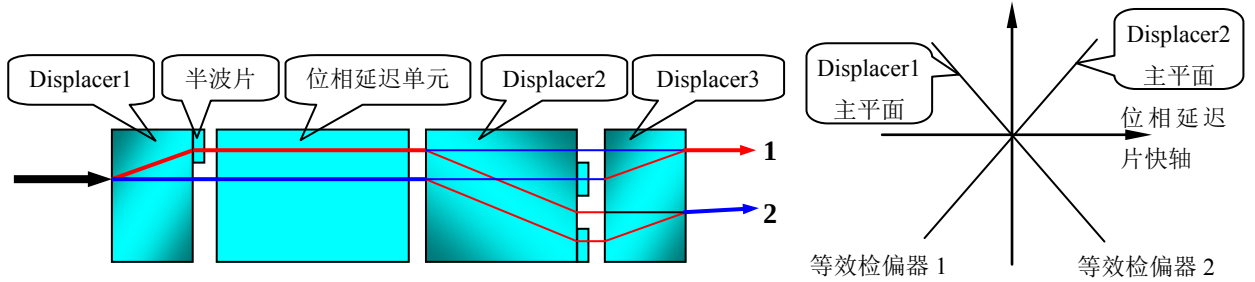


图 34. 典型的晶体 Interleaver 结构

我们取延迟单元的快轴方向为 x 轴，建立如图 34 所示的坐标，经 Displacer1 和半波片转换的线偏振光，其偏振方向与 Displacer1 主平面垂直（注意晶体主平面为光轴和入射表面法线确定的平面， o 光偏振方向与主平面垂直），Displacer2 相当于透光轴平行和垂直于其主平面的两个检偏器。因此，我们可以用矩阵（35）和（36）来描述端口 1 和端口 2 的输出光，并得到输出光强（37）和（38），其中从左至右分别为检偏器、延迟单元的传输矩阵和入射线偏振光的琼斯矢量。

$$\begin{bmatrix} E_{x1} \\ E_{y1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\delta} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} (1 + e^{j\delta}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} E_{x2} \\ E_{y2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\delta} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} (1 - e^{j\delta}) \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$I_1 = |E_{x1}|^2 + |E_{y1}|^2 = \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = \cos^2\left(\frac{\pi \cdot \Delta n L}{c} f\right) \quad (37)$$

$$I_2 = |E_{x2}|^2 + |E_{y2}|^2 = \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi \cdot \Delta n L}{c} f\right) \quad (38)$$

我们看到（37）式与（38）式相同，因此该结构是 Interleaver 的一种实现形式。如果用 YVO_4 （ $\Delta n = 0.2039$ ）晶体来产生位相差，设计频道间隔为 50GHz，则晶体长度 $\sim 29.4\text{mm}$ 。

b) 工艺考虑

以上提到的位相延迟单元，并不是一片晶体，一般设计成三片形式，如图 35 所示^[10]。晶体在不同温度的折射率差不同，比如 YVO_4 的双折射温度系数为 $-27 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。从（34）式可知，晶体双折射的温度相关性将使中心频率和频道间隔发生漂移，为此采用温度系数相反的晶体进行补偿，温度补偿片的快轴可与位相延迟片的快轴平行或者垂直，因此频道间隔变为（39）式所示。可用铌酸锂（ LiNbO_3 ）晶体作为 YVO_4 的温度补偿片。

$$FSR = \frac{c}{\Delta n_1 L_1 \pm \Delta n_2 L_2} \quad (39)$$

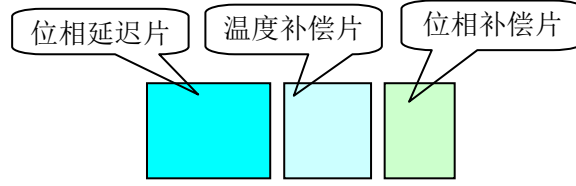


图 35. 位相延迟单元结构

现在我们来考虑位相延迟片的加工长度误差，因此造成的频率漂移可由（40）式描述。

$$\Delta f = f_0 \cdot \frac{\delta(\Delta n L)}{\Delta n L} = \frac{f_0 \cdot FSR \cdot \Delta n \cdot \delta L}{c} \quad (40)$$

其中为 f_0 中心频率， $\delta(\Delta n L)$ 为程差的误差量，设计中心频率 193.1THz，频道间隔 50GHz，

加工长度误差为 $\pm 1\mu\text{m}$ ，则频率漂移为 $\pm 6.56\text{GHz}$ ，实际的加工精度未必能达到 $\pm 1\mu\text{m}$ ，因此频率可能漂移更多。而ITU对通信频道是有规定的（ITU-Grid），所有器件的中心频率必须调至ITU-Grid附近。从（40）式我们也看到，加工长度误差造成的频率漂移与晶体的折射率差成正比，也就是说，折射率差较小的晶体，情况会好一些，因此可用折射率差较小的晶体（如石英）作为位相补偿片，将中心频率调至ITU-Grid。位相补偿片的快轴与位相延迟片平行或者垂直

c) 通带平坦化

我们再次考察（34）式，透射频谱是一条正弦曲线，在中心频率附近插损很快上升。而在通信系统中，由于光源波长不可能绝对稳定，因此要求滤波器具有一定的通带平坦度，比如对 100G 的 Filter，要求 0.5dB 带宽 $>0.2\text{nm}$ 。

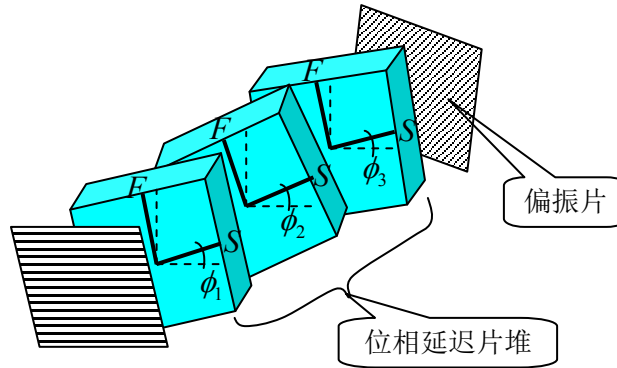


图 36. 位相延迟片堆

文献[11]中描述了一种方法，可以用图 36 所示的位相延迟片堆（其中的每一个延迟片相当于图 35 中的一个延迟单元）构筑具有任意透射谱的器件，其中每个延迟片厚度相等，快轴相对旋转一定角度，并相对输入和输出偏振片的透光轴旋转一定角度。其原理是将沿快轴和慢轴传输光的位相差视为光脉冲在时域的延迟，线偏振光脉冲通过一个延迟片的输出即时域响应为：

$$S(t) = a_1 \delta(t) + a_2 \delta(t - \tau) \quad (41)$$

$$\tau = \Delta n L / c$$

其中系数 a_1 、 a_2 取决于入射线偏振光偏振面与快轴的相对角度，对应入射光在快轴和慢

轴上的投影分光比。

将时域响应通过傅立叶变换至频域，即为延迟片对入射光的频域相应，时域的时间延迟相当于频域的相位延迟，(41)式的傅立叶变换为：

$$S(\omega) = b_1 + b_2 e^{-j\tau\omega} \quad (42)$$

因此，整个延迟片堆（n 片）对输入光的频域相应为：

$$C(\omega) = \sum_{k=0}^n b_k e^{-jk\tau\omega} \quad (43)$$

文献[11]中建立了一种用频域响应描述位相延迟片堆对入射光作用的模型，并建立频域响应中各项系数与各延迟片快轴角度的关系和计算程序。大致设计程序是，确定实际所需透射频谱（比如 Interleaver 设计者希望的是 50% 占空比的方波）并用有限项傅立叶级数作为其近似（或者其他级数），如（43）式所示，项数越多则近似程度越好，然后用文献中的计算程序求得偏振片和各位相延迟片的相对角度关系。

设计细节此处无法尽言，具体设计者请参考文献[11]。需要注意的是，在设计 Interleaver 时，考虑到器件尺寸、损耗、串扰及工艺问题，不宜采用太多延迟片，一般用两片即可达到通带平坦化要求，相应级数为三项，不能严格按照傅立叶级数展开（傅立叶级数在项数多时可以得到很好的近似，但项数少时则未必是最优的），需稍作调整。

2) Mach-Zehnder 型 Interleaver

Mach-Zehnder 型 Interleaver 一般用集成光学方法制作，如图 37 所示，在两个方向耦合器之间有一对长度差 ΔL 的干涉臂，而级数则根据通带平坦度要求决定^[12]。

