1,先進國家極力的發展太空雷射武器，以雷射原理說明其可行性與關鍵問題？(20%)
ANS: 雷射武器從攻擊目標來說，分為硬破壞雷射武器和軟破壞雷射武器兩類。軟破壞雷射武器專門損害人的眼睛和光電感測器等敏感而脆弱的東西，硬破壞雷射武器則可直接毀傷飛機、導彈等武器裝備。

　　硬破壞雷射武器研製工作的重點在發展高能雷射裝備（如二氧化碳氣動雷射器、氟化氫化學雷射器等），以掌握高能雷射是如何對金屬、非金屬材料造成破壞，以及生產雷射精密瞄準－跟蹤裝置等。此類武器使用來攻擊敵人裝備，特別是飛機、直昇機和飛行中的火箭、飛彈等。

　　軟破壞雷射武器主要在研製傷害人眼、破壞光電感測器的武器，發展利用飛機裝載所謂先進的光學干擾吊艙，並推出一種稱為「勸阻器」的掌上型雷射武器。它能擾亂人的視覺，達到「眩目」的效果，使人暫時喪失行為能力，而且它只有一公斤重，使用起來很方便。

    雷射除了運用在一般武器系統上，更被積極發展成為反衛星的武器。1997年10月17日美國在新墨西哥州白沙飛彈試驗場，進行了首次雷射反衛星試驗，這類武器利用高能雷射光來影響或破壞衛星的運作功能，對目前極度依賴衛星的高度資訊化戰爭而言，是十分重要的運用。除了從地面上發射雷射外，目前已積極研究將雷射發射器送上太空軌道，直接由太空中進行攻擊。

　　雷射核聚變是目前雷射研究領域的尖端技術。簡單地說就是利用雷射照射核燃料，促使這些燃料發生核聚變反應。目前它的主要功能，是幫助科學家逼真地模擬核爆炸中的各種物理效應。以往要運用原子彈來引爆氫彈產生核融合，未來有可能運用雷射充當新型點火裝置。

2.光纖在現代通訊具有相當重要發展，請說明光纖使用雷射波長範圍為何限定在近紅外範圍？請從材料、光學原理說明(20%)
ANS: **光導纖維**，簡稱**光纖**(Optical fiber)。光纖是一種導致[光](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%22%20%5Co%20%22%E5%85%89)在[玻璃](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%8E%BB%E7%92%83)或[塑料](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A1%91%E6%96%99)製成的[纖維](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%BA%A4%E7%BB%B4)中，以[全反射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%A8%E5%8F%8D%E5%B0%84)原理傳輸的[光傳導](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E5%82%B3%E5%B0%8E&action=edit&redlink=1)工具。微細的光纖封裝在塑料護套中，使得它能夠[彎曲](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BD%8E%E6%9B%B2)而不至於[斷裂](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%96%B7%E8%A3%82&action=edit&redlink=1)。通常光纖的一端的[發射](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%99%BC%E5%B0%84&action=edit&redlink=1)裝置使用[發光二極體](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BC%E5%85%89%E4%BA%8C%E6%A5%B5%E9%AB%94)或一束[雷射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%BF%80%E5%85%89)將[光脈衝](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E8%84%88%E8%A1%9D&action=edit&redlink=1)傳送至光纖，光纖的另一端的接收裝置使用[光敏元件](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E6%95%8F%E5%85%83%E4%BB%B6&action=edit&redlink=1)檢測[脈衝](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%84%88%E8%A1%9D&action=edit&redlink=1)。包含光纖的線纜稱為**光纜**。由於光在光導纖維的傳輸損失比電在[電線](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%94%B5%E7%BA%BF)傳導的[損耗](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8D%9F%E8%80%97)低得多，更因為主要生產原料是[矽](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%9F%BD)，[蘊藏量](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%98%8A%E8%97%8F%E9%87%8F&action=edit&redlink=1)極大，較易[開採](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%96%8B%E6%8E%A1&action=edit&redlink=1)，所以價格很便宜，促使光纖被用作長距離的[信息](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BF%A1%E6%81%AF)傳遞工具。隨著光纖的價格進一步降低，光纖也被用於[醫療](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%86%AB%E7%99%82)和[娛樂](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A8%9B%E6%A8%82)的用途。

光纖主要分為兩類，[漸變光纖](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%BC%B8%E8%AE%8A%E5%85%89%E7%BA%96&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[graded-index fiber](https://en.wikipedia.org/wiki/graded-index_fiber)）與[突變光纖](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%AA%81%E8%AE%8A%E5%85%89%E7%BA%96&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[step-index profile](https://en.wikipedia.org/wiki/step-index_profile)）。前者的[折射率](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%98%E5%B0%84%E7%8E%87%22%20%5Co%20%22%E6%8A%98%E5%B0%84%E7%8E%87)是[漸變](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%BC%B8%E8%AE%8A&action=edit&redlink=1)的，而後者的折射率是[突變](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%AA%81%E8%AE%8A)的。另外還分為[單模光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%96%AE%E6%A8%A1%E5%85%89%E7%BA%96)及[多模光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%9A%E6%A8%A1%E5%85%89%E7%BA%96)。近年來，又有新的[光子晶體](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%90%E6%99%B6%E4%BD%93)光纖問世。

光導纖維是雙重構造，核心部分是高折射率玻璃，表層部分是低折射率的玻璃或塑料，光在核心部分傳輸，並在表層交界處不斷進行全反射，沿「之」字形向前傳輸。這種纖維比[頭髮](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%B4%E5%8F%91%22%20%5Co%20%22%E9%A0%AD%E9%AB%AE)稍粗，這樣細的纖維要有折射率截然不同的雙重結構分布，是一個非常驚人的技術。各國科學家經過多年努力，創造了[內附著法](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%86%85%E9%99%84%E7%9D%80%E6%B3%95&action=edit&redlink=1)、[MCVD法](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=MCVD%E6%B3%95&action=edit&redlink=1)、[VAD法](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=VAD%E6%B3%95&action=edit&redlink=1)等等，製成了超高純[石英玻璃](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%9F%B3%E8%8B%B1%E7%8E%BB%E7%92%83)，特製成的光導纖維傳輸光的[效率](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%95%88%E7%8E%87&action=edit&redlink=1)有了非常明顯的提高。現在較好的光導纖維，其光傳輸損失每[公里](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%AC%E9%87%8C)只有零點二[分貝](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E8%B2%9D)；也就是說傳播一公里後只損失4.5％。

### 光纖是[圓柱形](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%93%E6%9F%B1%E5%BD%A2%22%20%5Co%20%22%E5%9C%93%E6%9F%B1%E5%BD%A2)的[介質波導](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%8B%E8%B3%AA%E6%B3%A2%E5%B0%8E)，應用[全反射原理](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%A8%E5%8F%8D%E5%B0%84%E5%8E%9F%E7%90%86&action=edit&redlink=1)來傳導光線。光纖的結構大致分為裏面的核心部分與外面的包覆部分。為了要局限光信號於核心，包覆的折射率必須小於核心的折射率。[漸變光纖](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%BC%B8%E8%AE%8A%E5%85%89%E7%BA%96&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[graded-index fiber](https://en.wikipedia.org/wiki/graded-index_fiber)）的折射率是緩慢改變的，從[軸心](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%BB%B8%E5%BF%83&action=edit&redlink=1" \o "軸心 (頁面不存在))到包覆，逐漸地減小；而[突變光纖](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%AA%81%E8%AE%8A%E5%85%89%E7%BA%96&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[step-index profile](https://en.wikipedia.org/wiki/step-index_profile)）在核心-包覆邊界區域的折射率是急劇改變的。折射率

折射率可以用來計算在物質裏的光線速度。在[真空](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA%22%20%5Co%20%22%E7%9C%9F%E7%A9%BA)裏，及[外太空](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%96%E5%A4%AA%E7%A9%BA)，光線的傳播速度最快，大約為3億[公尺](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%AC%E5%B0%BA%22%20%5Co%20%22%E5%85%AC%E5%B0%BA)／秒。一種物質的折射率是真空[光速](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F)除以光線在這[物質](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)裏傳播的速度。所以，根據定義，真空折射率是1。折射率越大，光線傳播的速度越慢。通常光纖的核心的折射率是1.48，包覆的折射率是1.46。所以，光纖傳導[訊號](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%A8%8A%E8%99%9F%22%20%5Co%20%22%E8%A8%8A%E8%99%9F)的速度粗算大約為2億公尺／秒。[電話](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%A9%B1%22%20%5Co%20%22%E9%9B%BB%E8%A9%B1)訊號，經過光纖傳導，從[紐約](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%90%E7%B4%84)到[雪梨](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%AA%E6%A2%A8)，大約12000公里距離，會有最低0.06秒[時間](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E9%96%93%22%20%5Co%20%22%E6%99%82%E9%96%93)的延遲。

