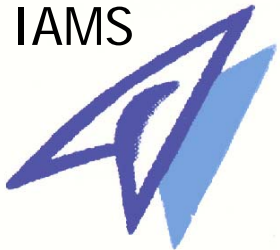


光學實驗

- 共有三個實驗：
 1. 麥克生干涉儀：
精密位移測量與壓電材料特性診斷
 2. 光的偏振(極)實驗：
線偏振、圓偏振與半波片、四分之一波片、玻璃的反射與 Brewster 角、晶體(或糖漿)的旋光性
 3. 將光耦合至光纖

IAMS



陳應誠

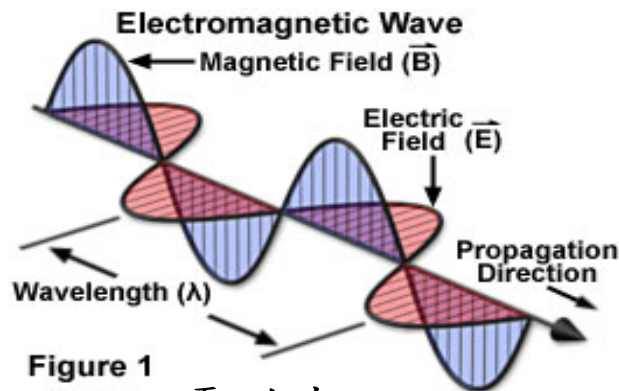
中央研究院原子與分子科學研究所

2016年7月, 高中生科學營



光的一些基本知識

- 波是什麼?能量在兩種不同形式交替轉換傳播出去
- 波有疊加、干涉、繞射、穿隧、共振等現象
- 光是一種電磁波，在自由空間（即非介質內）電場、磁場與行進方向互相垂直（正交），電場的震動方向稱為光的偏振（極）方向。
- 偏振方向相同的光才會干涉。
- 要在一定距離內看到清晰的干涉條紋，光的同調性（其實就是單頻性）要夠好，本實驗用的半導體雷射光，單頻性較日光燈好約 10^9 倍（ $\Delta\lambda < 10^{-6}$ nm, $\Delta f \sim 100$ kHz）。