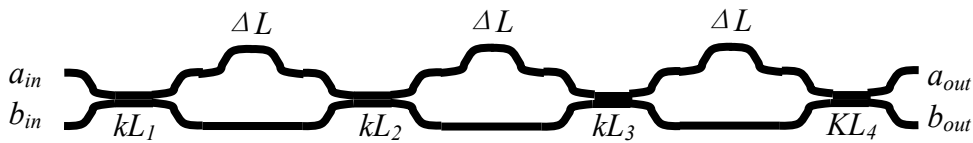


图 37. Mach-Zehnder 型 Interleaver 结构

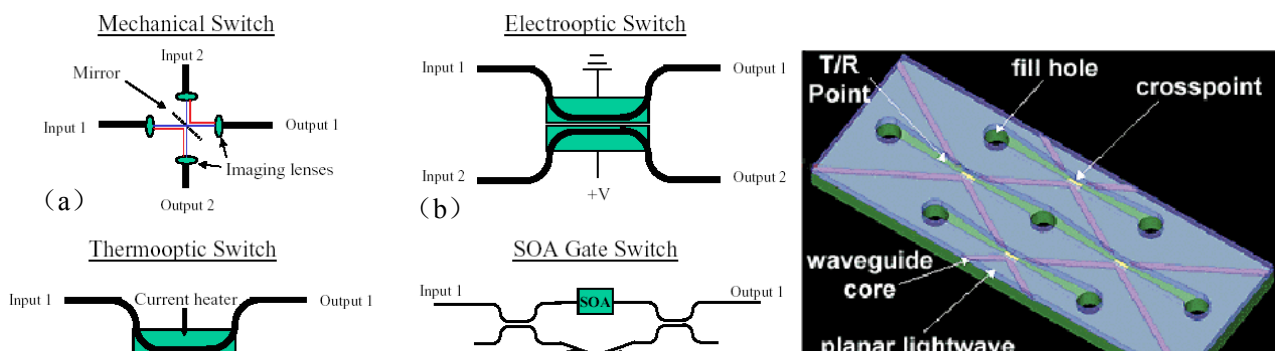
Mach-Zehnder 型 Interleaver 的通带平坦化方式与晶体型 Interleaver 类似，因为其耦合器的耦合度 kL （耦合比为 $\sin^2(kL)$ ）相当于晶体的快轴角度，唯一差异是耦合器分光时对两路光引入 $\pi/2$ 相位差，因此在分析的细节上稍有差异，详细方法可参见附件[12]。文献[12]与[11]的分析方法实质上是殊途同归的。

需要注意的是，为了将中心频率调至 ITU-Grid，需要在两条干涉臂上做加热电极以调节光程差，这与晶体 Interleaver 的相位补偿方式不同。

方向耦合器的耦合比对工艺参数（如波导折射率差，耦合波导间距等）非常敏感，文献[10]中提到一种设计结构，可以增加工艺容差，详细请参考该文献。

六. 光开关

光开关种类繁多，但需要说明的是，目前商用的光开关方案，限于其交换速度只有毫秒或者微秒级，仅能用于网络重构、线路交换、保护倒换、线路监控等，而不能用于光分组交



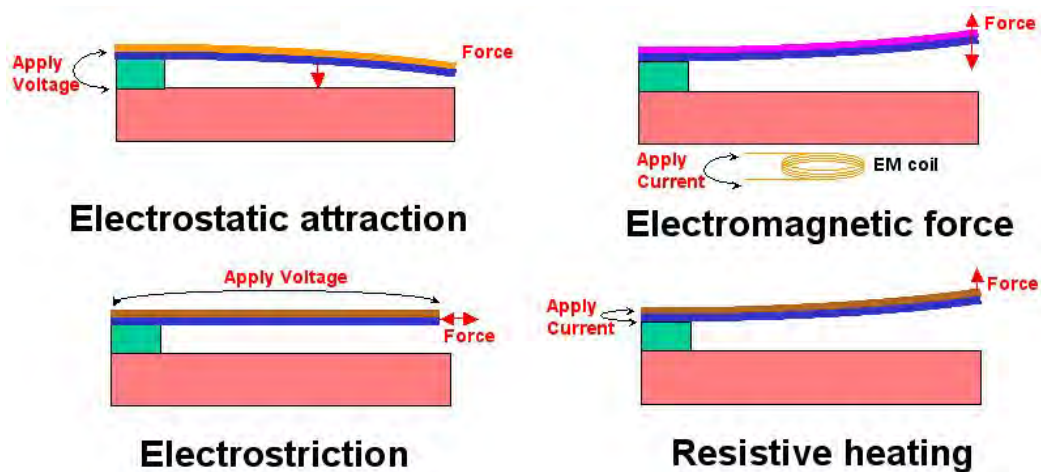


图 39. MEMS 驱动机制^[15]

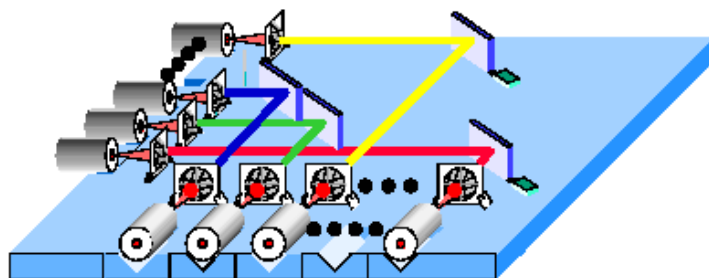


图 40. 二维 MEMS 光开关^[18]

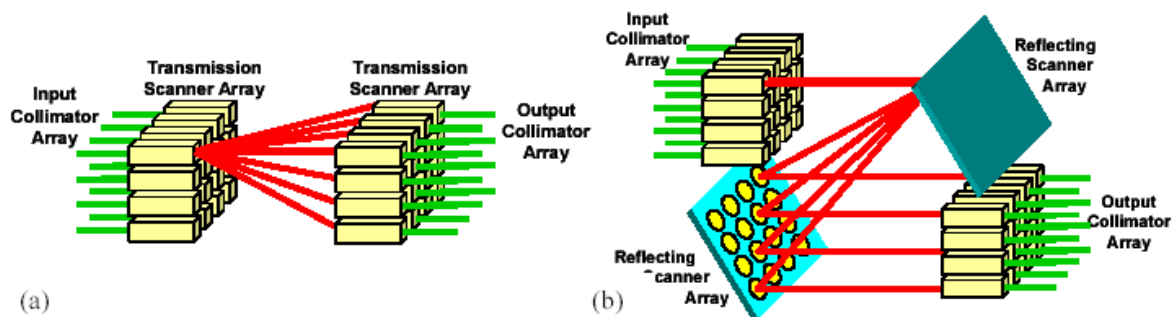


图 41. 三维 MEMS 光开关：(a) 透射式；(b) 反射式^[18]

换。常见的光开关方案有机械光开关、电光开关、声光开关、热光开关、磁光开关、液晶光开关和SOA（半导体光放大器）光开关等，Agilent公司曾展示一种气泡光开关，光开关的最关键技术在于工艺问题的解决，限于作者知识水平和经验限制，此处仅简述其原理^[13-24]。

1. 机械光开关

机械光开关通常分为普通机械光开关和 MEMS 光开关，前者通过移动光纤（准直器）或者棱镜、反射镜等偏转器件来实现光路的切换，后者也是移动这些器件，但是采用 MEMS 技术制作，因此从材料到工艺都有很大不同。

普通机械光开关的种类非常繁多，无法尽述，列出图 9 和图 38（a）两种以建立一个直观印象，这些机械光开关的光路非常简单，关键在于改进工艺以提高可靠度和重复性，因此在结构和工艺设计时应注意考虑工艺容差。比如光纤之间直接耦合，则对位移和间距非常敏感，机械设计和位移必须保证位置精度；通过准直器耦合，则对角度非常敏感，应尽量采用透射棱镜而不是反射镜，等等。

MEMS 光开关是利用静电吸引、电磁驱动、电致伸缩、热偶弯曲等现象，用电压或者电流实现机械驱动，如图 39 所示。MEMS 光开关分二维和三维 MEMS 两种，如图 40 和 41 所示，微镜阵列中的每个微镜都可以单独控制，前者的微镜只有两种位置状态，Bar（直通）态或 Cross（交叉）态；后者的微镜可在三维精确转动。

三维 MEMS 比二维 MEMS 工艺复杂，而其优势是在同样端口数下，可以大大减少所需微镜数目。对于大端口数的光开关，一个关键要求是无阻塞，即任一输入端口可在任意时刻交换至任一输出端口，而不受其他端口状态的影响。为了实现一个 $N \times N$ 的无阻塞 MEMS 光开关，二维 MEMS 需要 N^2 个微镜，三维 MEMS 只需要 N 个或者 $2N$ 个微镜。

MEMS 光开关常用光纤透镜进行输入/输出耦合，因为用光纤直接耦合则因间距大而损耗较大，用准直器进行耦合则因光斑太大而 MEMS 驱动行程不够，而且体积较大。尽管采用光纤透镜，输入输出端口间距因开关状态而不同，工作距离设计只能取其均值，因此整个器件结构设计时应考虑使链路间距尽量均匀。

2. 气泡光开关

图 38（e）所示为 Agilent 公司展示的一种气泡光开关，由两层组成，上层为二氧化硅波导层，含 PLC 光路；下层为硅层，应用一种类似于喷墨打印机的技术。波导层中，两根交叉波导大约成 120° 夹角，交叉处有一条沟道。直通状态时，沟道中充满一种折射率与波导芯层接近的液体，因此光在两波导中各自传播；交叉状态时，从充气孔中冒出一个气泡，挡在两根波导交叉处，光因全反射从一根波导进入另一根波导。