### 全反射



雷射的反彈於一根[壓克力](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A3%93%E5%85%8B%E5%8A%9B%22%20%5Co%20%22%E5%A3%93%E5%85%8B%E5%8A%9B)棍內部，顯示出光線的[全反射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%A8%E5%8F%8D%E5%B0%84)。

當移動於[密度](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%86%E5%BA%A6)較高的介質的光線，以大角度[入射](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%A5%E5%B0%84&action=edit&redlink=1)於核心-包覆邊界時，假若這[入射角](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%A5%E5%B0%84%E8%A7%92%22%20%5Co%20%22%E5%85%A5%E5%B0%84%E8%A7%92)（光線與邊介面的[法線](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%95%E7%BA%BF%22%20%5Co%20%22%E6%B3%95%E7%B7%9A)之間的夾角）的角度大於[臨界角](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%87%A8%E7%95%8C%E8%A7%92%22%20%5Co%20%22%E8%87%A8%E7%95%8C%E8%A7%92)的角度，則這光線會被完全地[反射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E5%B0%84)回去。光纖就是應用這種效應來局限傳導光線於核心。在光纖內部傳播的光線會被邊界反射過來，反射過去。由於光線入射於邊界的角度必須大於[臨界角](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%87%A8%E7%95%8C%E8%A7%92)的角度，只有在某一角度範圍內射入光纖的光線，才能夠通過整個光纖，不會洩漏損失。這角度範圍稱為光纖的[受光錐角](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%8F%97%E5%85%89%E9%8C%90%E8%A7%92&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[acceptance cone](https://en.wikipedia.org/wiki/acceptance_cone)），是光纖的核心折射率與包覆折射率的差值的[函數](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%87%BD%E6%95%B8%22%20%5Co%20%22%E5%87%BD%E6%95%B8)。

更簡單地說，光線射入光纖的角度必須小於[受光角](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%8F%97%E5%85%89%E8%A7%92&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[acceptance angle](https://en.wikipedia.org/wiki/acceptance_angle)）的角度，才能夠傳導於光纖核心。受光角的[正弦](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%A3%E5%BC%A6%22%20%5Co%20%22%E6%AD%A3%E5%BC%A6)是光纖的[數值孔徑](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B0%E5%80%BC%E5%AD%94%E5%BE%84)。[數值孔徑](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B0%E5%80%BC%E5%AD%94%E5%BE%84)越大的光纖，越不需要精密的[熔接](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%86%94%E6%8E%A5)和[操作](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%93%8D%E4%BD%9C&action=edit&redlink=1)技術。單模光纖的數值孔徑比較小，需要比較精密的熔接和操作技術。

### 多模光纖



光波傳播於多模光纖。

核心[直徑](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E5%BE%91%22%20%5Co%20%22%E7%9B%B4%E5%BE%91)較大的光纖（大於10 [微米](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BE%AE%E7%B1%B3)）的[物理](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86)性質，可以用[幾何光學](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%87%A0%E4%BD%95%E5%85%89%E5%AD%A6)的理論來分析，這種光纖稱為**多模光纖**，用於通信用途時，線材會以**橘色**外皮做為辨識。

在一個多模突變光纖內，[光線](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%B7%9A%22%20%5Co%20%22%E5%85%89%E7%B7%9A)靠著全反射傳導於核心。當光線遇到核心-包覆邊界時，假若入射角大於臨界角，則光線會被完全反射。臨界角的角度是由核心折射率與包覆折射率共同決定。假若入射角小於臨界角，則光線會[折射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%98%E5%B0%84%22%20%5Co%20%22%E6%8A%98%E5%B0%84)入包覆，無法繼續傳導於核心。臨界角又決定了光纖的[受光角](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%8F%97%E5%85%89%E8%A7%92&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[acceptance angle](https://en.wikipedia.org/wiki/acceptance_angle)），通常以[數值孔徑](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B0%E5%80%BC%E5%AD%94%E5%BE%84%22%20%5Co%20%22%E6%95%B8%E5%80%BC%E5%AD%94%E5%BE%91)來表示其大小。較高的數值孔徑會允許光線，以較近軸心和較寬鬆的角度，傳導於核心，造成光線和光纖更有效率的[耦合](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%80%A6%E5%90%88)。但是，由於不同角度的光線會有不同的[光程](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%A8%8B)，通過光纖所需的時間也會不同，所以，較高的數值孔徑也會增加[色散](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%89%B2%E6%95%A3)。有些時候，較低的數值孔徑會是更適當的選擇。

漸變光纖的核心的折射率，從軸心到包覆，逐漸地減低。這會使朝著包覆傳導的光線，平滑緩慢地改變方向，而不是急劇地從核心-包覆邊界反射過去。這樣，大角度光線會花更多的時間，傳導於低折射率區域，而不是高折射率區域。因此，所形成的[曲線](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9B%B2%E7%BA%BF%22%20%5Co%20%22%E6%9B%B2%E7%B7%9A)路徑，會減低[多重路徑色散](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%A4%9A%E9%87%8D%E8%B7%AF%E5%BE%91%E8%89%B2%E6%95%A3&action=edit&redlink=1)。工程師可以精心設計漸變光纖的折射率分布，使得各種光線在光纖內的軸傳導速度差值，能夠極小化。這理想折射率分布應該會非常接近於[拋物線](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8B%8B%E7%89%A9%E7%B7%9A)分布。

### 單模光纖



單模光纖內部結構：
1.核心：直徑8 µm
2.包覆：直徑125 µm
3.緩衝層：直徑250 µm
4.外套：直徑400 µm

核心直徑小於傳播光波[波長](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7%22%20%5Co%20%22%E6%B3%A2%E9%95%B7)約十倍的光纖，不能用[幾何光學](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%87%A0%E4%BD%95%E5%85%89%E5%AD%A6)理論來分析其物理性質。替而代之，必須改用[馬克士威方程組](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A6%AC%E5%85%8B%E5%A3%AB%E5%A8%81%E6%96%B9%E7%A8%8B%E7%B5%84)來分析，導出相關的[電磁波方程式](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)。視為[光學波導](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E5%AD%B8%E6%B3%A2%E5%B0%8E&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[optical waveguide](https://en.wikipedia.org/wiki/optical_waveguide)），光纖可以傳播多於一個[橫模](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%A9%AB%E6%A8%A1&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[transverse mode](https://en.wikipedia.org/wiki/transverse_mode)）的光波。只允許一種橫模傳導的光纖稱為**單模光纖**。用於通信用途時，線材會以[黃色](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%BB%83%E8%89%B2)外皮做為辨識[[來源請求]](https://zh.wikipedia.org/wiki/Wikipedia%3A%E5%88%97%E6%98%8E%E6%9D%A5%E6%BA%90)。大直徑核心、多橫模的光纖的物理性質，也可以用電磁波波動方程式分析。結果會顯示出，這種光纖允許多於一個橫模的光波。這樣的解析多模光纖，所得到的結果，與幾何光學的解析結果大致相同。

[波導分析](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%B3%A2%E5%B0%8E%E5%88%86%E6%9E%90&action=edit&redlink=1)顯示，在光纖內的光波的[能量](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%83%BD%E9%87%8F)，並不是全部局限於核心裏。令人驚訝地，特別是在單模光纖裏，有很大一部分的能量是以[衰減波](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%A1%B0%E6%B8%9B%E6%B3%A2&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[evanescent wave](https://en.wikipedia.org/wiki/evanescent_wave)）的形式傳導於包覆。

最常見的一種單模光纖，核心直徑大約為7.5–9.5 [微米](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BE%AE%E7%B1%B3)，專門用於傳導[近紅外線](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%BF%91%E7%B4%85%E5%A4%96%E7%B7%9A&action=edit&redlink=1)。多模光纖的核心直徑可以小至50微米，或者大至幾百微米。

### 特用光纖

有些特用光纖的核心或包覆會特別地製作成非圓柱形，通常像橢圓形或長方形。這包括[維護偏極化光纖](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%B6%AD%E8%AD%B7%E5%81%8F%E6%A5%B5%E5%8C%96%E5%85%89%E7%BA%96&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[polarization-maintaining fiber](https://en.wikipedia.org/wiki/polarization-maintaining_fiber)）。

[光子晶體](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%90%E6%99%B6%E4%BD%93)光纖是一種新型的光纖，其折射率以[規律性](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%A6%8F%E5%BE%8B%E6%80%A7&action=edit&redlink=1)的模式變化（通常沿著光纖的軸向會有圓柱空洞）。光子晶體光纖應用[繞射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%B9%9E%E5%B0%84%22%20%5Co%20%22%E7%B9%9E%E5%B0%84)效應（單獨的或加上全反射效應）來侷限光波於光纖核心。