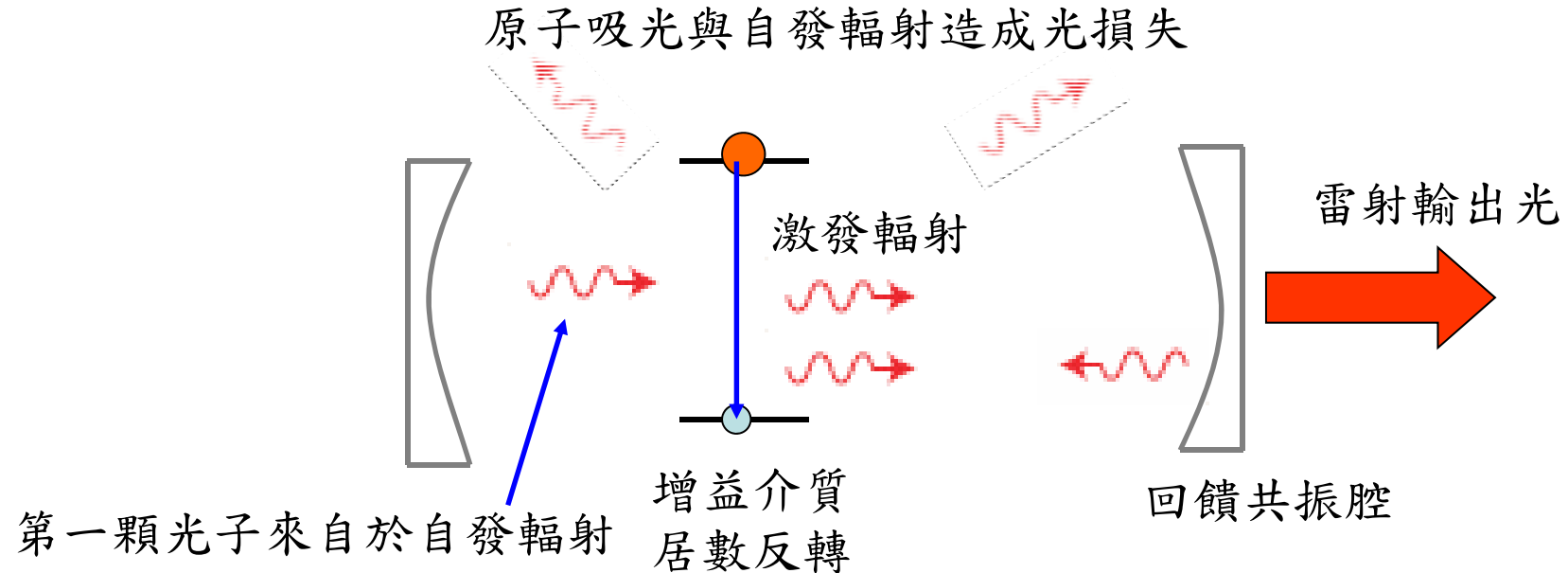
電磁波



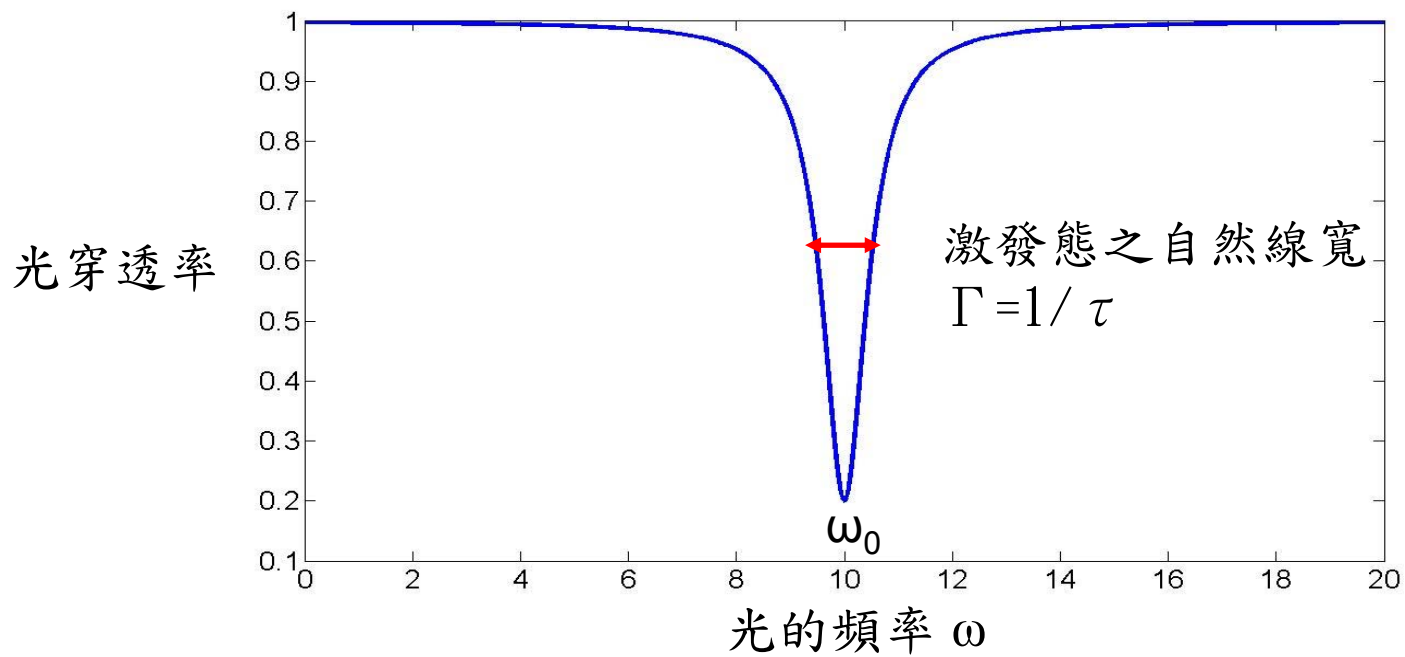
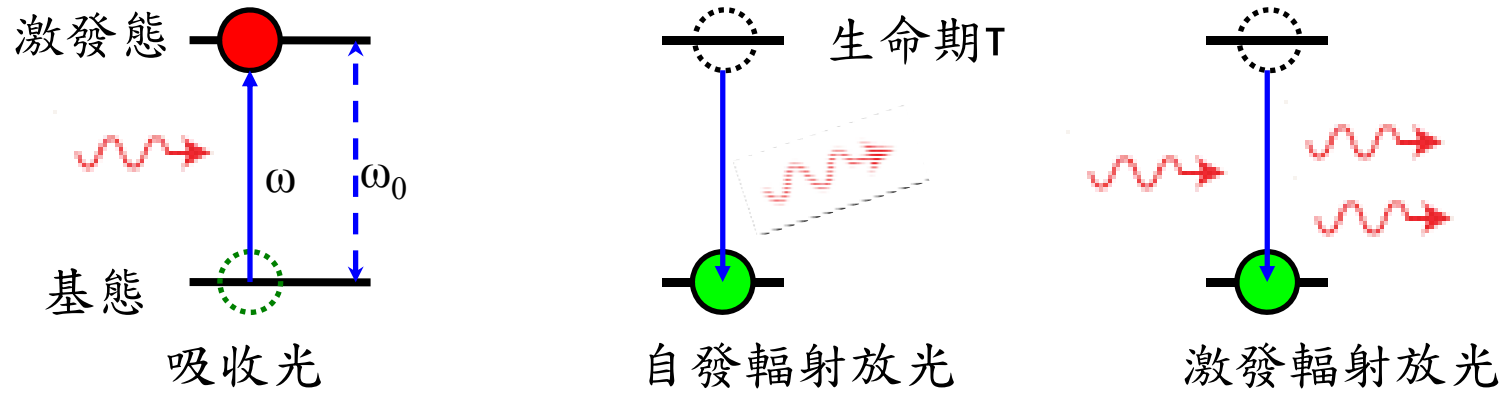
波的干涉

雷射光（激光）

- LASER, **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
- 雷射和一般光源的最大差別在於其單頻性（同調性）
- 共振腔只允許特定頻率的光回饋放大，此頻率篩選與放大機制是造成其輸出光頻寬甚窄的原因。



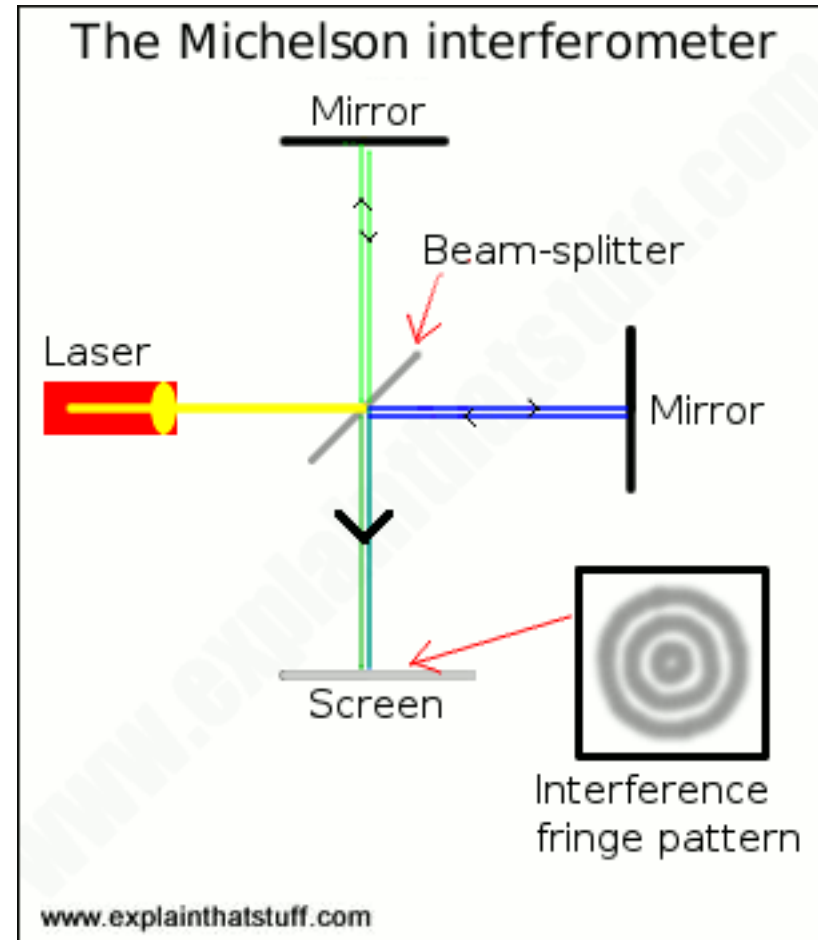
光與原子的交互作用



麥克生 (Michelson) 干涉儀

$$I_{\text{tot}} = \langle E_{\text{tot}}^2 \rangle = \langle [E_0 \cos(2kL_1 - \omega t) + E_0 \cos(2kL_2 - \omega t)]^2 \rangle$$
$$= E_0^2 + E_0^2 \cos(2k\Delta L)$$
$$I_{\text{max}} \Rightarrow \frac{4\pi\Delta L}{\lambda} = 2m\pi \Rightarrow \Delta L = \frac{m\lambda}{2}$$