3. 电光开关

电光开关如图 38（b）所示，在方向耦合器的两侧制作电极，当加电压时，因电场作用改变耦合区波导折射率，从而改变耦合比，控制光在两个输出端之间切换。

4. 热光开关

热光开关如图 38（c）所示，在方向耦合器的一侧制作电极，当通电流时，电极发热改变耦合区折射率，从而改变耦合比，控制光在两个输出端之间切换。

5. 磁光开关

磁光开关通过磁光效应，将线偏振光的偏振面旋转某个角度（如 90° ），从而改变其传播路径，实现通道间的切换。类似于光环形器，磁光开关也是将入射光分成两束线偏振光通过磁光晶体，但根据需要施加或者撤去磁场，

6. 液晶开关

液晶是一种物质状态，包含大量有机分子，当未施加电场时，其光学特性与一般物质无异，当施加电场时，有机分子被极化而规则排列，使通过的线偏振光偏振面发生旋转。液晶光开关结构与磁光开关类似，只不过前者施加电场，后者施加磁场。

7. 声光开关

声光开关利用换能器将电能转换成在材料中传播的声波，声波的传播对材料造成局部拉

伸或者压缩，改变折射率分布，形成声光光栅，对传输的光发生衍射，实现光路的切换。

8. SOA 光开关

SOA 光开关阵列如图 38（d）所示，其中每个单元是一个 SOA 放大器，当通电流时，光被放大通过，当未通电流时，入射光因材料吸收而被损耗掉。因此每个 SOA 单元是一个通/断开关而不是切换开关，必须与方向耦合器组成如图所示的阵列使用，其中因分路造成的损耗通过 SOA 的增益来补偿。

SOA 光开关能够实现纳秒量级的切换速度，有希望应用于将来的光分组交换，但技术尚不成熟，需要解决的问题之一是插入损耗的偏振相关性，这是由 SOA 增益的偏振相关性引起的，采用应变量子阱 SOA 可以改善偏振特性。

表 1 中列举了各种光开关的特性，以作对比。

表 1. 各种光开关特性比较^[13]

	Insertion Loss (dB)	Crosstalk (dB)	PDL (dB)	Switching Time
Optomechanical 8×8 [54]	0.5	-55	0.07	4ms
MEMS 8×8 [53]	0.2-3.7	-50	0.4	12ms
Electro-optic 8×8 [55]	9	-30		5ns
Thermo-optic 8×8 [56]	8		0.5	3ms
Liquid crystals 2×2 [57]	1.4	-50	0.2	5ms
Bubble 2×2 [58]	2.5-7.5	-50	0.3	10ms
Acousto-optic 1×N [59]	6	-35		3μs

七.光衰减器

通信系统中光功率的动态控制，DWDM 系统中信道功率的均衡，以及一些测试系统中，均需用到光衰减器。作为光无源器件中的重要一部分，光衰减器的种类多种多样，大体可分为固定光衰减器和可变光衰减器（VOA）；而可变光衰减器又大致分为手调可变光衰减器和电调可变光衰减器（EVOA）；EVOA 因其实时可调特性，在通信系统中大量需求。与光开关类似，光衰减器因实现方式的多样性，无法尽述，此处仅列举一些种类。

1. 固定光衰减器

1) 光纤位移型光衰减器^[2]

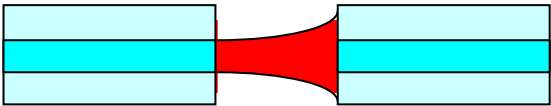


图 42. 光纤轴向位移型光衰减器

图 42 所示是一种光纤轴向位移型光衰减器，通过精密的机械结构将两根光纤拉开一定间距，实现光功率衰减，其衰减量与间距的关系可参照图 2（d）。光纤轴向位移型光衰减器可制成光纤适配器结构。

利用光纤径向的相对位移也可以制作光衰减器，但机械结构相对复杂，工艺难度较大。

2) 直接镀膜型光衰减器^[2]

在光纤端面直接镀金属吸收膜或者反射膜来实现光功率衰减，也可以制成光纤适配器结构的光衰减器。

3) 光纤拉锥型光衰减器

用制作光纤耦合器的熔融拉锥机，将一根光纤拉成锥状，同时监控衰减值，达到目标值时停火，可以制成固定光衰减器。光纤拉锥部分非常脆弱，需要特别保护，可以沿用光纤耦合器工艺，制成类似光纤耦合器外观的在线式光衰减器；也可以另行设计工艺，制成光纤适配器结构的光衰减器。



图 43. 光纤拉锥型光衰减器

光纤拉锥型光衰减器中，光通过锥区之后，会激励出一些高阶模式，制成光纤适配器结构时，则在近端和远端测得的衰减值不同，因为这些高阶模式在通过一段光纤到达远端时会衰减掉。因此在制作适配器结构的拉锥型光衰减器时，需对拉锥区作特殊工艺处理，使近端和远端测试衰减值相同，而制成光纤耦合器结构的光衰减器时则不存在此问题，因为其尾纤会将高阶模滤除。

4) 衰减光纤型光衰减器

目前已经有厂家提供衰减光纤，通过掺杂，使单位长度的衰减值为某特定值。光纤适配器的尺寸已经有标准规定，针对适配器尺寸制作一系列衰减值的光纤，则可用衰减光纤制作各种衰减值的光衰减器。

2. 可变光衰减器

与固定式光衰减器不同，可变光衰减器引入许多参数指标，主要有：插入损耗，即衰减值调至最小的损耗值；衰减范围；衰减精度；衰减值与波长相关性；调节速度，即调至某衰减值所需时间，此项适用于 EVOA。

1) 衰减片型光衰减器^[2]

图 44 为一个步进双轮式 VOA，两个圆盘上分别装有几个衰减片，用步进马达驱动相应衰减片至光路中，即可实现不同衰减值组合。如果衰减片的衰减值分别为 0dB、5dB、10dB、15dB、20dB、25dB，则可获得 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50dB 等十档衰减值；如果衰减片分别为 0dB、10dB、20dB、30dB、40dB、50dB 和 0dB、2dB、4dB、6dB、8dB、10dB，则可获得 2-60dB 的衰减范围，步进衰减精度为 2dB。

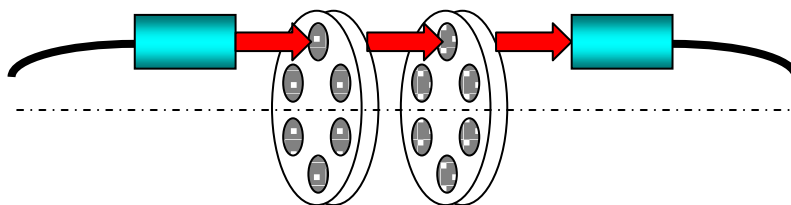


图 44. 步进双轮式可变光衰减器

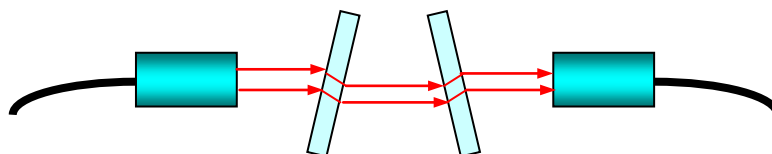


图 45. 双轮连续式可变光衰减器

图 45 为双轮连续式 VOA，第一个圆盘的衰减片为 0dB、10dB、20dB、30dB、40dB、50dB 六档，第二个圆盘上镀连续变化的衰减膜，即沿圆周方向衰减膜厚度连续均匀变化，相应衰减在 0~15dB 内连续变化。

2) 挡光型光衰减器

挡光型光衰减器如图 46 所示，驱动挡光元件拦在两个准直器之间，实现光功率的衰减。挡光元件可以是片状或者锥形，后者可通过旋转来推进，而前者需平推或者通过一定机械结构实现旋转至平推动作的转换。挡光型光衰减器可以制成光纤适配器结构，也可以制成图 46 所示的在线式结构，通过扳手旋转螺丝来调节衰减量。

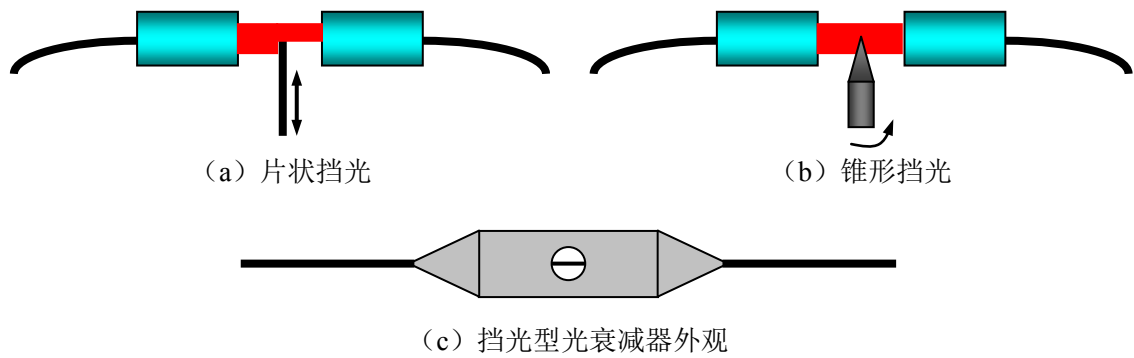


图 46. 挡光型可变光衰减器

3) 液晶光衰减器^[2]