## 衰減機制



在[ZBLAN](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=ZBLAN&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[ZBLAN](https://en.wikipedia.org/wiki/ZBLAN)）和[二氧化矽光纖](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%BA%8C%E6%B0%A7%E5%8C%96%E7%9F%BD%E5%85%89%E7%BA%96&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[silica fiber](https://en.wikipedia.org/wiki/silica_fiber)）內的光衰減。

在介質內，光纖的[衰減](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%A1%B0%E6%B8%9B&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[attenuation](https://en.wikipedia.org/wiki/attenuation)），又稱為**傳輸損失**，指的是隨著傳輸距離的增加，光束（或訊號）強度會減低。由於現代光傳輸介質的高質量[透明度](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%80%8F%E6%98%8E%E5%BA%A6%22%20%5Co%20%22%E9%80%8F%E6%98%8E%E5%BA%A6)，光纖的**衰減係數**的單位通常是[dB](https://zh.wikipedia.org/wiki/DB)/[km](https://zh.wikipedia.org/wiki/Km)（每公里長度介質的[分貝](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E8%B2%9D%22%20%5Co%20%22%E5%88%86%E8%B2%9D)）。因為[矽石玻璃纖維](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%9F%BD%E7%9F%B3%E7%8E%BB%E7%92%83%E7%BA%96%E7%B6%AD&action=edit&redlink=1" \o "矽石玻璃纖維 (頁面不存在))能夠滿足嚴格的規定，局限光束於內部，傳輸介質材料大多是由矽石玻璃纖維製成的。

阻礙[數位訊號](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B8%E4%BD%8D%E8%A8%8A%E8%99%9F%22%20%5Co%20%22%E6%95%B8%E4%BD%8D%E8%A8%8A%E8%99%9F)遠距離傳輸的一個重要因素就是[衰減](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%A1%B0%E6%B8%9B&action=edit&redlink=1)。因此，減少衰減是光纖光學研究的必然目標。經過多次實驗得到的結果，顯示出[光散射](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E6%95%A3%E5%B0%84&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[light scattering](https://en.wikipedia.org/wiki/light_scattering)）和[吸收](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%90%B8%E6%94%B6_%28%E5%85%89%E5%AD%A6%29%22%20%5Co%20%22%E5%90%B8%E6%94%B6%20%28%E5%85%89%E5%AD%B8%29)是造成光纖衰減的主要原因之一。

### 光散射



鏡面反射。



漫反射。

因為光線的全反射，光線可以傳輸於光纖核心。[粗糙](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%B2%97%E7%B3%99&action=edit&redlink=1" \o "粗糙 (頁面不存在))、[不規則](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%B8%8D%E8%A6%8F%E5%89%87&action=edit&redlink=1)的[表面](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%A8%E9%9D%A2)，甚至在[分子](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%AD%90)層次，也會使光線往[隨機](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9A%A8%E6%A9%9F)方向反射，稱這現象為[漫反射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%BC%AB%E5%8F%8D%E5%B0%84)或[光散射](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E6%95%A3%E5%B0%84&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[light scattering](https://en.wikipedia.org/wiki/light_scattering)）[[1]](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%B0%8E%E7%BA%96%E7%B6%AD%22%20%5Cl%20%22cite_note-z-1)，其特徵通常是多種不同的反射角。

大多數物體因為表面的光散射，可以被人類[視覺](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%A6%96%E8%A6%BA)偵測到。光散射跟入射光波的波長有關。[可見光](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%AF%E8%A6%8B%E5%85%89)的波長大約是1微米。人類視覺無法偵測到超小於這尺寸的物體.[[2]](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%B0%8E%E7%BA%96%E7%B6%AD#cite_note-2)。所以，位於可見物體表面的[散射中心](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%95%A3%E5%B0%84%22%20%5Co%20%22%E6%95%A3%E5%B0%84)也有類似的[空間](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E9%96%93)尺寸。

光波入射於內部的邊介面時，會因為[不同調散射](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%B8%8D%E5%90%8C%E8%AA%BF%E6%95%A3%E5%B0%84&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[incoherent scattering](https://en.wikipedia.org/wiki/incoherent_scattering)）而造成衰減。對於結晶材料或多晶材料，像[金屬](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%87%91%E5%B1%AC%22%20%5Co%20%22%E9%87%91%E5%B1%AC)或[陶瓷](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%99%B6%E7%93%B7)，除了細孔以外，大部分內部介面的形式乃[晶界](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%99%B6%E7%95%8C&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[grain boundary](https://en.wikipedia.org/wiki/grain_boundary)），分隔了晶粒尺寸的微小區域。材料學專家發現，假若能將散射中心（或晶界）的尺寸減小到低於入射光波的波長，則光散射的影響會減小很多，可以被忽略。這發現引起更多有關[透明陶瓷材料](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%80%8F%E6%98%8E%E9%99%B6%E7%93%B7%E6%9D%90%E6%96%99&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[transparent ceramic material](https://en.wikipedia.org/wiki/transparent_ceramic_material)）的研究。

類似地，在光學光纖內，光散射是由分子層次的不規則玻璃結構所造成的。很多材料學專家認為玻璃無疑是多晶材料的極限案例。而其展現出短距離現像的**疇域** (domain），則是金屬、合金、玻璃、陶瓷等等的基礎[建築材料](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BB%BA%E7%AD%91%E6%9D%90%E6%96%99%22%20%5Co%20%22%E5%BB%BA%E7%AF%89%E6%9D%90%E6%96%99)。散布在這些疇域之間，有很多[微結構](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%BE%AE%E7%B5%90%E6%A7%8B&action=edit&redlink=1)[缺陷](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%BC%BA%E9%99%B7&action=edit&redlink=1)，是造成光散射的最理想地點。

當[光學倍率](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%B8%E5%80%8D%E7%8E%87%22%20%5Co%20%22%E5%85%89%E5%AD%B8%E5%80%8D%E7%8E%87)變高時，光纖的[非線性光學行為](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9D%9E%E7%B7%9A%E6%80%A7%E5%85%89%E5%AD%B8%E8%A1%8C%E7%82%BA&action=edit&redlink=1)也可能會造成光散射[[3]](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%B0%8E%E7%BA%96%E7%B6%AD#cite_note-3)。

### 紫外線和紅外線吸收

除了光散射以外，光纖材料會選擇性地吸收某些特定[波長](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7%22%20%5Co%20%22%E6%B3%A2%E9%95%B7)的光波，這也會造成衰減或訊號損失。吸收光波的機制類似[顏色](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A1%8F%E8%89%B2)顯現的機制。

1. 在[電子](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%22%20%5Co%20%22%E9%9B%BB%E5%AD%90)層次，光纖材料的每種組成[原子](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90)，其不同的電子[軌域](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%BB%8C%E5%9F%9F)的[能級](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%83%BD%E7%B4%9A)差值，決定了光纖材料能否吸收某特定[頻率](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A0%BB%E7%8E%87)或[頻率帶](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A0%BB%E7%8E%87)的[光子](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%90)。這些特定頻率或頻率帶的光子，大多屬於紫外線或可見光的頻區。這就是很多可見物質顯示出[顏色](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A1%8F%E8%89%B2)的機制。
2. 在原子或分子層次，[振動](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95)頻率、[堆積](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A0%86%E7%A7%AF)結構、[化學鍵](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%96%E5%AD%B8%E9%8D%B5)強度等等，這些重要因素共同決定了材料傳輸[紅外線](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%85%E5%A4%96%E7%B7%9A)，[遠紅外線](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%81%A0%E7%B4%85%E5%A4%96%E7%B7%9A)，[無線電波](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%84%A1%E7%B7%9A%E9%9B%BB%E6%B3%A2)，[微波](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BE%AE%E6%B3%A2)等等長波的能力。



在一個晶體物體內部，[振動](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95%22%20%5Co%20%22%E6%8C%AF%E5%8B%95)的[簡正模](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%B0%A1%E6%AD%A3%E6%A8%A1&action=edit&redlink=1)（[英語](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AF%AD%22%20%5Co%20%22%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：[normal mode](https://en.wikipedia.org/wiki/normal_mode)）。