- 位移半波長 ($0.343 \mu\text{m}$) 會經歷一次亮點 (或暗點)，可用於位移的精確量測！
 - 像晶圓製作機台皆有精密的干涉儀！
 - 現有之重力波干涉儀為基於此之加強版的干涉儀，可量測精度 $\Delta L / L = 10^{-21}$ ($L \sim 4\text{km}$)！

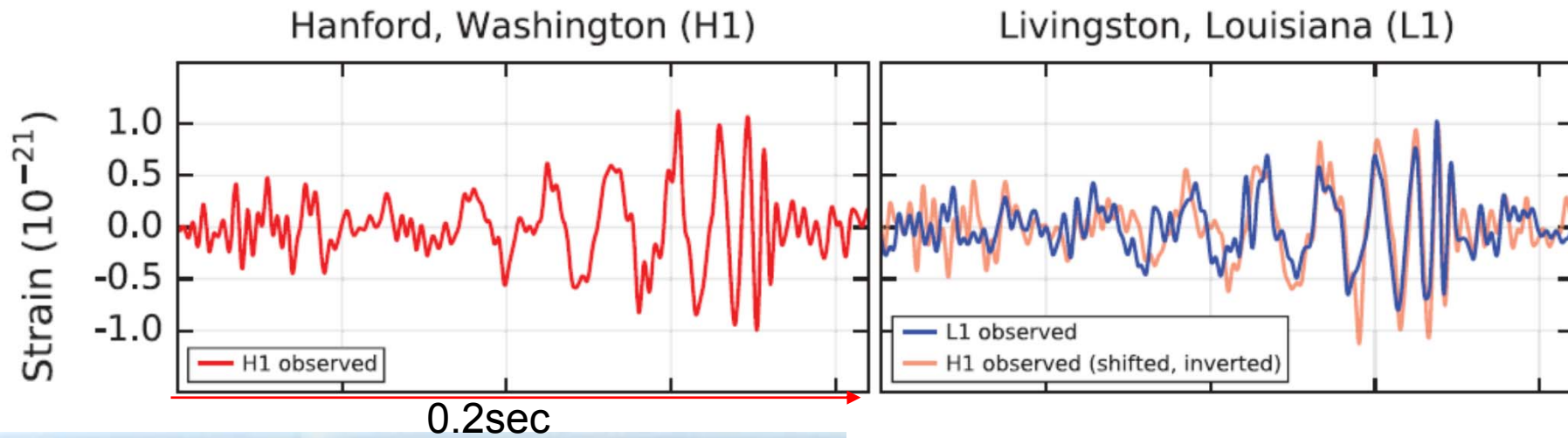


Laser Interferometric Gravitational wave Observatory, LIGO

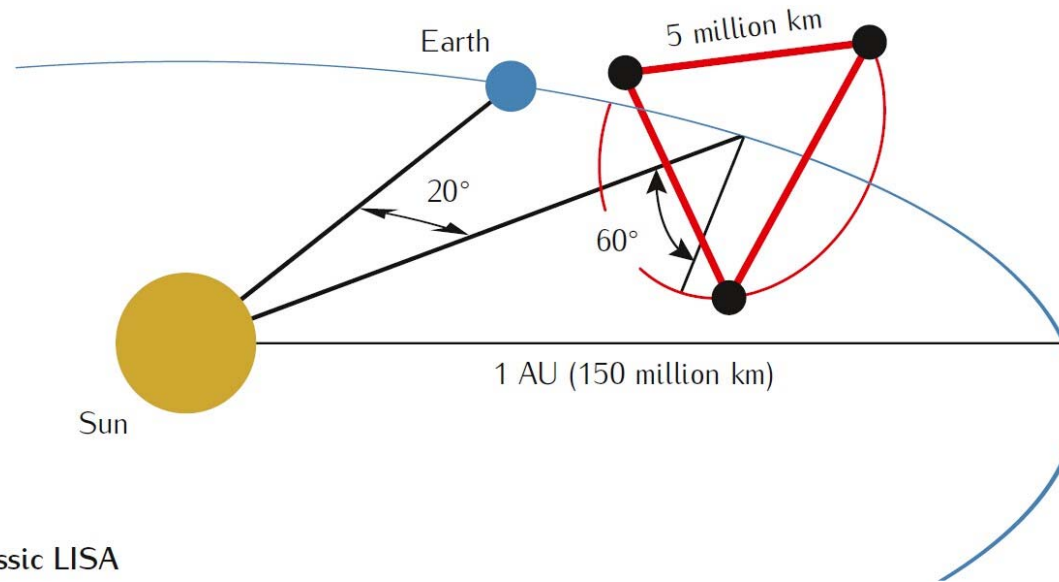
- First observation of GW by a merging binary black holes on 2015/09/14

$$\text{Strain} = \frac{\Delta L}{L} = 10^{-21}; L = 4\text{km}$$

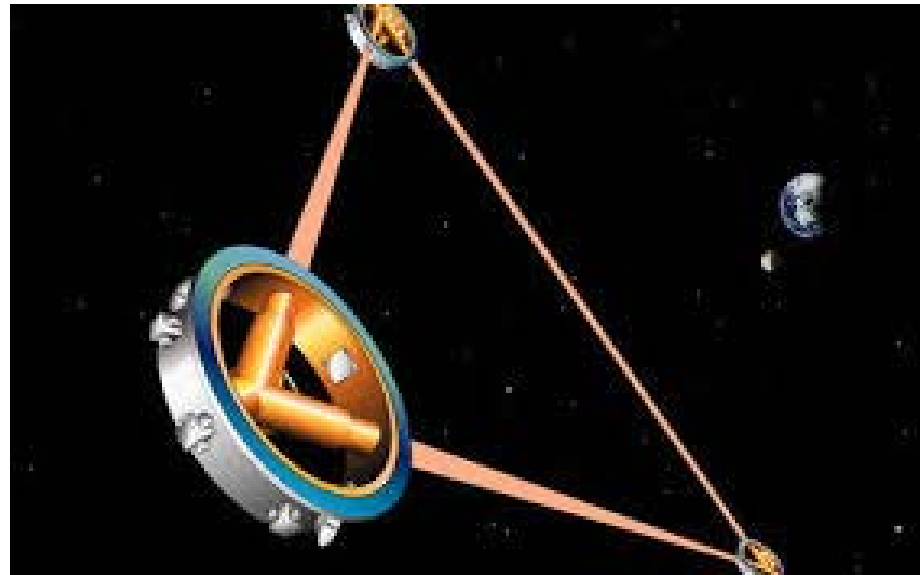
$$\Rightarrow \Delta L = 4 \times 10^{-18} \text{m}$$