图 47 所示为液晶可变光衰减器，不加电压时，液晶对偏振光的偏振面旋转 90° ，入射光在第一个 Displacer 中被分开为 o 光和 e 光传播，被液晶旋光后在第二个 Displacer 中分别转换为 e 光和 o 光，合成一束，耦合进入输出准直器，因此无衰减。当给液晶加电压时，旋光角 θ 不再是 90° ，根据马吕斯定律，透射率为 $\sin^2\theta$ ，其他光被衰减掉。

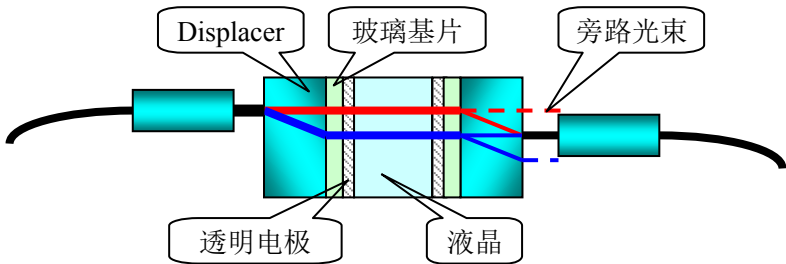
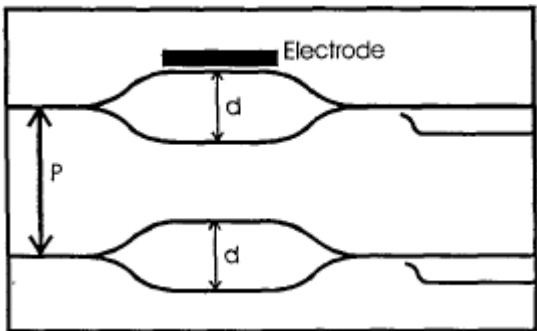


图 47. 液晶可变光衰减器

4) 热光衰减器^[25]

图 48 所示为一种热光衰减器，采用 Mach-Zehnder 结构，在一个干涉臂上制作电极，通过热光效应产生位相差 δ ，光透射率为 $\cos^2(\delta/2)$ ，其他光衰减掉。该衰减器用 PLC 实现，可以做成光衰减器阵列，具有集成优势，比如用于 AWG 的通道均衡。



5) MEMS 光衰减器

MEMS光衰减器是EVOA的研究热点，图 49 所示为Santec公司的MEMS光衰减器方案，两个光纤准直器通过反射镜实现耦合，利用静电驱动反射镜旋转角度，实现光功率衰减，其插损小于 0.8dB，衰减范围达 40dB，响应时间小于 5ms^[26]。

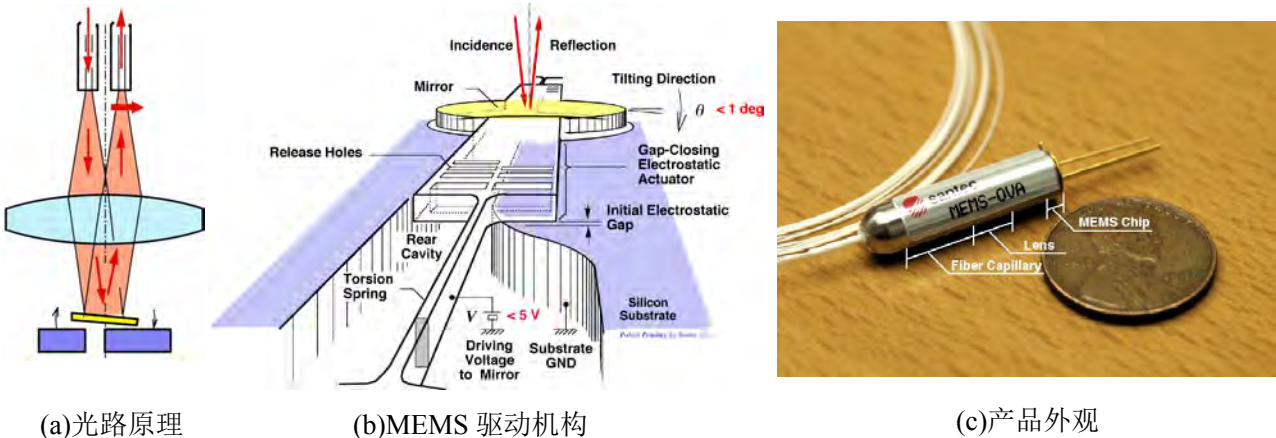


图 49. Santec 公司 MEMS EVOA

图 50 所示是一种挡光型MEMS EVOA，两根光纤精确定位在V型槽中，通过电磁力驱动挡光片，拦在两根光纤之间，实现光功率衰减^[27-29]。

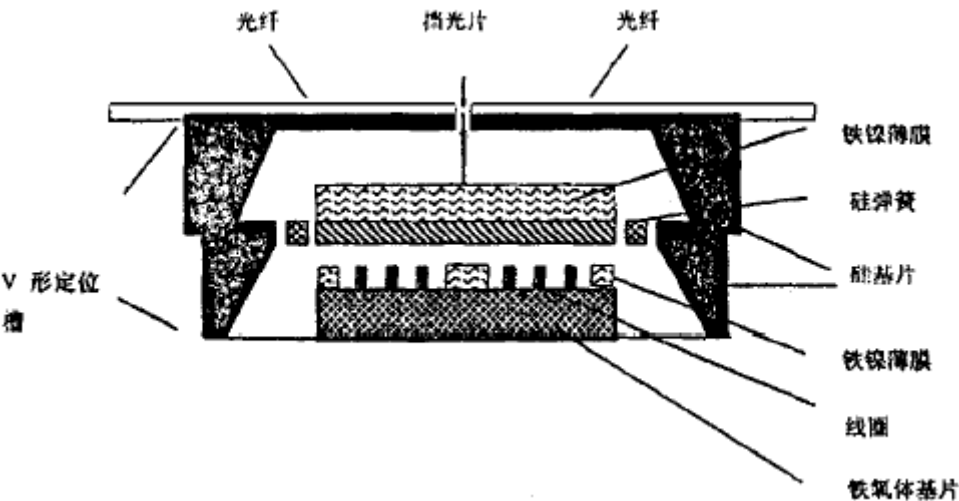


图 50. 挡光型 MEMS EVOA

八. 光纤熔融拉锥器件

如图 51 所示，将两根光纤绞在一起，加热至熔融状态，并同时缓慢拉伸光纤，可以制成各种光纤熔融拉锥器件（FBT）。FBT 属于全光纤型器件，具有损耗小和体积小的优点，在光通信系统中得到广泛应用。下面简要介绍 FBT 器件的基本原理和各种具体器件实现原理，对

FBT 理论有兴趣的读者可以依序往下看，并找到相应参考文献阅读，如果只想了解各种具体 FBT 器件大致原理，可以跳跃至双光纤融锥区的近似模型部分。

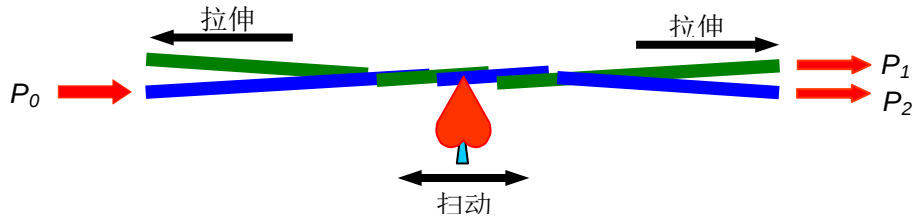


图51. 光纤熔融拉锥过程

1. FBT 器件基本原理

1) 模耦合方程^[30]

分析 FBT 器件的最基本原理是模耦合理论，假如一段波导中可以传输多个模式，当存在微扰时（可以是外界电磁场、应力、波导直径变化等），这些模式之间将发生能量交换，能量交换过程可以用（44）式所示的模耦合方程描述。

$$\frac{dA_p(z)}{dz} + i\beta_p A_p(z) = i \sum_q C_{pq} A_q(z) \quad (44)$$

式中所描述的是模式 p 与其他模式之间的能量交换，其中 $A_p(z)$ 和 $A_q(z)$ 是模式 p 和模式 q 的光场分布，随轴向位置 z 变化； β_p 是模式 p 的传播常数； C_{pq} 是模式 p 和模式 q 之间的耦合系数，与两个模式的传播常数差有关，差值越小则耦合系数越大。