在設計任何透明光學元件前，必須先知道[材料](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9D%90%E6%96%99)的性質和限制，然後才能選擇適當的材料。任何材料在[低頻率](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%BD%8E%E9%A0%BB%E7%8E%87&action=edit&redlink=1)區域的[晶格吸收特性](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%99%B6%E6%A0%BC%E5%90%B8%E6%94%B6%E7%89%B9%E6%80%A7&action=edit&redlink=1)，也賦予了這項材料對於這低頻率光波的透明限制。這是組成的原子或分子的[熱感應振動](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%86%B1%E6%84%9F%E6%87%89%E6%8C%AF%E5%8B%95&action=edit&redlink=1)，和入射光波之間，相互[耦合](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%80%A6%E5%90%88)的結果。因此，在紅外線頻區（＞ 1微米），每一種材料都要避開這些由於原子或分子振動機制而產生的吸收區域。

因為某特定頻率的紅外線光波，恰恰好匹配了，某種材料的原子或分子的[自然振動頻率](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%87%AA%E7%84%B6%E6%8C%AF%E5%8B%95%E9%A0%BB%E7%8E%87&action=edit&redlink=1)，這種材料會選擇性地吸收這特定頻率的光波。由於不同的原子或分子有不同的自然振動頻率，它們會選擇性地吸收不同頻率（或不同頻率帶）的紅外線光波。

由於光波頻率不匹配光纖材料的自然振動頻率，會造成光波的反射或[透射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%80%8F%E5%B0%84)。當紅外線光波入射於這不匹配的光纖材料，一部分能量會被反射，另一部分能量會被[透射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%80%8F%E5%B0%84)

3.LED在高亮度的發展上，從內部與外部效率有那些作法，從學理上，LED亮度的最大極限為何？(20%)
ANS: LED照明燈具技術為一種系統整合的概念，其系統中心為LED光源，LED光源技術目標為提供更好的發光效率，更低的熱阻，更佳的光譜特性，如演色性及相關色溫等，以光源為主體可將LED照明燈具展開4項技術的整合，分別為光學、電控、散熱與機構，光學技術目的為替照明燈具設計符合需求的燈具光型，透過光學分析及模擬並且利用光學元件將光源的光型轉換為燈具需求的光型；電控則可大致分為電源驅動及控制系統，電源驅動目的為將外部電源轉換為LED所需求的電壓或電流，控制系統則可以讓燈具結合傳輸及數位化操作，賦予燈具生命；由於LED光源在發光的同時也產生大量的廢熱，因為散熱LED**源起於**1907**年，一路發展至今高亮度**LED**已廣泛出現在各種不同的產品上，由於其效率高與壽命長等優勢，已漸漸取代傳統光源成為新一代的主流光源。高亮度**LED**市場是逐年成長，而在產品分布方面**2009**年時高亮度**LED**產品占手機產品的比重最大，而近期可發現顯示器的比重大幅增進，除此之外還有一個不可忽視的產品市場則是在照明方面，照明產品的市場會逐年穩健的成長。LED**照明技術發展趨勢結構設計將使得LED燈具與光源保持

適當的溫升，以避免減低效能及壽命；由於LED燈源體積小，使用變化大，因此機構設計可以讓LED燈具有別於傳統螢光燈或HID燈具，展現更多樣化的連接方式，因此LED照明燈具不論是如圖1的取代式燈泡或者是新一代的LED照明模組，皆為上述技術的整合，由於LED產品的普及率尚未達到飽和，所以各家廠商在光源及光機電熱的技術都在繼續不斷的改良及進步中，以下將簡單介紹目前

各項技術的最新發展情況。**LED晶粒**目前高功率高亮度LED晶粒為

一般所熟知的約3V電壓驅動的低壓LED以及前陣子所推出的AC LED，近期晶電提出的HV LED為利用自身研發的倒裝焊大功率高壓LED芯片模組，其特色在於並沒有利用金線互連，HV LED單元間的互聯是利用基板上的布線完成的，因此能有簡單的封裝製程及低廉的封裝成本，此高壓低電流的設計產生更佳的發光效率，在與封裝廠的合作下晶電宣稱此產品能達到162 lm╱W的冷白光以及150

lm╱W的暖白光，HV LED暖白光為使用紅光整合藍光晶粒，此款暖白光的效率比起傳統的藍光激發暖色系螢光粉更能兼顧高效率及演色性，其效能大約能增進20∼30％。由於HVLED的推出，使得不同瓦數的燈具可以選擇其適合的LED晶粒，AC LED的市場主要集中在2W以下，由於瓦數小導致廢熱少，因此在市電直接供應下可以維持一定的穩定性；HVLED則由於發光效率較高，因此可以承擔2W至10W的任務，此階段瓦數多為燈泡型燈具；而高瓦數的燈具可由DC LED繼續來扮演光源的角色，因此 AC LED、DC LED與HV LED將

有各自發揮的市場。**LED基板**目前大部分製作LED所使用的基板為藍寶石（Sapphire）與碳化矽，此兩者的技術已經很成熟，而晶圓尺

寸也愈來愈大，從2005年至今晶圓直徑從2吋擴大至4吋，並且未來朝向6吋為主流，由於大基板的成本高、加工困難以及貨源不易取得，因此使得LED成本至今無法如傳統光源一般，但是對於矽基板而言，卻早已達到大尺寸的水準，因此目前許多廠商漸漸朝向矽基LED的方向前進，美國LED大廠Bridgelux所生產的矽基板LED已達成135 lm╱W，預計未來矽基LED產品的低成本優勢將使得其占有率愈來愈高。**LED螢光粉**傳統的LED封裝螢光粉塗抹方式是將螢光粉直接塗抹在藍光晶粒上，而近期則有遠離螢光粉（RemotePhosphor），其螢光粉塗抹於擴散板上，相較於傳統的塗布方式，這項技術的加工較簡單，能將稀土金屬的磷化物嚴格控制在同一封層（Bin）內，並且可以避免螢光粉受到晶粒的廢熱影響，此外由於螢光粉的壽命不

如LED晶粒本身，所以一旦光源出現老化現象只需換掉擴散板便可繼續使用，除了以上所提到的優勢之外，這項技術可以消除因光波波長不同的干擾，比起傳統方式有更佳的顏色一致性，未來LED在某些應用產品端能大量使用此封裝技術。**智慧照明**傳統的LED 供應鏈從元件端一路擴展到整體燈具，在整個供應鏈中每項技術都在不斷的發展當中，就如同本文前面所敘述的，在技術以及成本都還有進步的空間，然而未來燈具系統發展則會朝向智慧照明前進，智慧照明可分為幾個層面，但一切都是以人為出發點，自古以來人長期於日光下工作，直至日落而息，人工光源的出現使得人們的生活可延伸至夜晚，因此智慧照明的目標之一為提供人們如同日光般的人工光源，此光源必須擁有平滑的光譜曲線，除此之外整體照明空間的照度規劃以及眩光控制也是必須被重視的，此層面著重於人因工程（是指研究產品對人的身心影響而加以設計）；另一方面，則是提供人們便利性的智慧照明，未來照明融入感測技術、傳輸技術以及控制技術，感測器感測照明環境的各項資訊，將此資訊經由控制策略處理後藉由傳輸介面送至燈具，以達到自動控制的目的，智慧照明的自動感測及自動控制有助於智慧節能的推動。

**結論**本文針對LED從元件到系統端簡介了其最新技術發展與未來趨

勢，由於照明產業不同於一般IT產業，人們無法短期間改變對照明的習性，因此各個研究單位及廠商仍在努力的推展固態照明，並且重點已從產品的性能慢慢轉向為適合人的照明，因此LED等固態照明產業的崛起將會帶給照明重大的革新。

在討論LED產品時，我們會注意的發光亮度有3種單位，分別是照度單位勒克司（Lux）、光量單位流明（Lumen；lm）、發光強度單位燭光（Candle power；CD），3種單位各自有適合使用的領域，但是在數值上是互通的。

1 CD表示完全輻射的物體，在白金凝固點溫度下，每六十分之一平方公分面積的發光強度。適合用在主動發光燈具領域，如白熱燈泡。

1 lm表示1 CD光照射在距離為1公分，面積為1平方公分平面上的光量。適合用在反射燈具與穿透燈具領域，如投影機。

1 Lux表示指1 Lm光量均勻分佈在1平方公尺面積上的照度。適合用在攝影領域。

一般而言，單一LED的發光強度以CD為單位，並配上視角參數，而LED的發光強度從各位數mCD到5,000mCD不等。廠商在標示LED單一產品時，其發光強度規格是說LED在20mA電流下點亮時，最佳視角上和中心位置上發光強度最大點的發光強度。