eLISA Project, Space LIGO



Classic LISA



有傾斜、發散、或像差下的干涉條紋

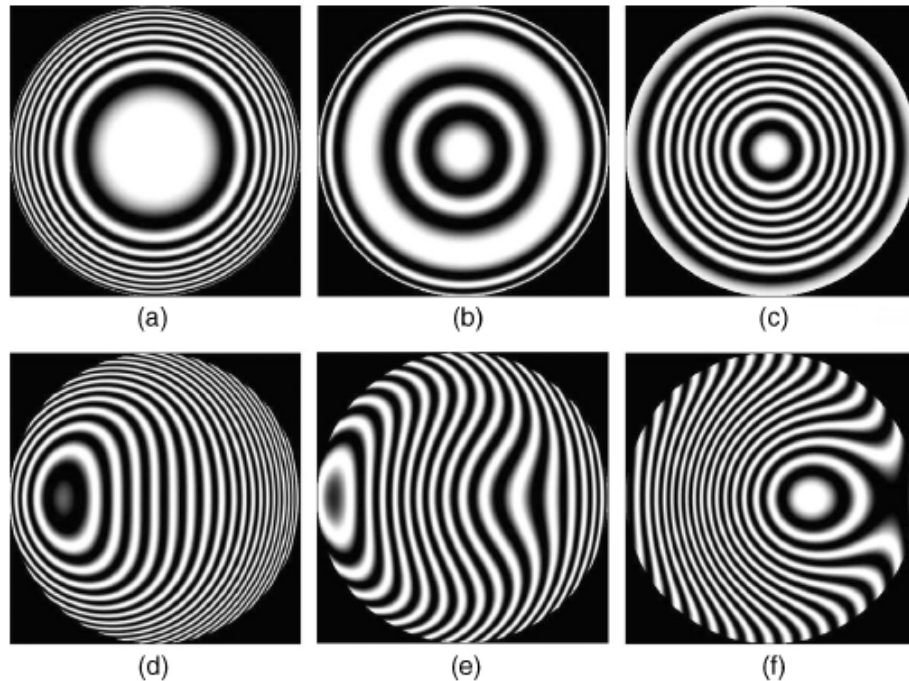


FIGURE 2.43. Interferograms for a lens with spherical aberration at the paraxial, medium, and marginal foci.

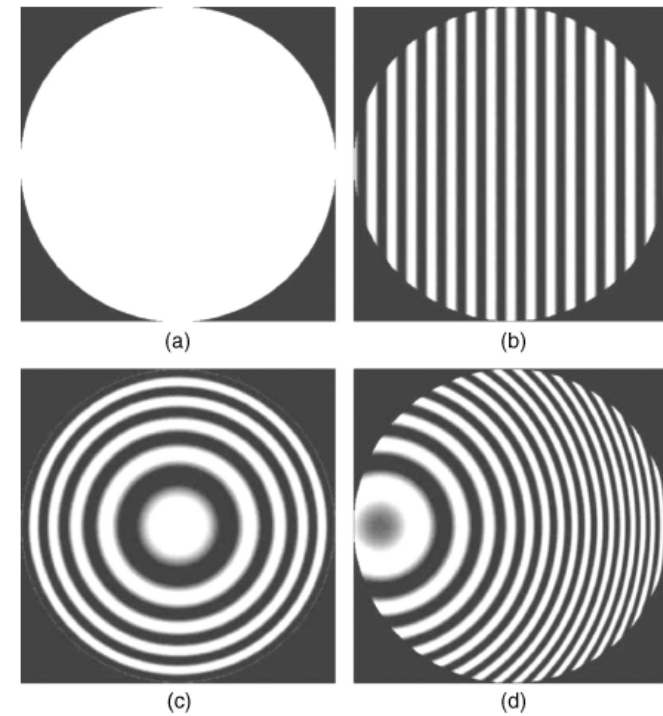
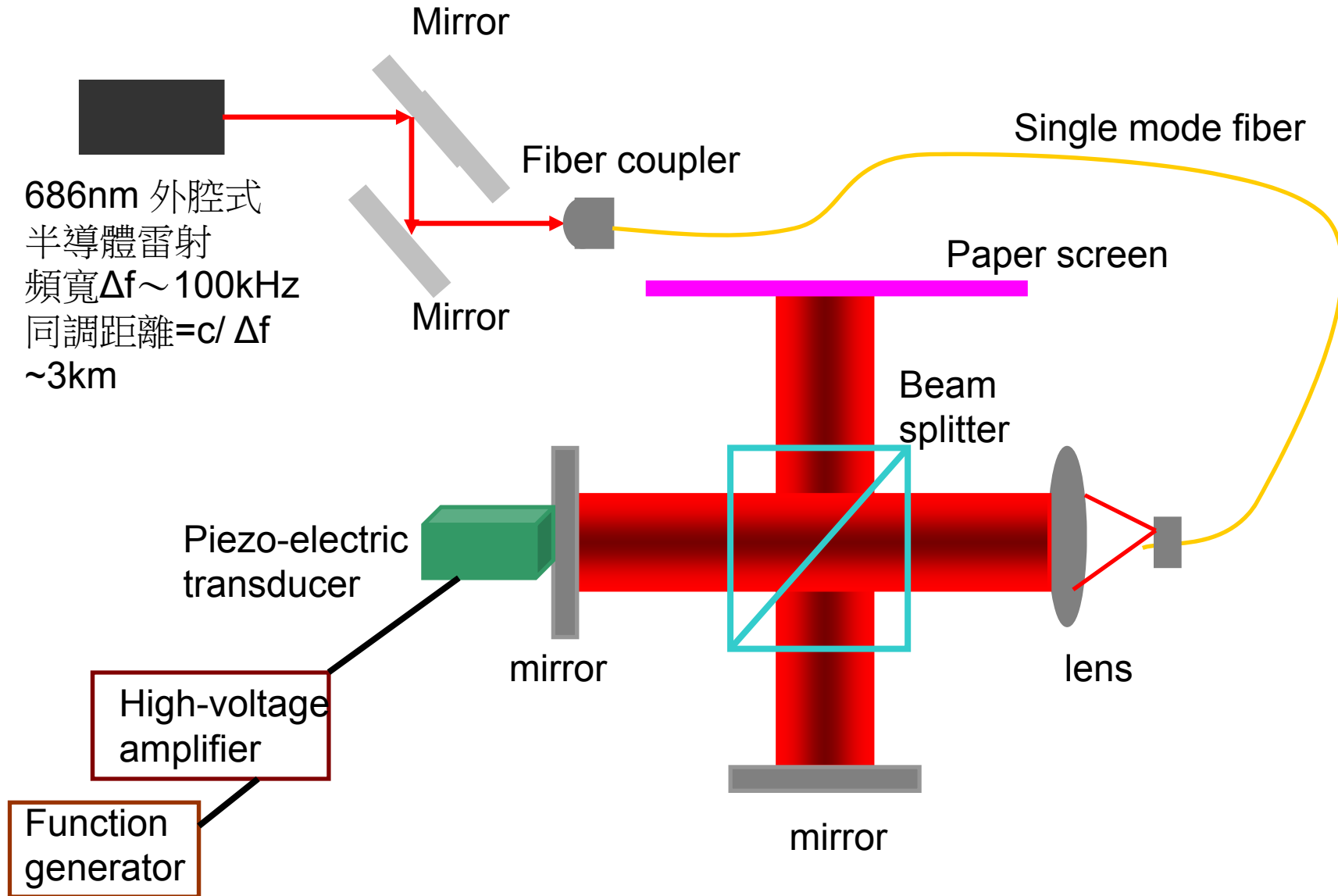