2) Stewart-Love判据^[31-32]

光纤融锥区直径逐渐减小，如果直径变化太快，则会有高阶模式被激励而产生损耗，而如果直径变化缓慢，则不会产生损耗。判断光纤锥区直径变化快慢，可以采用 Stewart-Love 判据，如（45）式所示。

$$\left| \frac{d\rho}{dz} \right| \ll \frac{\rho}{z_b}, \quad z_b = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \quad (45)$$

其中 ρ 为光纤锥区任一位置的纤芯半径， z_b 为两个最低阶模式 HE_{11} 模和 HE_{12} 模之间的拍长， $\Delta\beta$ 为二者的传播常数差。

当光纤直径变化速率小于 Stewart-Love 判据时，称为绝热锥区，不会发生能量损失；当光纤直径变化速率大于 Stewart-Love 判据时，称为非绝热锥区，因激励出高阶模式而产生损耗。光纤融锥耦合器采用绝热锥区以得到低损耗的器件，光纤融锥衰减器（在第七部分提到）和光纤融锥滤波器（如用于 EDFA 的增益均衡）采用非绝热锥区。

3) 单光纤融锥区^[33]

我们先对单光纤融锥区进行分析，这有助于理解双光纤融锥区情况。图 52 所示是一段单光纤融锥区，它可以分成 A、B、C 三部分，分界点为 P、Q 两点。当光纤直径逐渐减小时（纤芯直径等比例减小），归一化截止频率同时减小，纤芯中的模场逐渐扩大；在 P、Q 点归一化频率减至单位值 1，如（46）式所示，此时模场不再限制于纤芯中传输，而是转换至包层/空气构成的波导中传输，纤芯的作用则可以忽略。注意用包层/空气波导近似来分析光纤融锥区是 FBT 器件最重要的理论之一，并与实际符合得很好。

$$V_{core} = \frac{2\pi\rho_{core}}{\lambda} \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} = 1 \quad (46)$$

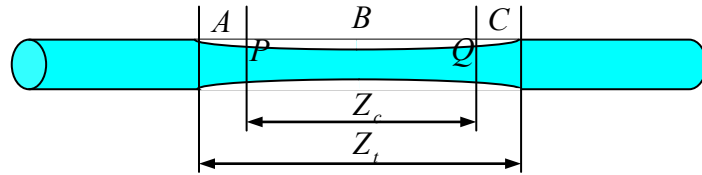


图 52. 单光纤融锥区

光从A区进入B区，由纤芯/包层波导模式转换为包层/空气波导模式。我们注意到，包层/空气折射率差远较纤芯/包层折射率差大，而B区的直径也较纤芯直径大，因此B区包层/空气波导的归一化频率远大于 1，为多模波导。在B区的起点P只有最低阶模式 HE_{11} 被激励，之后将与其他模式之间发生能量耦合，其中最主要是与临近模式 HE_{12} 之间的耦合，因为二者的传播常数最接近。到达Q点时，只有剩余的 HE_{11} 模能够被输出光纤重新俘获为纤芯/包层模式，耦合到 HE_{12} 模中但还没有回到 HE_{11} 模中的能量（模式间的能量耦合是相互的）将成为单模的C区及其后光纤中的高阶模式而损耗掉。单光纤融锥区的 HE_{11} 模和 HE_{12} 模在截面中的分布如图 53 所示。

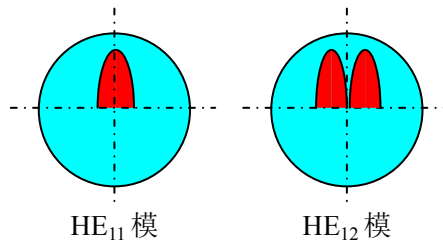


图 53. 单光纤融锥区的 HE_{11} 模和 HE_{12} 模

HE_{11} 模与 HE_{12} 模在B区的耦合可能发生几个循环，取决于二者之间的耦合系数及B区长度，因此单光纤融锥区对入射光的透过率与拉锥长度相关，以一定拍长循环。 HE_{11} 模与 HE_{12} 模之间的耦合拍长与波长相关，因此单光纤融锥区的透射率也是波长相关的。另外， HE_{11} 模与 HE_{12} 模之间的耦合随外界媒质变化，如浸泡在匹配液中形成包层/匹配液波导，而不是包层/空气波导，因此透射率也发生变化。

4) 双光纤融锥区

与单光纤融锥区相似，双光纤融锥区也可以分成三部分，如图 54 所示，在 P 点由纤芯/包层模式转换为包层/空气模式，在 Q 点被重新俘获为纤芯/包层模式。与单光纤融锥区不同的是，双光纤融锥区的 B 区是椭圆形，发生模式耦合的是偶模和奇模，其模场在椭圆截面中的分布如图 55 所示。

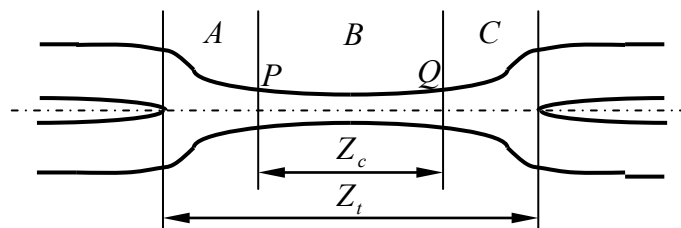


图 54. 双光纤融锥区

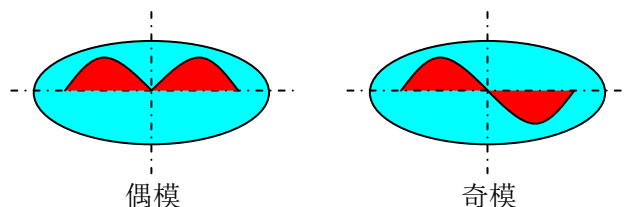


图 55. 双光纤融锥区的偶模和奇模

5) 双光纤融锥区的近似模型^[35]

特别说明，以下内容基本取自文献[35]。

光纤融锥区的直径，可用图 56 所示的模型近似，其中 W 为加热源如火头的宽度（对来回扫动的加热源可等效为某一宽度）， L 为单侧拉伸长度，假设在 W 宽度之内的锥区直径为常数，在两边则按指数规律增加，根据体积守恒条件，得到光纤各部分的直径如（47）式所示。

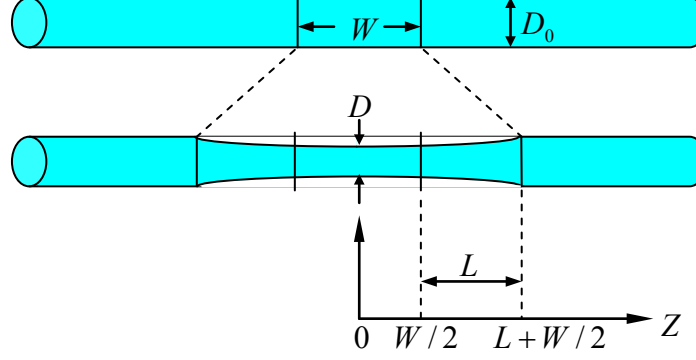


图 56. 光纤融锥区的光纤直径变化

$$D = \begin{cases} D_0 \exp\left(-\frac{L}{W}\right) & |Z| \leq W/2 \\ D_0 \exp\left(\frac{|Z| - L - W/2}{W}\right) & W/2 \leq |Z| \leq L + W/2 \\ D_0 & |Z| \geq L + W/2 \end{cases} \quad (47)$$

两根光纤绞在一起熔融拉锥，模式的耦合发生在 W 宽度之内，耦合功率为^[34-35]：

$$P = F^2 \sin^2\left(\frac{CZ}{F}\right) \quad (48)$$

其中 C 为耦合系数， F^2 为最大耦合比， Z 为耦合区长度，此处 $Z=W$ 。

$$C = 0.021 \frac{\lambda^{2.5}}{r^{3.5}} \quad (49)$$

$$F^2 = \left[1 + \left(\frac{234r^3}{\lambda^3} \right) \left(\frac{\Delta r}{r} \right)^2 \right]^{-1}, \quad r = r_0 \exp\left(-\frac{L}{W}\right) \quad (50)$$

其中 r 为耦合区光纤半径， Δr 为两光纤半径的差值，另外取参数值为，光纤归一化截止频率 $V=2.405$ ，纤芯折射率 $n_{core}=1.46$ 。从（50）式可以看到，当耦合区两根光纤的半径相同时，最大耦合比为 1，当两根光纤半径不相同，最大耦合比小于 1。

以上近似模型与实际情况稍有差异，比如锥区 W 宽度内的光纤直径为常数和耦合发生在 W 宽度内这两个假设，实际情况是，光纤直径是渐变的，耦合发生在图 54 中的 P、Q 两点之间，但这并不影响近似模型的意义。因为 P、Q 两点之间的模式耦合系数处处不同，其耦合功率需要采用数值计算，不利于对耦合规律的分析；而如果将其等效为一段均匀耦合系数的锥区，耦合系数为实际耦合系数的加权平均值，即为近似模型，得到（48）式所示的耦合规律，以利于进一步分析各种 FBT 器件的原理。