 4.從近代物理的理論，雷射的發現是必然還是偶然？先解釋愛因斯坦的受激輻射理論(20%)
ANS: 首先，愛因斯坦主張，一個孤立的受激原子會釋放出光子而回到低能量狀態，他稱此過程為「自發輻射」〈spontaneous emission〉。自發輻射決定了所有如吸收與受激等輻射作用的頻率大小。原子只能吸收正確波長的光子，當光子消失而原子的能量增加時，便提供了自發輻射的機會；此外，他的理論還預測，當光通過一個物質時，會激發出更多的光放射出來。愛因斯坦假設說，光子喜歡在相同的狀態中集體移動，假如有一大群原子帶有過多的能量時，它們會隨時隨機地釋放出光子。然而，當一個帶著正確波長

的光子經過時（或在雷射裝置中，發射到已受激的原子上），它會刺激原子提前釋放出光子，而被釋放出的光子會以和原先的光子相同的頻率和相位在同一方向移動；接下來就會產生一連串的效應：當一群相同的光子行經其他的原子時，就會有更多的光子從它們的原子中釋放出來，加入光子群。

偶然。

5,從光纖的特性，如果你從美國加州矽谷發一封mail回台灣，訊號傳遞在光纖中光走的模式(single,multi)轉換情況？(20%)
ANS: **光纖通訊**（Fiber-optic communication）也作**光纖通訊**，是指一種利用[光](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)與[光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%96)（optical fiber）傳遞資訊的一種方式，屬於有線通訊的一種。光經過[調變](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%BF%E8%AE%8A%22%20%5Co%20%22%E8%AA%BF%E8%AE%8A)（modulation）後便能攜帶資訊。自1980年代起，光纖通訊系統對於[電信](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E4%BF%A1%22%20%5Co%20%22%E9%9B%BB%E4%BF%A1)工業產生了革命性的作用，同時也在[數位](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B8%E4%BD%8D%E5%8C%96)時代裡扮演非常重要的角色。光纖通訊具有傳輸容量大、保密性好等許多優點。光纖通訊現在已經成為當今最主要的有線通訊方式。將需傳送的資訊在傳送端輸入到傳送機中，將資訊疊加或調變到作為資訊訊號載體的載波上，然後將已調變的載波通過傳輸媒質傳送到遠處的接收端，由[接收機](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8E%A5%E6%94%B6%E6%9C%BA)解調出原來的資訊。

根據訊號調變方式的不同，光纖通訊可以分為數位光纖通訊、[模擬](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%A8%A1%E6%93%AC)光纖通訊。光纖通訊的產業包括了光纖電纜、光器件、光裝置、光通訊儀表、光通訊積體電路等多個領域。

利用光纖做為通訊之用通常需經過下列幾個步驟：

* 以[發射器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BC%E5%B0%84%E5%99%A8%22%20%5Co%20%22%E7%99%BC%E5%B0%84%E5%99%A8)（transmitter）產生光訊號。
* 以光纖傳遞訊號，同時必須確保光訊號在光纖中不會衰減或嚴重變形。
* 以[接收器](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%8E%A5%E6%94%B6%E5%99%A8&action=edit&redlink=1" \o "接收器 (頁面不存在))（receiver）接收光訊號，並且轉換成電訊號。

[光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%96)常被電話公司用於傳遞[電話](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%A9%B1)、[網際網路](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%B6%B2%E9%9A%9B%E7%B6%B2%E8%B7%AF)，或是[有線電視](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%89%E7%B7%9A%E9%9B%BB%E8%A6%96)的訊號，有時候利用一條[光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%96)就可以同時傳遞上述的所有訊號。與傳統的[銅線](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%8A%85)相比，光纖的訊號衰減（attenuation）與遭受干擾[[來源請求]](https://zh.wikipedia.org/wiki/Wikipedia%3A%E5%88%97%E6%98%8E%E6%9D%A5%E6%BA%90)（interference）的情形都改善很多，特別是長距離以及大量傳輸的使用場合中，光纖的優勢更為明顯。然而，在城市之間利用[光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%96%22%20%5Co%20%22%E5%85%89%E7%BA%96)的通訊基礎建設（infrastructure）通常施工難度以及材料成本難以控制，完工後的系統維運複雜度與成本也居高不下。因此，早期光纖通訊系統多半應用在長途的通訊需求中，這樣才能讓光纖的優勢徹底發揮，並且抑制住不斷增加的成本。

從2000年[光通訊](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E9%80%9A%E8%A8%8A&action=edit&redlink=1" \o "光通訊 (頁面不存在))（optical communication）市場崩潰後，光纖通訊的成本也不斷下探，目前已經和銅纜為骨幹的通訊系統不相上下[[1]](http://www.telecommagazine.com/newsglobe/article.asp?HH_ID=AR_2572)。

對於光纖通訊產業而言，1990年[光放大器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E6%94%BE%E5%A4%A7%E5%99%A8%22%20%5Co%20%22%E5%85%89%E6%94%BE%E5%A4%A7%E5%99%A8)（optical amplifier）正式進入商業市場的應用後，很多超長距離的光纖通訊才得以真正實現，例如越洋的[海底電纜](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%B7%E5%BA%95%E9%9B%BB%E7%BA%9C%22%20%5Co%20%22%E6%B5%B7%E5%BA%95%E9%9B%BB%E7%BA%9C)。到了2002年時，越洋海底電纜的總長已經超過25萬公里，每秒能攜帶的資料量超過2.56Tb，而且根據電信業者的統計，這些資料從2002年後仍然不斷的大幅成長中。

但是這些通訊方式各有其極限，使用電氣訊號傳遞資訊雖然快速，但是傳輸距離會因為電氣訊號容易衰減而需要大量的[中繼器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E7%B9%BC%E5%99%A8)（repeater）；[微波](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BE%AE%E6%B3%A2%22%20%5Co%20%22%E5%BE%AE%E6%B3%A2)（microwave）通訊雖然可以使用空氣做介質，可是也會受到載波頻率（carrier frequency）的限制。到了二十世紀中葉，人們才了解使用光來傳遞資訊，能帶來很多過去所沒有的顯著好處。

然而，當時並沒有[同調性](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%B9%B2%E6%80%A7)高的發光源（coherent light source），也沒有適合作為傳遞光訊號的介質，也所以光通訊一直只是概念。直到1960年代，[雷射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%B7%E5%B0%84%22%20%5Co%20%22%E9%9B%B7%E5%B0%84)（laser）的發明才解決第一項難題。1970年代[康寧公司](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BA%B7%E5%AF%A7%E5%85%AC%E5%8F%B8%22%20%5Co%20%22%E5%BA%B7%E5%AF%A7%E5%85%AC%E5%8F%B8)（Corning Glass Works）發展出高品質低衰減的光纖則是解決了第二項問題，此時訊號在光纖中傳遞的衰減量第一次低於光纖通訊之父[**高錕**](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%AB%98%E9%8C%95)所提出的每公里衰減20[分貝](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E8%B2%9D)（20dB/km）關卡，證明光纖作為通訊介質的可能性。與此同時使用[砷化鎵](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%A0%B7%E5%8C%96%E9%8E%B5%22%20%5Co%20%22%E7%A0%B7%E5%8C%96%E9%8E%B5)（GaAs）作為材料的[半導體雷射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%BF%80%E5%85%89%E4%BA%8C%E6%A5%B5%E7%AE%A1%22%20%5Co%20%22%E9%9B%B7%E5%B0%84%E4%BA%8C%E6%A5%B5%E9%AB%94)（semiconductor laser）也被發明出來，並且憑藉著體積小的優勢而大量運用於光纖通訊系統中。1976年，第一條速率為44.7Mbit/s的光纖通訊系統在[美國](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%BE%8E%E5%9B%BD%22%20%5Co%20%22%E7%BE%8E%E5%9C%8B)[亞特蘭大](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%9A%E7%89%B9%E5%85%B0%E5%A4%A7)的地下管道中誕生。

經過五年的研發期，第一個商用的光纖通訊系統在1980年問市。這個人類史上第一個光纖通訊系統使用波長800[奈米](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A5%88%E7%B1%B3)（nanometer）的[砷化鎵雷射](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%A0%B7%E5%8C%96%E9%8E%B5%E9%9B%B7%E5%B0%84&action=edit&redlink=1" \o "砷化鎵雷射 (頁面不存在))作為光源，傳輸的速率（data rate）達到45Mb/s（bits per second），每10公里需要一個中繼器增強訊號。