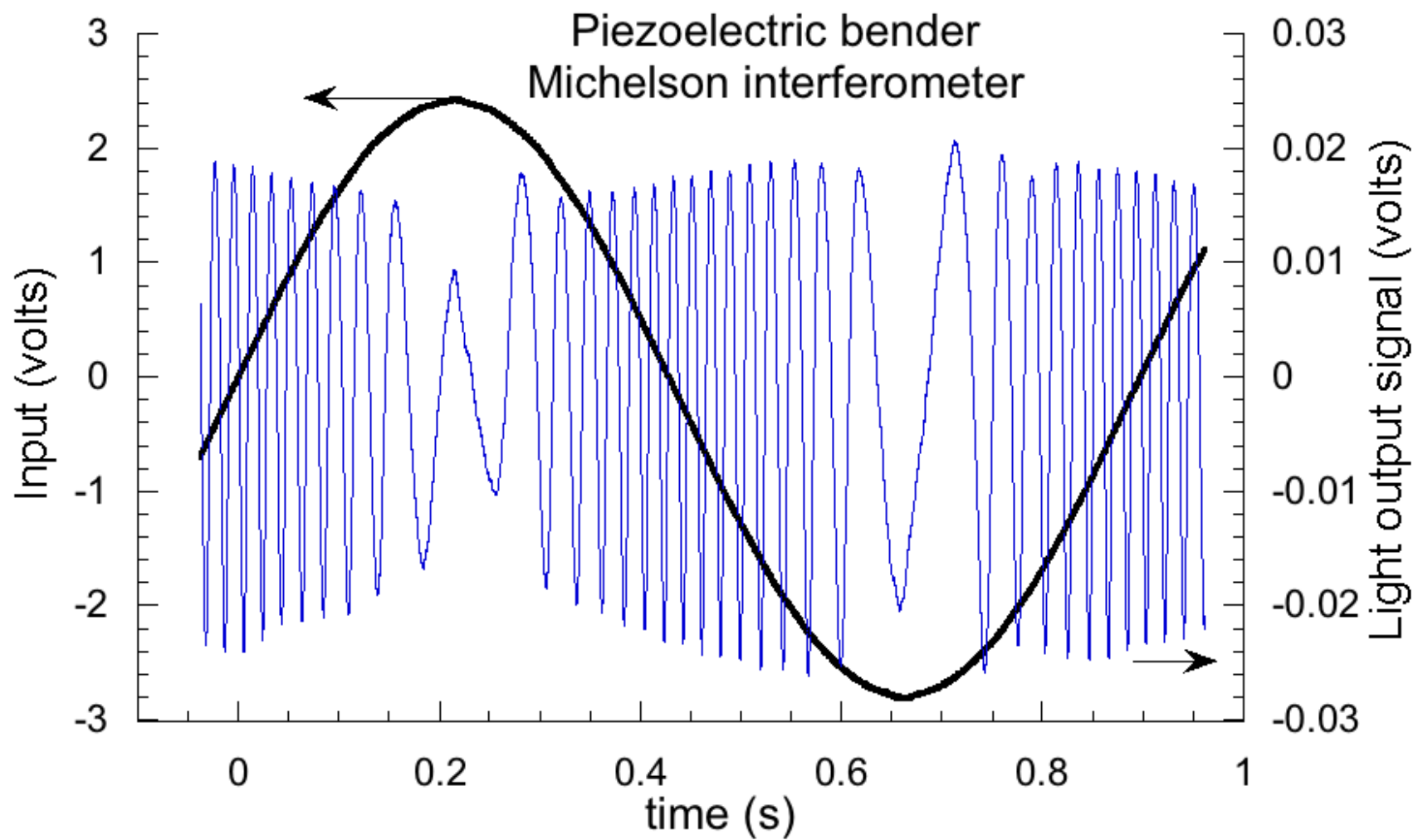
FIGURE 2.42. Interferograms for a perfect lens. (a) With no tilt or defocusing. (b) With tilt. (c) With defocusing. (d) With tilt and defocusing.