2. FBT 器件

取 $W=2\text{mm}$, $D_0=50\mu\text{m}$ (对光纤预刻蚀), $\Delta r=0$, 由(48)式得到耦合比随拉伸长度变化关系, 如图 57 所示。我们看到, 1550nm 比 1310nm 先发生耦合, 随着拉伸长度增加, 耦合比在 0 与 100% 之间循环且循环频率越来越快, 并发生 1550nm 与 1310nm 的谱线交错, 即 1550nm 的第 $n+1$ 次循环先于 1310nm 的第 n 次循环。以图 57 为参考, 我们依次介绍各种 FBT 器件的原理。

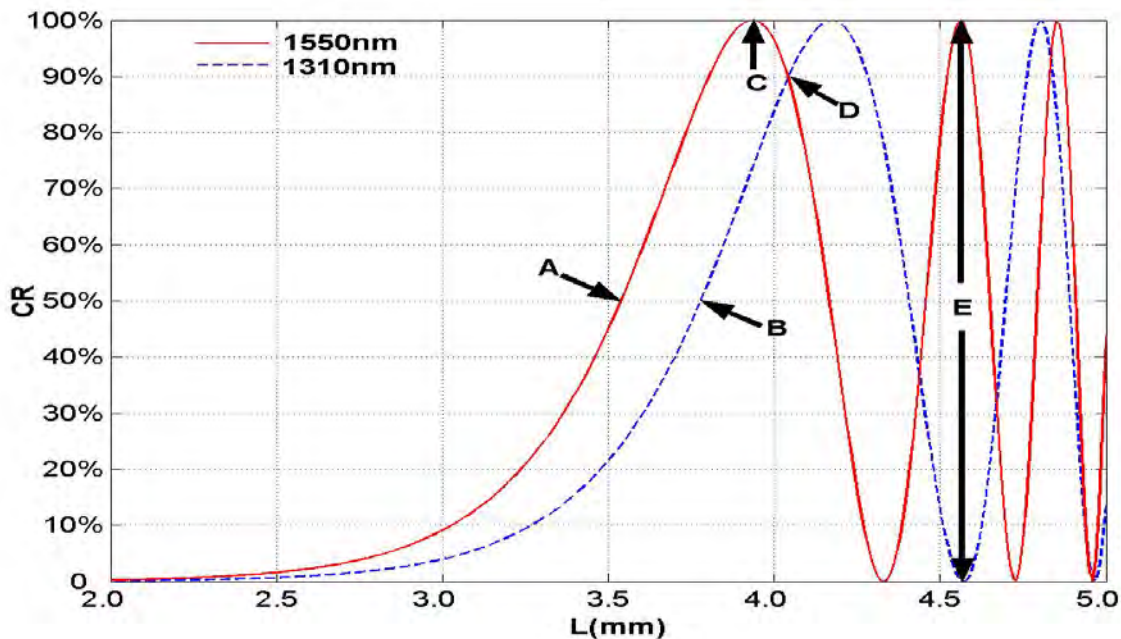


图 57. 耦合比随拉伸长度变化规律

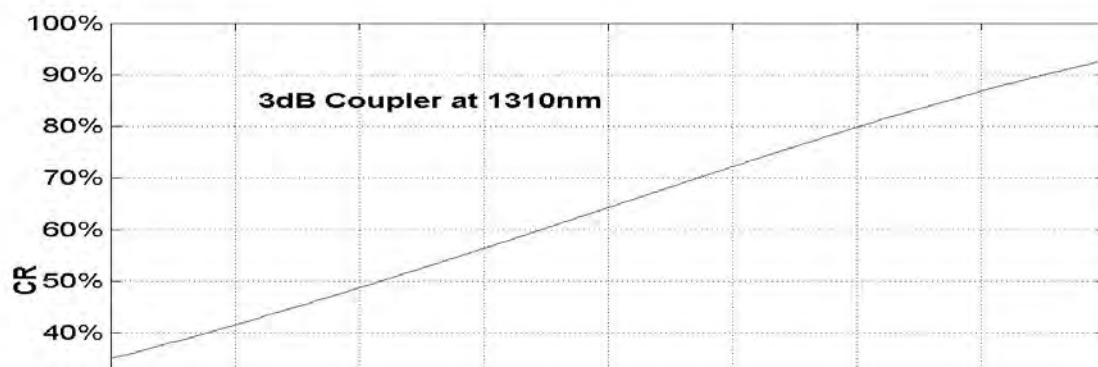
1) 单窗窄带耦合器

如图 57 所示, 制作 Coupler 时, 在 A 点停止拉伸和加热, 则得到一个 1550nm 的 3dB 耦合器, 在 B 点停止, 则得到一个 1310nm 的 3dB 耦合器。图 58 所示为一个 1310nm 的 3dB 耦合器 (B 点对应拉伸长度 3.78mm) 的波长相关性, 我们看到, 耦合比随波长近似线性变化, 满足耦合比为 $50\% \pm 3\%$ 的带宽仅为 $1310\text{nm} \pm 20\text{nm}$, 我们称之为单窗窄带耦合器。

2) 单窗宽带耦合器

如图 57 所示, 如果在 C 点停止拉伸和加热, 则得到一个 1550nm 的耦合比为 100% 的耦合器, 当然, 耦合比为 100% 的 Coupler 没有实际用途, 但我们观察到 C 点处于曲线转折点, 其波长相关性较好。如果采用非对称的两根光纤进行耦合, 使最大耦合比降至 50% 附近, 如图 59 所示, 其中取两光纤半径差值为 $\Delta r/r=0.0158$ 。

选择在图 59 中的 P 点 (对应拉伸长度 4.04mm) 停火, 则得到一个 1310nm 的宽带 3dB 耦合器, 其波长相关性如图 60 所示。我们看到其波长相关性较窄带耦合器有很大改善, 耦合比满足 $50\% \pm 3\%$ 的带宽达 $1310\text{nm} \pm 90\text{nm}$ 。