第二代的商用光纖通訊系統也在1980年代初期就發展出來，使用波長1300[奈米](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A5%88%E7%B1%B3)的[磷砷化鎵銦](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%A3%B7%E7%A0%B7%E5%8C%96%E9%8E%B5%E9%8A%A6&action=edit&redlink=1)（InGaAsP）雷射。早期的光纖通訊系統雖然受到色散（dispersion）的問題而影響了訊號品質，但是1981年[單模光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%96%AE%E6%A8%A1%E5%85%89%E7%BA%96%22%20%5Co%20%22%E5%96%AE%E6%A8%A1%E5%85%89%E7%BA%96)（single-mode fiber）的發明克服了這個問題。到了1987年時，一個商用光纖通訊系統的傳輸速率已經高達1.7Gb/s，比第一個光纖通訊系統的速率快將近四十倍之譜。同時傳輸的功率與訊號衰減的問題也有顯著改善，間隔50公里才需要一個中繼器增強訊號。1980年代末，EDFA的誕生，堪稱光通訊歷史上的一個里程碑似的事件，它使光纖通訊可直接進行光中繼，使長距離高速傳輸成為可能，並促使DWDM的誕生。

第三代的光纖通訊系統改用波長1550[奈米](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A5%88%E7%B1%B3)的雷射做光源，而且訊號的衰減已經低至每公里0.2[分貝](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E8%B2%9D)（0.2dB/km）。之前使用[磷砷化鎵銦](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%A3%B7%E7%A0%B7%E5%8C%96%E9%8E%B5%E9%8A%A6&action=edit&redlink=1" \o "磷砷化鎵銦 (頁面不存在))雷射的光纖通訊系統常常遭遇到脈波延散（pulse spreading）問題，而科學家則設計出**色散遷移光纖**（dispersion-shifted fiber）來解決這些問題，這種光纖在傳遞1550[奈米](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A5%88%E7%B1%B3)的光波時，色散幾乎為零，因其可將雷射光的光譜限制在單一縱模（longitudinal mode）。這些技術上的突破使得第三代光纖通訊系統的傳輸速率達到2.5Gb/s，而且中繼器的間隔可達到100公里遠。

第四代光纖通訊系統引進[光放大器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E6%94%BE%E5%A4%A7%E5%99%A8)（optical amplifier），進一步減少中繼器的需求。另外，**[波長分波多工](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%88%86%E5%A4%8D%E7%94%A8%22%20%5Co%20%22%E6%B3%A2%E9%95%B7%E5%88%86%E6%B3%A2%E5%A4%9A%E5%B7%A5)**（wavelength-division multiplexing, WDM）技術則大幅增加傳輸速率。這兩項技術的發展讓光纖通訊系統的容量以每六個月增加一倍的方式大幅躍進，到了2001年時已經到達10Tb/s的驚人速率，足足是80年代光纖通訊系統的200倍之多。近年來，傳輸速率已經進一步增加到14Tb/s，每隔160公里才需要一個中繼器。

第五代光纖通訊系統發展的重心在於擴展波長分波多工器的波長操作範圍。傳統的波長範圍，也就是一般俗稱的「C band」約是1530奈米至1570奈米之間，新一帶的無水光纖（dry fiber）低損耗的波段則延伸到1300奈米至1650奈米間。另外一個發展中的技術是引進[光孤子](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%AD%A4%E5%AD%90%22%20%5Co%20%22%E5%AD%A4%E5%AD%90)（optical soliton）的概念，利用光纖的非線性效應，讓脈波能夠抵抗色散而維持原本的波形。

1990年至2000年間，光纖通訊產業受到[網際網路泡沫](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%92%E8%81%94%E7%BD%91%E6%B3%A1%E6%B2%AB%22%20%5Co%20%22%E7%B6%B2%E9%9A%9B%E7%B6%B2%E8%B7%AF%E6%B3%A1%E6%B2%AB)的影響而大幅成長。此外一些新興的網路應用，如[隨選視訊](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E9%81%B8%E5%BD%B1%E5%83%8F)（video on demand）使得網際網路頻寬的成長甚至超過[莫耳定律](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%91%A9%E5%B0%94%E5%AE%9A%E5%BE%8B%22%20%5Co%20%22%E8%8E%AB%E8%80%B3%E5%AE%9A%E5%BE%8B)（Moore's Law）所預期[積體電路](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D%E9%AB%94%E9%9B%BB%E8%B7%AF%22%20%5Co%20%22%E7%A9%8D%E9%AB%94%E9%9B%BB%E8%B7%AF)晶片中電晶體增加的速率。而自[網際網路泡沫](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%92%E8%81%94%E7%BD%91%E6%B3%A1%E6%B2%AB)破滅至2006年為止，光纖通訊產業透過企業整併壯大規模，以及委外生產的方式降低成本來延續生命。

## 核心技術

現代的光纖通訊系統多半包括一個發射器，將電訊號轉換成光訊號，再透過[光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%96%22%20%5Co%20%22%E5%85%89%E7%BA%96)將光訊號傳遞。[光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%96)多半埋在地下，連接不同的建築物。系統中還包括數種光放大器，以及一個光接收器將光訊號轉換回電訊號。在光纖通訊系統中傳遞的多半是數位訊號，來源包括[電腦](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%85%A6)、[電話](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%A9%B1)系統，或是[有線電視](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%89%E7%B7%9A%E9%9B%BB%E8%A6%96)系統。

### 發射器

在光纖通訊系統中通常作為光源的[半導體元件](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%AF%BC%E4%BD%93%E5%99%A8%E4%BB%B6%22%20%5Co%20%22%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E9%AB%94%E5%99%A8%E4%BB%B6)是[發光二極體](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BC%E5%85%89%E4%BA%8C%E6%A5%B5%E9%AB%94)（light-emitting diode, LED）或是[雷射二極體](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%BF%80%E5%85%89%E4%BA%8C%E6%A5%B5%E7%AE%A1%22%20%5Co%20%22%E9%9B%B7%E5%B0%84%E4%BA%8C%E6%A5%B5%E9%AB%94)（laser diode）。LED與[雷射二極體](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%BF%80%E5%85%89%E4%BA%8C%E6%A5%B5%E7%AE%A1%22%20%5Co%20%22%E9%9B%B7%E5%B0%84%E4%BA%8C%E6%A5%B5%E9%AB%94)的主要差異在於前者所發出的光為非同調性（noncoherent），而後者則為同調性（coherent）的光。使用[半導體](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E9%AB%94%22%20%5Co%20%22%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E9%AB%94)作為光源的好處是體積小、發光效率高、可靠度佳，以及可以將波長最佳化，更重要的是[半導體](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E9%AB%94)光源可以在高頻操作下直接調變，非常適合光纖通訊系統的需求。

LED藉著[電激發光](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%BF%80%E7%99%BC%E5%85%89%22%20%5Co%20%22%E9%9B%BB%E6%BF%80%E7%99%BC%E5%85%89)（electroluminescence）的原理發出非同調性的光，頻譜通常分散在30奈米至60奈米間。LED另外一項缺點是發光效率差，通常只有輸入功率的1%可以轉換成光功率，約是100微瓦特（micro-watt）左右。但是由於LED的成本較低廉，因此常用於低價的應用中。常用於光通訊的LED主要材料是[砷化鎵](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%A0%B7%E5%8C%96%E9%8E%B5%22%20%5Co%20%22%E7%A0%B7%E5%8C%96%E9%8E%B5)或是[砷化鎵磷](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%A0%B7%E5%8C%96%E9%8E%B5%E7%A3%B7&action=edit&redlink=1)（GaAsP），後者的發光波長為1300奈米左右，比[砷化鎵](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%A0%B7%E5%8C%96%E9%8E%B5%22%20%5Co%20%22%E7%A0%B7%E5%8C%96%E9%8E%B5)的810奈米至870奈米更適合用在光纖通訊。由於LED的頻譜範圍較廣，導致色散較為嚴重，也限制了其傳輸速率與傳輸距離的乘積。LED通常用在傳輸速率10Mb/s至100Mb/s的[區域網路](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%80%E5%9F%9F%E7%B6%B2%E8%B7%AF%22%20%5Co%20%22%E5%8D%80%E5%9F%9F%E7%B6%B2%E8%B7%AF)（local area network, LAN），傳輸距離也在數公里之內。目前也有LED內包含了數個[量子井](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E4%BA%95%22%20%5Co%20%22%E9%87%8F%E5%AD%90%E4%BA%95)（quantum well）的結構，使得LED可以發出不同波長的光，涵蓋較寬的頻譜，這種LED被廣泛應用在區域性的波長分波多工網路中。

半導體雷射的輸出功率通常在100毫瓦特（mW）左右，而且為同調性質的光源，方向性相對而言較強，通常和單模光纖的耦合效率可達50%。雷射的輸出頻譜較窄，也有助於增加傳輸速率以及降低模態色散（model dispersion）。半導體雷射亦可在相當高的操作頻率下進行調變，原因是其復合時間（recombination time）非常短。