實際實驗裝置



麥克生干涉儀

- 實驗目的：熟悉麥克生干涉儀的架設，並用它做位移的精密度量測，測出壓電材料(低頻驅動時)的電壓位移係數。
- 實驗儀器：紅光半導體雷射一台(波長663nm)、鏡子數個、球面透鏡數個、非偏振分光鏡一個、有黏壓電材料(piezo electric transducer PZT)的鏡子一個、高壓放大器一台(PZT用)、波型產生器一台、光偵測器一個、示波器一台、遮光孔洞(iris)。
- 實驗內容：
 1. 雷射光經擴束，經非偏振分光鏡，分成兩路各經一鏡子反射，其中一個子黏有壓電材料，可電控移動。微調鏡子角度，使在分光鏡另一側看到干涉條紋，微調光路可看到各種形狀的干涉條紋。
 2. 波形產生器產生約0.5Hz的正弦波或三角波，電壓必須為正值，經高壓放大器一台放大十倍，驅動壓電材料(正負不可接反)，以肉眼觀察條紋亮暗變化情形。
 3. 改以光偵測器偵測干涉條紋中心的亮(暗)點，可在光偵測器前以遮光孔洞遮擋不要的部分。將波形產生器波形及光偵測器輸出分別接至示波器，頻率增高制約10Hz方便觀看，估算壓電材料的電壓位移係數。

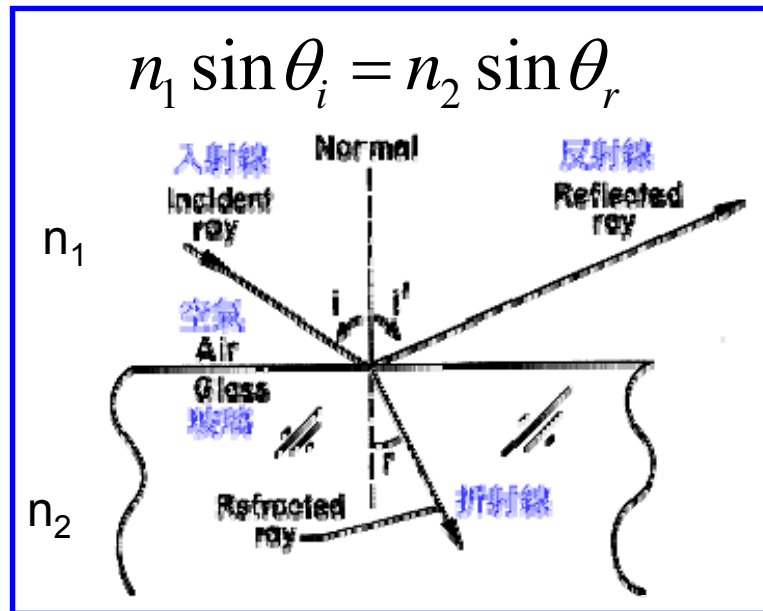


光的反射與折射

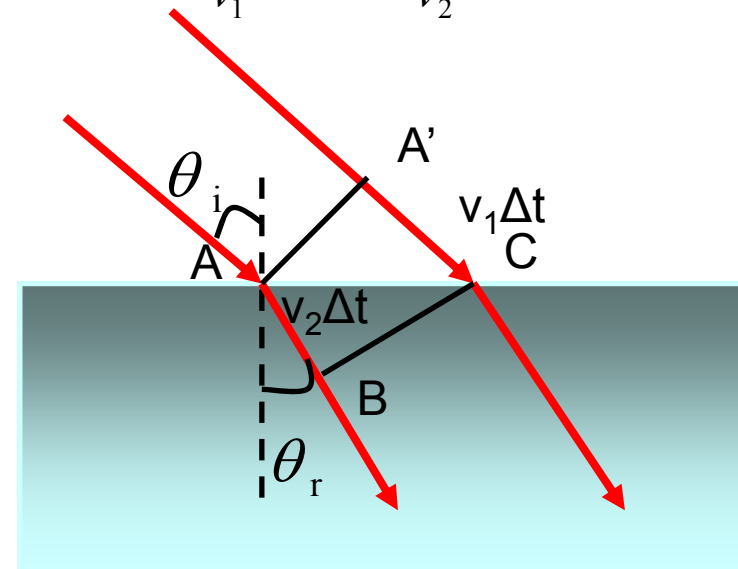
- 光的反射與折射都是介質對光的反應產生的電磁場與原入射電磁場總合的結果。
- 折射率:介質對入射光反應程度的一個參數

$$n(\lambda) \equiv \frac{c}{v(\lambda)} = \text{Speed of light in vacuum/phase velocity in medium}$$

- 相速度:光的波前移動速度
- 對一平整的介面:入射角=反射角
- 折射遵守Snell's Law

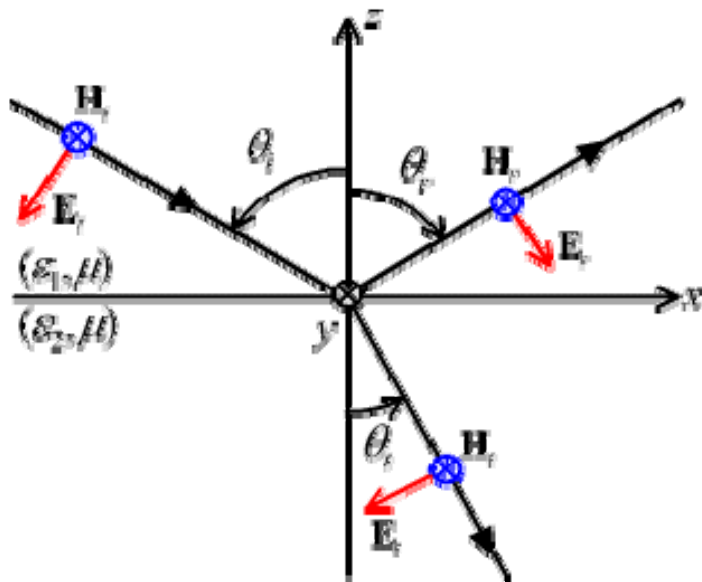


$$AC = \frac{v_1 \Delta t}{\sin \theta_i} = \frac{v_2 \Delta t}{\sin \theta_r}$$
$$\Rightarrow \frac{c}{v_1} \sin \theta_i = \frac{c}{v_2} \sin \theta_r$$