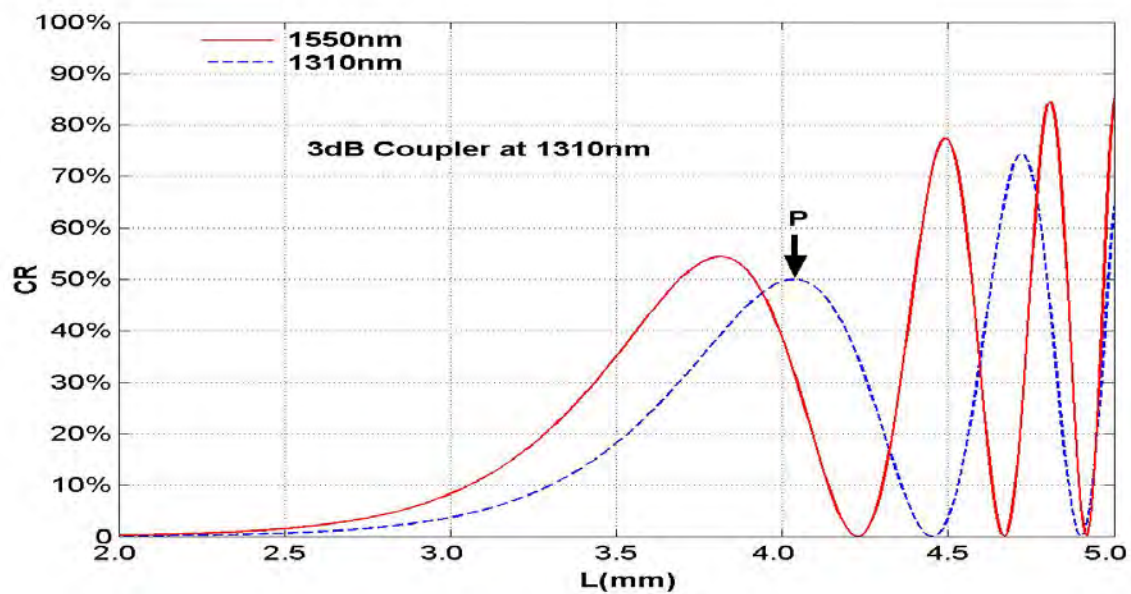


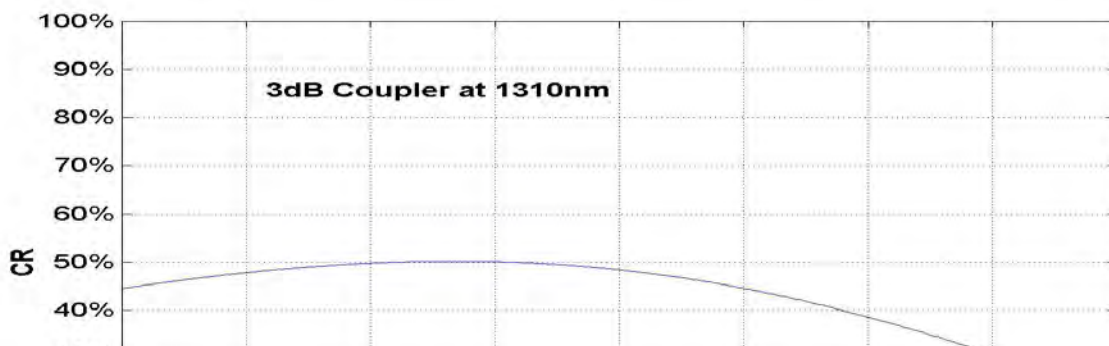
图 59. 1310nm 宽带 3dB 耦合器的停火点选择

3) 双窗宽带耦合器

在图 57 中的 D 点，1310nm 和 1550nm 具有相同的耦合比 90%，如果采用非对称的两根光纤进行耦合，使 D 点降至 50% 附近，如图 61 所示，其中取两光纤半径差值为 $\Delta r/r=0.015$ 。选择在 D 点停火（对应拉伸长度为 3.96mm），则得到 1310nm/1550nm 双窗宽带 3dB 耦合器，其波长相关性如图 62 所示，耦合比满足 $50\% \pm 3\%$ 的带宽达 $1310\text{nm} \pm 40\text{nm}$ 和 $1550\text{nm} \pm 40\text{nm}$ 。该耦合器在 1250nm 至 1600nm 的 350nm 带宽内耦合比满足 $50\% \pm 6\%$ ，因此被称为波长无关型耦合器（WIC）。

4) FBT 波分复用器

我们再来考察图 57，如果选择在 E 点停火（对应拉伸长度 4.56mm），则 1550nm 的光全部耦合到另一根光纤中，而 1310nm 的光留在原光纤中，这样就得到一个 1310/1550nm 的波分复用器，如图 63 所示，注意由于参数调整未到位，短波段的中心波长偏至 1320nm 而不是 1310nm。