半導體雷射通常可由輸入的電流有無直接調變其開關狀態與輸出訊號，不過對於某些傳輸速率非常高或是傳輸距離很長的應用，雷射光源可能會以連續波（continuous wave）的形式控制，例如使用外接的[電吸收光調變器](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9B%BB%E5%90%B8%E6%94%B6%E5%85%89%E8%AA%BF%E8%AE%8A%E5%99%A8&action=edit&redlink=1" \o "電吸收光調變器 (頁面不存在))（electroabsorption modulator）或是[馬赫·任德干涉儀](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%A6%AC%E8%B5%AB%C2%B7%E4%BB%BB%E5%BE%B7%E5%B9%B2%E6%B6%89%E5%84%80&action=edit&redlink=1" \o "馬赫·任德干涉儀 (頁面不存在))（Mach-Zehnder interferometer）對光訊號加以調變。外接的調變元件可以大幅減少雷射的「啁啾脈衝」（chirp pulse）。啁啾脈衝會使得雷射的譜線寬度變寬，使得光纖內的色散變得嚴重。

### 光纖

光纖纜線包含一個核心（core），纖殼（cladding）以及外層的保護被覆（protective coating）。核心與[折射率](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%98%E5%B0%84%E7%8E%87%22%20%5Co%20%22%E6%8A%98%E5%B0%84%E7%8E%87)（refractive index）較高的纖殼通常用高品質的矽石玻璃（silica glass）製成，但是現在也有使用塑膠作為材質的光纖。又因為光纖的外層有經過[紫外線](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%AB%E5%A4%96%E7%B7%9A%22%20%5Co%20%22%E7%B4%AB%E5%A4%96%E7%B7%9A)固化後的[壓克力](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A3%93%E5%85%8B%E5%8A%9B)（acrylate）被覆，可以如銅纜一樣埋藏於地下，不需要太多維護費用。然而，如果光纖被彎折的太過劇烈，仍然有折斷的危險。而且因為光纖兩端連接需要十分精密的校準，所以折斷的光纖也難以重新接合。

### 光放大器

過去光纖通訊的距離限制主要根源於訊號在光纖內的衰減以及訊號變形，而解決的方式是利用光電轉換的[中繼器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E7%B9%BC%E5%99%A8%22%20%5Co%20%22%E4%B8%AD%E7%B9%BC%E5%99%A8)。這種[中繼器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E7%B9%BC%E5%99%A8)先將光訊號轉回電訊號放大後再轉換成較強的光訊號傳往下一個中繼器，然而這樣的系統架構無疑較為複雜，不適用於新一代的[波長分波多工](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7%E5%88%86%E6%B3%A2%E5%A4%9A%E5%B7%A5)技術，同時每隔20公里就需要一個中繼器，讓整個系統的成本也難以降低。

[光放大器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E6%94%BE%E5%A4%A7%E5%99%A8)的目的即是在不用作光電與電光轉換下就直接放大光訊號。光放大器的原理是在一段光纖內[摻雜](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8E%BA%E6%9D%82)（doping）稀土族元素（rare-earth）如[鉺](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%89%BA%22%20%5Co%20%22%E9%89%BA)（erbium），再以短波長雷射激發（pumping）之。如此便能放大光訊號，取代[中繼器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E7%B9%BC%E5%99%A8%22%20%5Co%20%22%E4%B8%AD%E7%B9%BC%E5%99%A8)。

### 接收器

構成光接收器的主要元件是[光偵測器](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E5%81%B5%E6%B8%AC%E5%99%A8&action=edit&redlink=1" \o "光偵測器 (頁面不存在))（photodetector），利用[光電效應](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%9B%BB%E6%95%88%E6%87%89%22%20%5Co%20%22%E5%85%89%E9%9B%BB%E6%95%88%E6%87%89)將入射的光訊號轉為電訊號。光偵測器通常是半導體為基礎的[發光二極體](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BC%E5%85%89%E4%BA%8C%E6%A5%B5%E9%AB%94)（photo diode），例如p-n接面二極體、p-i-n二極體，或是雪崩型二極體（avalanche diode）。另外「金屬-半導體-金屬」（Metal-Semiconductor-Metal, MSM）光偵測器也因為與電路整合性佳，而被應用在光再生器（regenerator）或是[波長分波多工](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7%E5%88%86%E6%B3%A2%E5%A4%9A%E5%B7%A5%22%20%5Co%20%22%E6%B3%A2%E9%95%B7%E5%88%86%E6%B3%A2%E5%A4%9A%E5%B7%A5)器中。

光接收器電路通常使用[轉阻放大器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%BD%89%E9%98%BB%E6%94%BE%E5%A4%A7%E5%99%A8%22%20%5Co%20%22%E8%BD%89%E9%98%BB%E6%94%BE%E5%A4%A7%E5%99%A8)（transimpedence amplifier, TIA）以及[限幅放大器](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%99%90%E5%B9%85%E6%94%BE%E5%A4%A7%E5%99%A8&action=edit&redlink=1" \o "限幅放大器 (頁面不存在))（limiting amplifier）處理由[光偵測器](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E5%81%B5%E6%B8%AC%E5%99%A8&action=edit&redlink=1" \o "光偵測器 (頁面不存在))轉換出的光電流，轉阻放大器和限幅放大器可以將光電流轉換成振幅較小的電壓訊號，再透過後端的[比較器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E8%BE%83%E5%99%A8)（comparator）電路轉換成數位訊號。對於高速光纖通訊系統而言，訊號常常相對地衰減較為嚴重，為了避免接收器電路輸出的數位訊號變形超出規格，通常在接收器電路的後級也會加上[時脈及資料回復電路](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%99%82%E8%84%88%E5%8F%8A%E8%B3%87%E6%96%99%E5%9B%9E%E5%BE%A9%E9%9B%BB%E8%B7%AF&action=edit&redlink=1)（clock and data recovery, CDR）以及[鎖相迴路](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%8E%96%E7%9B%B8%E8%BF%B4%E8%B7%AF%22%20%5Co%20%22%E9%8E%96%E7%9B%B8%E8%BF%B4%E8%B7%AF)（phase-locked loop, PLL）將訊號做適度處理再輸出。

### 波長分波多工

[波長分波多工](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7%E5%88%86%E6%B3%A2%E5%A4%9A%E5%B7%A5)的實際做法就是將光纖的工作波長分割成多個通道（channel），俾使能在同一條光纖內傳輸更大量的資料。一個完整的波長分波多工系統分為發射端的波長分波多工器（wavelength division multiplexer）以及在接收端的波長分波解多工器（wavelength division demultiplexer），最常用於[波長分波多工](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7%E5%88%86%E6%B3%A2%E5%A4%9A%E5%B7%A5%22%20%5Co%20%22%E6%B3%A2%E9%95%B7%E5%88%86%E6%B3%A2%E5%A4%9A%E5%B7%A5)系統的元件是[陣列波導光柵](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%99%A3%E5%88%97%E6%B3%A2%E5%B0%8E%E5%85%89%E6%9F%B5&action=edit&redlink=1)（Arrayed Waveguide Gratings, AWG）。而目前市面上已經有商用的波長分波多工器/解多工器，最多可將光纖通訊系統劃分成80個通道，也使得資料傳輸的速率一下子就突破Tb/s的等級。

### 頻寬距離乘積

由於傳輸距離越遠，光纖內的色散現象就越嚴重，影響訊號品質。因此常用於評估光纖通訊系統的一項指標就是**頻寬-距離乘積**，單位是百萬[赫茲](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%AB%E8%8C%B2)×公里（MHz×km）。使用這兩個值的乘積做為指標的原因是通常這兩個值不會同時變好，而必須有所取捨（trade off）。舉例而言，一個常見的多模光纖（multi-mode fiber）系統的頻寬-距離乘積約是500MHz×km，代表這個系統在一公里內的訊號頻寬可以到500MHz，而如果距離縮短至0.5公里時，頻寬則可以倍增到1000MHz。

## 應用極限

雖然目前已經出現很多技術降低諸如色散之類的問題，也使得光纖通訊系統的容量已經達到14Tb/s以及160公里的傳輸距離[[2]](http://www.ntt.co.jp/news/news06e/0609/060929a.html)，仍然有些問題需要工程師與科學家的研究與克服。以下是這些問題的簡單討論。

### 訊號色散

對於現代的玻璃光纖而言，最嚴重的問題並非訊號的衰減，而是[色散](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%89%B2%E6%95%A3%22%20%5Co%20%22%E8%89%B2%E6%95%A3)問題，也就是訊號在光纖內傳輸一段距離後逐漸擴散重疊，使得接收端難以判別訊號的高或低。造成光纖內色散的成因很多。以模態色散為例，訊號的橫模（transverse mode）軸速度（axial speed）不一致導致色散，這也限制了多模光纖的應用。在單模光纖中，模態間的色散可以被壓抑得很低。