不同偏振的光經玻璃反射率跟入射角關係

- 入射與反射光決定一平面，入射光的有偏振兩種可能，即和該平面垂直或平行，反射率公式不一樣，經電磁學邊界條件分析結果如下（Fresnel公式）：

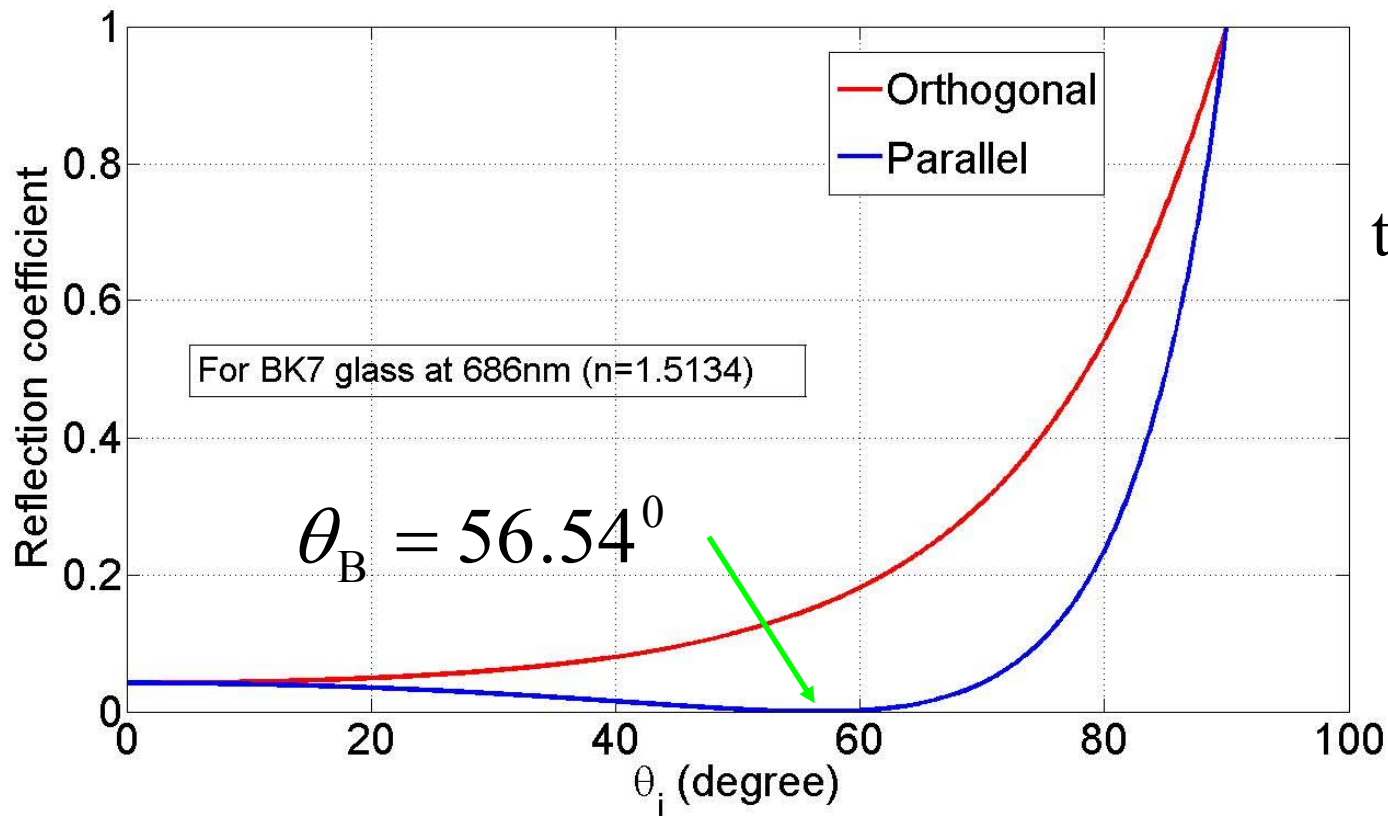


$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

$$R_{\perp} = \left[\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \right]^2$$

$$R_{\parallel} = \left[\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \right]^2$$

- 光垂直入射($\theta_i=0$)玻璃，反射率約5%;大角度反射 ($\theta_i\rightarrow 90^\circ$)，反射率近似100%、像個鏡子。一個玻璃就可當一個反射率可調的分光鏡 (beam splitter)。
- 對偏振和入射反射平面平行的光，存在一特殊入射角(Brewster角 θ_B) 反射率是零。此角度發生在下列公式。
- Brewster角在實驗上常用於避免有反射光造成損失。



$$\tan \theta_B = \frac{n_t}{n_i}$$

光的偏振實驗

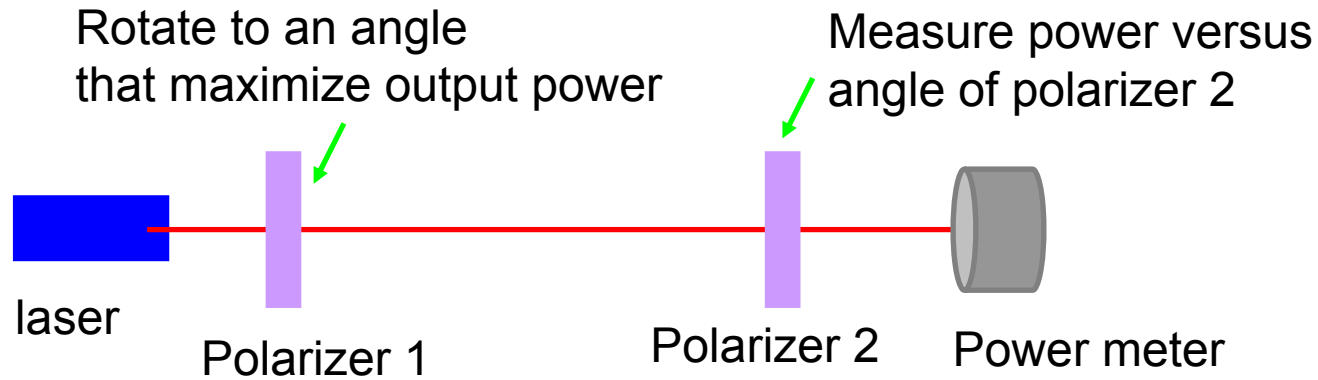
- 實驗目的: 熟悉光的線偏振、圓偏振特性及如何轉換，及不同偏極光經玻璃反射的反射率隨反射角改變情形，及旋光性物質對線性光偏振的影響。
- 實驗儀器: 紅光半導體雷射一台(波長663nm)、鏡子數個、光功率計一個、半波片兩個、四分之一波片兩個、線偏振片三個、偏振分光鏡一個、BK7玻璃一個。
- 實驗內容:
 1. 半導體雷射輸出的光已是線偏振，旋轉線偏振片角度，以肉眼快速觀察通過的光功率情形，接著以光功率計量測通過的功率和線偏極片角度的關係。
 2. 讓雷射光經過第一片線偏振片，調整其角度使通過的光最強；再加入第二片線偏振片，調整其角度使通過的光最弱；再加入第三片線偏振片於該兩片中間，旋轉其角度，觀察光通過最後面(及第二片)的偏振片的功率情形；請思考為何光又可通過？
 3. 在兩片垂直的線偏振片中間，加入一透明的投影片、塑膠袋、蠟紙、透明尺等等，觀察日光燈通過情形，並可嘗試扭曲該透明片後再觀察有何不同。
 4. 雷射光經半波片及偏振分光鏡，旋轉半波片角度，以肉眼快速觀察偏振分光鏡的穿透光及反射光的功率情形，以光功率計量分別量測該兩道光的功率和線偏極片角度的關係。