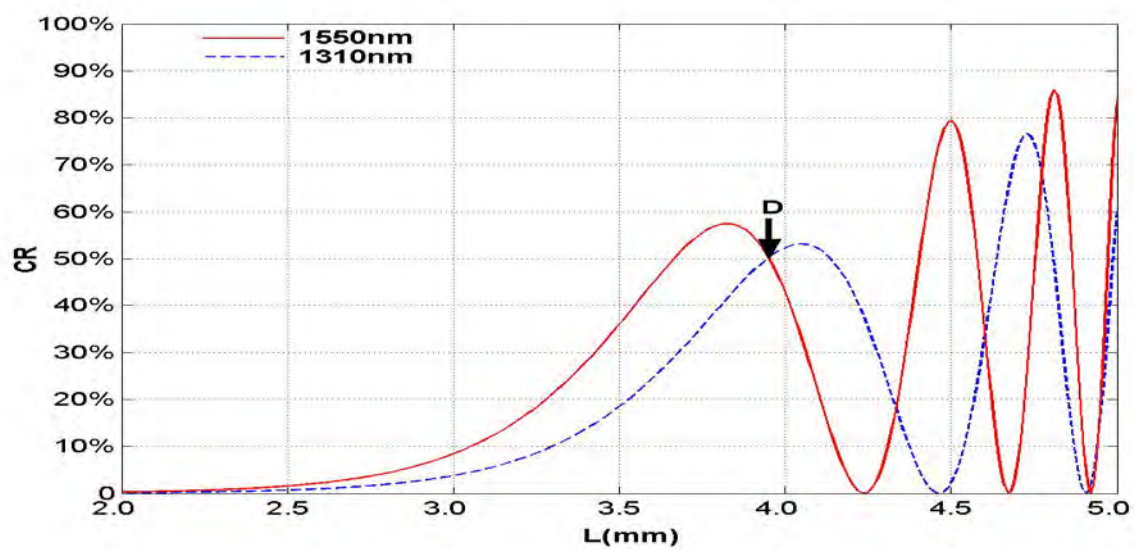


图 61. 1310nm/1550nm 双窗宽带 3dB 耦合器的停火点选择

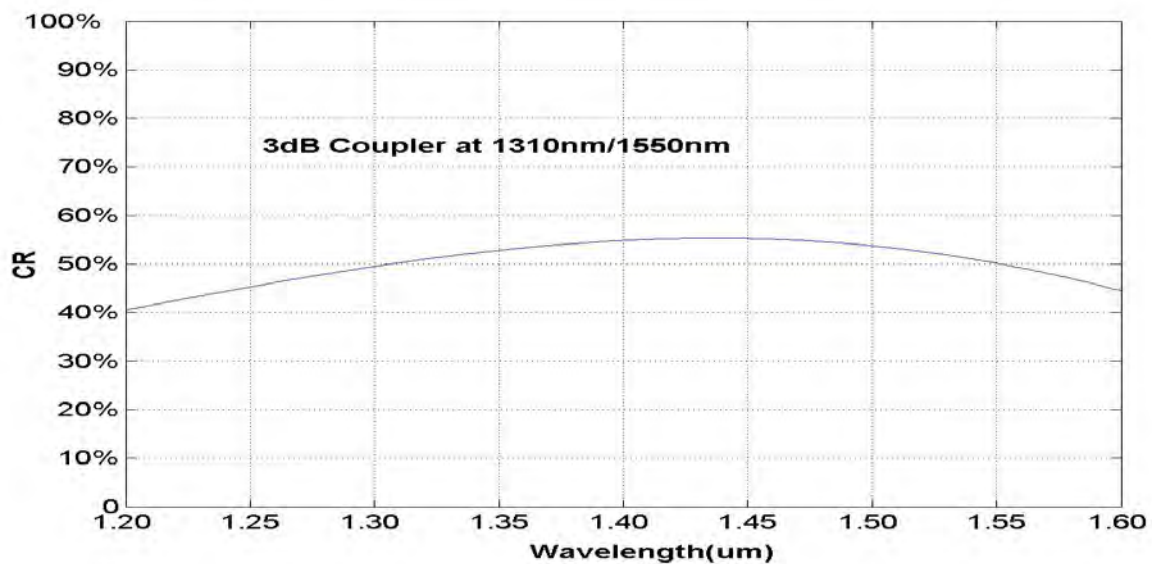


图 62. 1310nm/1550nm 双窗宽带 3dB 耦合器的波长相关性



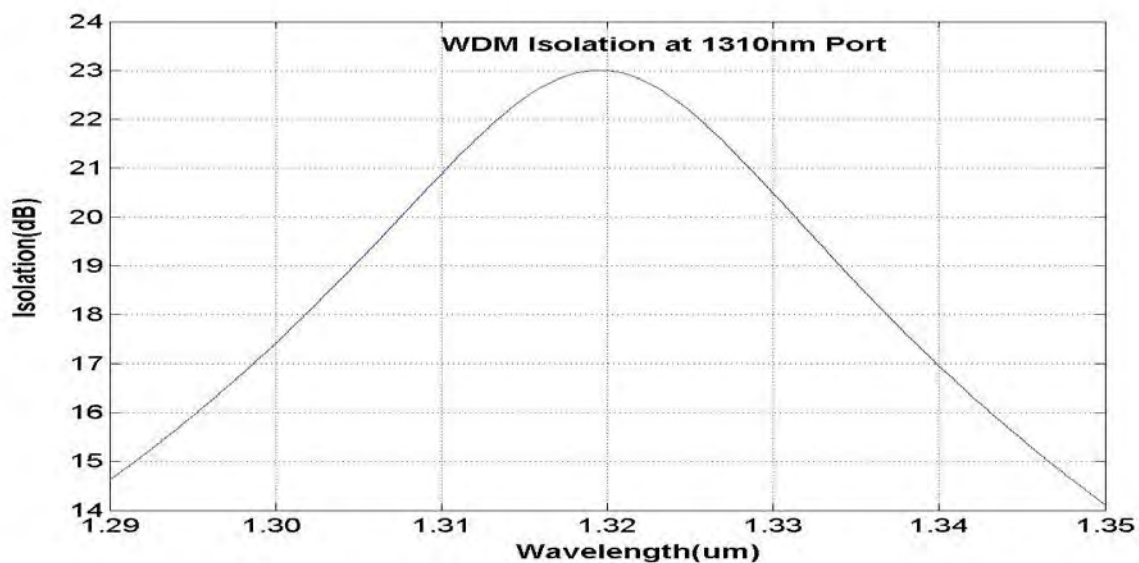


图 64. FBT 型 WDM 的隔离度

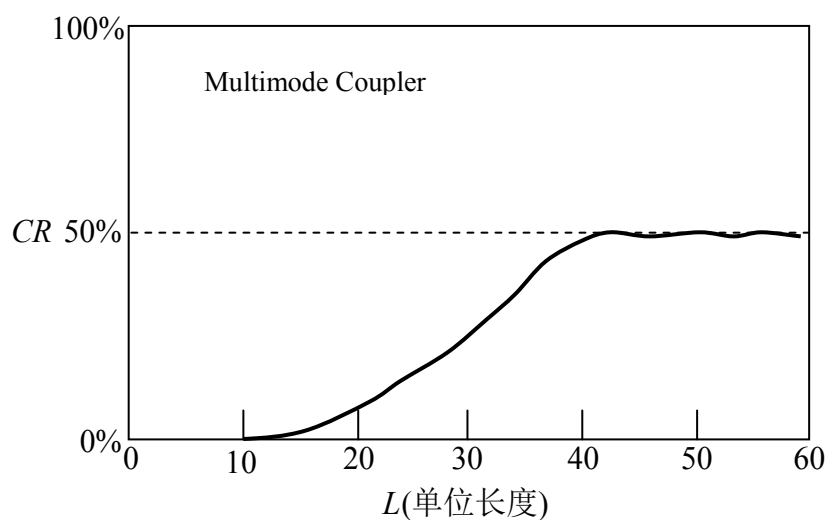


图 65. 多模光纤耦合器的耦合比与拉伸长度关系示意图

FBT 型 WDM 的隔离度如图 64 所示, 其中考虑在实际工艺中, 耦合比不可能达到 100%, 取为 99.5%, 这是一般能够达到的指标。我们看到, 在中心波长附近隔离度迅速下降, 考虑到中心波长漂移等实际情况, 一般公司保证的指标是在中心波长 $\pm 15\text{nm}$ 内, 隔离度大于 16dB。常采用两级 WDM 串联, 以进一步滤波, 提高隔离度。两级串连的 WDM, 使其中心波长反

向偏移相同波长,比如分别取 1290nm/1530nm 和 1330nm/1570nm,可以得到较平坦的隔离度,在 50nm 带宽内的隔离度大于 30dB。

5) 多模光纤耦合器

多模光纤融锥区的耦合机制与单模光纤是类似的,其差异在于有更多模式参与耦合,其耦合比与拉伸长度的关系如图 65 所示。起初耦合比随拉伸长度近似线性增加,达到 50%时便不再增加,而是稳定在 50%附近,稍有起伏。原因是许多模式参与耦合,而其耦合的拍长各不相同,某些模式的耦合比增加,而另一些模式的耦合比正在减少,大量模式耦合比的统计结果是使总耦合比稳定在 50%附近。

多模光纤耦合器表现出很好的带宽特性,可以做到在 800nm~1700nm 共 900nm 的带宽内,耦合比为 50%±5%。其原因与上面介绍的情况类似,也是由于大量模式耦合比的统计特性抵消了单个模式耦合比的波长相关性。

九. 全文总结

本文介绍了应用于光通信中的各种光无源器件技术原理、特点,对部分作者较熟悉的技术则有较深入的分析和工艺考虑,如光纤头、光纤准直器、光纤连接器、光隔离器、光环形器和 Filter 型波分复用器等。

参考文献

- [1] Michael S.Borella, Jason P.Jue, Dhritiman Banerjee, et al, "Optical Components for WDM Lightwave Networks", Proc. IEEE, 85(8), 1997, pp1274-1307.
- [2] 林学煌, 光无源器件, 人民邮电出版社, 北京, 2000 第二版, pp169.
- [3] 国分泰雄, 光波工程, 科学出版社, 北京, 2002, pp222.
- [4] Shifu Yuan, Nabeel A. Riza, "General Formula for Coupling-Loss Characterization of Single-Mode Fiber Collimators by Use of Gradient-Index Rod Lenses", App. Opt., 38(15), 1999, pp3214-3222.
- [5] 梁铨廷, 物理光学, 机械工业出版社, 北京, 1987 第二版, pp290-355.
- [6] 张晟, 黄德修, 殷东亮等, 一种新型偏振分光棱镜的设计和应用, 光电工程, 30 (1), 2003, pp46-49
- [7] Shirasaki, Masataka. Optical Device. USA, US004548478, 1985. 1~5
- [8] 虞国华, 刘水华, 方罗珍等. 偏振无关的楔形光隔离器插入损耗与反向隔离度分析. 光学学报, 1997, 17 (8): 1108~1112
- [9] 万助军, 曹明翠, 季杭峰等, 在线式双级光隔离器的隔离度分析, 中国激光, A29 (11), 2002, pp995-999.
- [10] S.Cao, J.Chen, J.N. Damask, et al, "Interleaver Technology: Comparisons and Applications Requirements", OFC'03 Interleaver workshop review Paper.
- [11] S.E. Harris, E.O. Ammann, I.C. Chang, "Optical Network Synthesis Using Birefringent Crystals.* I. Synthesis of Lossless Networks of Equal-Length Crystals", J. OSA, 54(10), 1964, pp1267-1279.
- [12] Kaname Jingui, Masao Kawachi, "Synthesis of Coherent Two-Port Lattice-Form Optical Delay-Line Circuit", J. Lightwave Tech., 13(1), 1995, pp73-82.
- [13] Georgios I.Papadimitriou, Chrissoula Papazoglou, Andreas S.Pomportsis, "Optical Switching: Switch fabrics, Techniques, and Architectures", J. Lightwave tech., 21(2), 2003, pp384-405.
- [14] Optical Transmission Systems-Technology Overview, 网络下载书籍, pp12-20.

- [15] Joseph Ford, James Walker, Keith Goossen, “Optical MEMS: Overview & MARS Modulator”, Lucent technologies, 网络下载演示稿, pp5.
- [16] Xiaobo Hou, “MEMS Optical Switches”, 网络下载演示稿, 2003
- [17] Xuezhong Zheng, Volkan Kaman, Shifu Yuan, et al, “Three Dimensional MEMS Photonic Cross-Connect Switch Design and Performance”, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, 9(2), 2003, pp571-578.
- [18] Ming C.Wu, “Advanced MEMS Devices and Systems”, Department of Electrical Engineering and California NanoSystem Institute, UCLA, 网络下载论文.
- [19] John Bowers, “All Optical Networks”, Dept. of ECE, UCSB, 网络下载演示稿.
- [20] Penny Beebe, Joseph M.Ballantyne, Meng Fai Tung, “An Introduction to MEMS Optical Switches”, 网络下载课件.
- [21] Luisa F.Soaterna, “Design and Demonstration of a Ferroelectric Optical Switch”, Virginia State University, 网络下载论文.
- [22] Robert J.Runser, Deyu Zhou, Christine Coldwell, “Interferometric Ultrafast SOA-Based Optical Switches: from Devices to Applications”, Optical and Quantum Electronics, 33, 2001, pp841-874.
- [23] John Grade, Hal Jerman, “MEMS Electrostatic Actuators for Optical Switching Applications”, ioIon, Inc., 2001, 网络下载演示稿.
- [24] Hans Melchior, “Integrated Devices for Optical Processing”, OFC2000 Tutorial.
- [25] Xavier Orignac, “First Ion-Exchanged Dual Thermo-Optic Variable Optical Attenuator”, ICTON’99, pp89-92.
- [26] H. Toshiyoshi, K. Isamoto, A. Morosawa, M. Tei, and H. Fujita, “A 5-Volt Operated MEMS Variable Optical Attenuator”, the 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, 2003, pp1768-1771.
- [27] 赵小林, 李文军, 周光亚, 张明生, 蔡炳初, “电磁驱动 MEMS 可调式光衰减器的设计”, 微细加工技术, 2000 年第 4 期, pp60-67.
- [28] 赵小林, 李文军, 周光亚, 张明生, 蔡炳初, “电磁驱动 MEMS 可调式光衰减器的研制”, 微细加工技术, 2000 年第 4 期, pp56-59.
- [29] 李文军, 赵小林, 蔡炳初, “一种新型的微机械可变式光衰减器”, 高技术通信, 2003 年第 3 期, pp52-55.
- [30] Allan W.Snyder, “Coupled Mode Theory for Optical Fibers”, J. OSA, 62(11), 1972, pp1267-1277.
- [31] Suzanne Lacroix, Roch Bourbonnais, Francois Gonthier, and Jacques Bures, “Tapered Monomode Optical Fibers: Understanding Large Power Transfer”, App. Opt., 25(23), 1986, pp4421-4425.
- [32] Francois Gonthier, Jean Lapierre, Christian Veilleux, Suzanne Lacroix, and Jacques Bures, “Investigation of Power Oscillations Along Tapered Monomode Fibers”, App. Opt., 26(3), 1987, pp444-449.
- [33] Daniel T.Cassidy, Derwyn C.Johnson, and Kenneth O.Hill, “Wavelength-Dependent Transmission of Monomode Optical Fiber Tapers”, App. Opt., 24(7), 1985, pp945-950.
- [34] Adrian Ankiewicz, Allan W.Snyder, and Xue-heng Zheng, “Coupling Between Parallel Optical Fiber Cores-Critical Examination”, J. Lightwave Tech., 4(9), 1986, pp1317-1323.
- [35] V.J. Tekippe, “Passive Fiber-Optic Components Made by The Fused Biconical Taper Process”, Fiber and Integrated Optics, 9(2), 1990, pp97-123.