但是在單模光纖中一樣有色散問題，通常稱為群速色散（group-velocity dispersion），起因是對不同波長的入射光波而言，玻璃的折射率略有不同，而光源所發射的光波不可能沒有頻譜的分布，這也造成了光波在光纖內部會因為波長的些微差異而有不同的折射行為。另外一種在單模光纖中常見的色散稱為[偏振態色散](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%81%8F%E6%8C%AF%E6%80%81%E8%89%B2%E6%95%A3&action=edit&redlink=1" \o "偏振態色散 (頁面不存在))（polarization mode dispersion），起因是單模光纖內雖然一次只能容納一個橫模的光波，但是這個橫模的光波卻可以有兩個方向的[偏振](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%81%8F%E6%8C%AF%22%20%5Co%20%22%E5%81%8F%E6%8C%AF)（polarization），而光纖內的任何結構缺陷與變形都可能讓這兩個偏振方向的光波產生不一樣的傳遞速度，這又稱為光纖的雙折射現象（fiber birefringence）。這個現象可以透過[偏振保持光纖](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%81%8F%E6%8C%AF%E4%BF%9D%E6%8C%81%E5%85%89%E7%BA%96&action=edit&redlink=1" \o "偏振保持光纖 (頁面不存在))（polarization-maintaining optical fiber）加以抑制。

### 訊號衰減

訊號在光纖內衰減也造成光放大器成為光纖通訊系統所必需的元件。光波在光纖內衰減的主因有物質吸收、[瑞立散射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%91%9E%E5%88%A9%E6%95%A3%E5%B0%84)（Rayleigh scattering）、[米氏散射](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%B1%B3%E6%B0%8F%E6%95%A3%E5%B0%84%22%20%5Co%20%22%E7%B1%B3%E6%B0%8F%E6%95%A3%E5%B0%84)（Mie scattering）以及連接器造成的損失。雖然石英的吸收係數只有0.03dB/km，但是光纖內的雜質仍然會讓吸收係數變大。其他造成訊號衰減的原因還包括[應力](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%87%89%E5%8A%9B%22%20%5Co%20%22%E6%87%89%E5%8A%9B)對光纖造成的變形、光纖密度的微小擾動，或是接合的技術仍有待加強。

### 訊號再生

現代的光纖通訊系統因為引進了很多新技術降低訊號衰減的程度，因此訊號再生只需要用於距離數百公里遠的通訊系統中。這使得光纖通訊系統的建置費用與維運成本大幅降低，特別對於越洋的海底光纖而言，[中繼器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E7%B9%BC%E5%99%A8%22%20%5Co%20%22%E4%B8%AD%E7%B9%BC%E5%99%A8)的穩定度往往是維護成本居高不下的主因。這些突破對於控制系統的色散也有很大的助益，足以降低色散造成的非線性現象。此外，[光固子](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%AD%A4%E5%AD%90%22%20%5Co%20%22%E5%AD%A4%E5%AD%90)也是另外一項可以大幅降低長距離通訊系統中色散的關鍵技術。

### 最後一哩光纖網路

雖然光纖網路享有高容量的優勢，但是在達成普及化的目標，也就是「[光纖到戶](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%A4%E5%88%B0%E6%88%B7%22%20%5Co%20%22%E5%85%89%E7%BA%96%E5%88%B0%E6%88%B6)」（Fiber To The Home, FTTH）以及「[最後一哩](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%80%E5%BE%8C%E4%B8%80%E5%93%A9%22%20%5Co%20%22%E6%9C%80%E5%BE%8C%E4%B8%80%E5%93%A9)」（last mile）的網路布建上仍然有很多困難待克服。然而，隨著網路頻寬的需求日增，已經有越來越多國家逐漸達成這個目的。以[日本](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%97%A5%E6%9C%AC%22%20%5Co%20%22%E6%97%A5%E6%9C%AC)為例，光纖網路系統已經開始取代使用銅線的[數位用戶迴路](https://zh.wikipedia.org/wiki/DSL)系統。

## 與傳統通訊系統的比較

對於某個通訊系統而言，使用傳統的銅纜作為傳輸介質較好，或是使用[光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%96%22%20%5Co%20%22%E5%85%89%E7%BA%96)較佳，有幾項考量的重點。[光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%96)通常用於高頻寬以及長距離的應用，因為其具有低損耗、高容量，以及不需要太多[中繼器](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E7%B9%BC%E5%99%A8)等優點。[光纖](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%96)另外一項重要的優點是即使跨越長距離的數條光纖並列，光纖與光纖之間也不會產生[串訊](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%B8%B2%E8%A8%8A&action=edit&redlink=1)（cross-talk）的干擾，這和傳輸電訊號的[傳輸線](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%82%B3%E8%BC%B8%E7%B7%9A%22%20%5Co%20%22%E5%82%B3%E8%BC%B8%E7%B7%9A)（transmission line）正好相反。

不過對於短距離與低頻寬的通訊應用而言，使用電訊號的傳輸有下列好處：

* 較低的建置費用
* 組裝容易
* 可以利用電力系統傳遞資訊

因為這些好處，所以在很短的距離傳輸資訊，例如主機之間、電路板之間，甚至是[積體電路](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D%E9%AB%94%E9%9B%BB%E8%B7%AF)晶片之間，通常還是使用電訊號傳輸。然而目前也有些還在實驗階段的系統已經改採光來傳遞資訊。

在某些低頻寬的場合，光纖通訊仍然有其獨特的優勢：

* 能抵抗[電磁干擾](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%B9%B2%E6%93%BE%22%20%5Co%20%22%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%B9%B2%E6%93%BE)（EMI），包括[核子](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%A0%B8%E5%AD%90%22%20%5Co%20%22%E6%A0%B8%E5%AD%90)造成的電磁脈衝。（不過光纖可能會毀於α或β射線）
* 對電訊號的阻抗極高，所以能在高電壓或是地面電位不同的狀況下安全工作。
* 重量較輕，這在[飛機](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A3%9B%E6%A9%9F%22%20%5Co%20%22%E9%A3%9B%E6%A9%9F)中特別重要。
* 不會產生火花，在某些易燃的環境中顯得重要。
* 沒有電磁輻射、不易被竊聽，對於需要高度安全的系統而言十分重要。
* 線徑小，當繞線的路徑被限制時，變得重要。

## 現行技術標準

為了能讓不同的光纖通訊裝置製造商之間有共通的標準，[國際電信聯盟](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%8B%E9%9A%9B%E9%9B%BB%E4%BF%A1%E8%81%AF%E7%9B%9F%22%20%5Co%20%22%E5%9C%8B%E9%9A%9B%E9%9B%BB%E4%BF%A1%E8%81%AF%E7%9B%9F)（International Telecommunications Union, ITU）制定了數個與光纖通訊相關的標準，包括：

* ITU-T G.651, "Characteristics of a 50/125 µm multimode graded index optical fibre cable"
* ITU-T G.652, "Characteristics of a single-mode optical fibre cable"

其他關於光纖通訊的標準則規定了發射與接收端，或是傳輸介質的規格，包括了：

* [10G乙太網路](https://zh.wikipedia.org/wiki/10G%E4%B9%99%E5%A4%AA%E7%B6%B2%E8%B7%AF)（10 Gigabit Ethernet）
* [光纖分散式數據介面](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%96%E5%88%86%E6%95%A3%E5%BC%8F%E6%95%B8%E6%93%9A%E4%BB%8B%E9%9D%A2)（FDDI）
* [光纖通道](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%BA%A4%E9%80%9A%E9%81%93)（Fibre channel）
* HIPPI
* [同步數位階層](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%90%8C%E6%AD%A5%E6%95%B8%E4%BD%8D%E9%9A%8E%E5%B1%A4)（Synchronous Digital Hierarchy）
* [同步光纖網路](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%90%8C%E6%AD%A5%E5%85%89%E7%BA%96%E7%B6%B2%E8%B7%AF)（Synchronous Optical Networking）

此外，在[數位音效](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B8%E4%BD%8D%E9%9F%B3%E6%95%88)的領域中，也有利用光纖傳遞資訊的規格，那就是由[日本](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%97%A5%E6%9C%AC)[東芝](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9D%B1%E8%8A%9D)（Toshiba）所制定的[TOSLINK](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=TOSLINK&action=edit&redlink=1)規格。採用[塑膠光纖](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%A1%91%E8%86%A0%E5%85%89%E7%BA%96&action=edit&redlink=1)（plastic optical fiber, POF）作為媒介，系統中包含一個採用紅光LED的發射器以及整合了光偵測器與放大器電路的接收器。