5. 雷射光經四分之一波片及偏振分光鏡，旋轉四分之一波片角度使偏振分光鏡的穿透光及反射光的功率最接近1:1，此時光的偏振已變為圓偏振，將偏振分光鏡改為一線偏極片，旋轉線偏極片角度，看是否經過線偏振片的光功率和其角度幾乎無關。
6. 讓雷射光經半波片，將BK7玻璃架於一轉盤上並於光的路徑上，旋轉半波片角度使光的偏振方向分別是在水平面或和水平面垂直(可用偏振分光鏡確認)，量測這兩種偏振下，經玻璃反射的光功率和光的入射角度關係。如果光的偏振方向是和水平面垂直，在某一特定入射角(稱為Brewster角)反射光的強度幾乎是零。(思考問題:只給你一個線偏振片，如何利用該特性決定該線偏振片之偏振方向?)
7. 線偏振光經旋光晶體(或糖漿)的旋光性研究，雷射光先經一偏振片，確認其偏振方向，經晶體(或糖漿)後，用另一偏振片確認光的新的偏振方向。可改變糖漿濃度或長度，量測偏極方向旋轉程度。

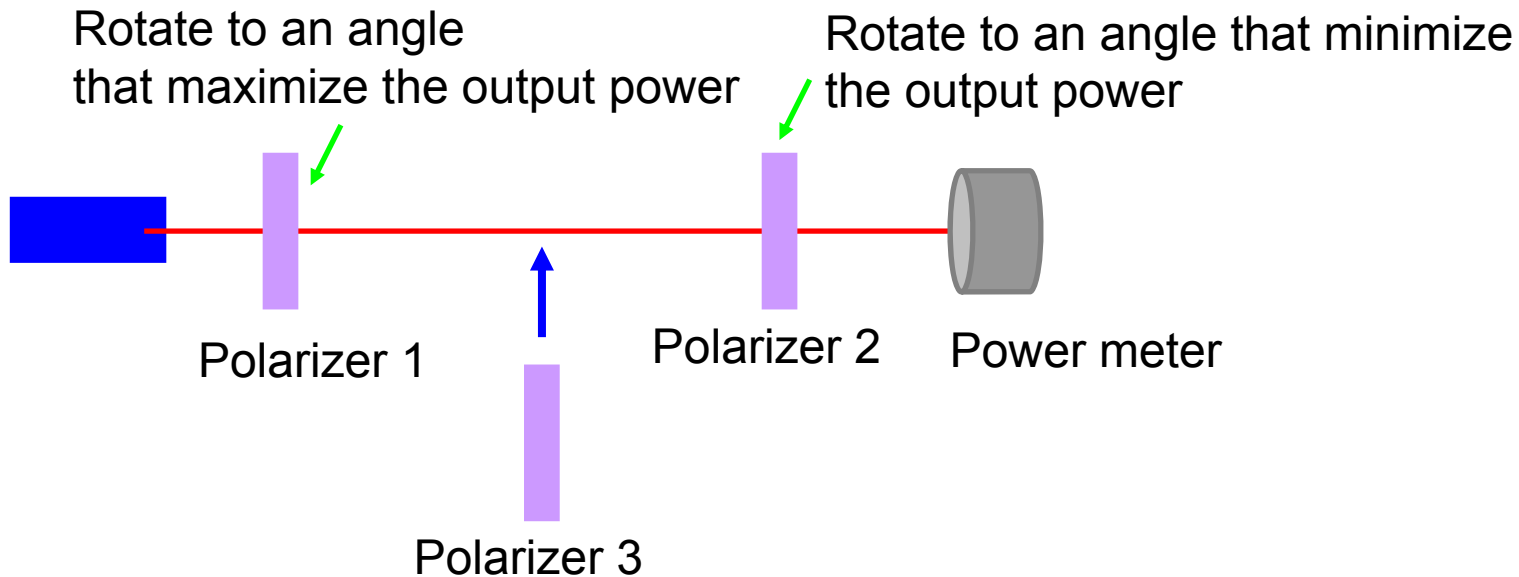
思考問題:

1. 只給你一個線偏振片，如何利用上面所學的光經玻璃反射偏振特性決定該線偏振片之偏振方向?
2. 如何利用旋光晶體及其他的偏振元件組合成雷射光的隔離器(即線偏振的雷射光正向走可通過、但反射回來的反向走的光不通過)?

1,

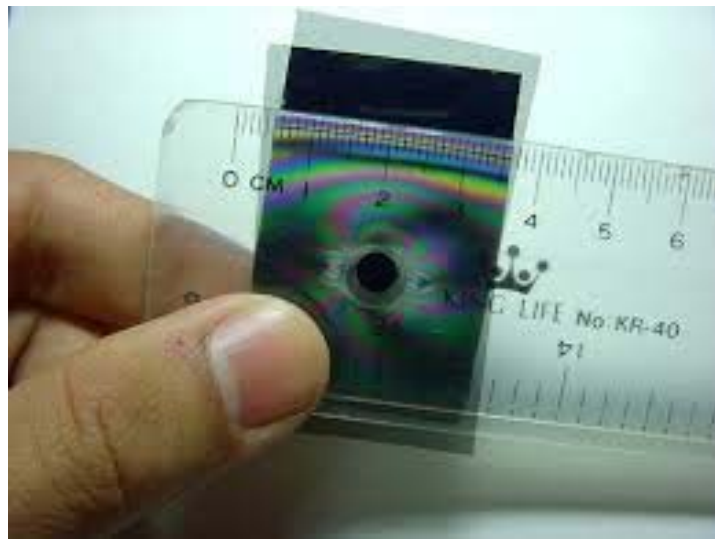


2,

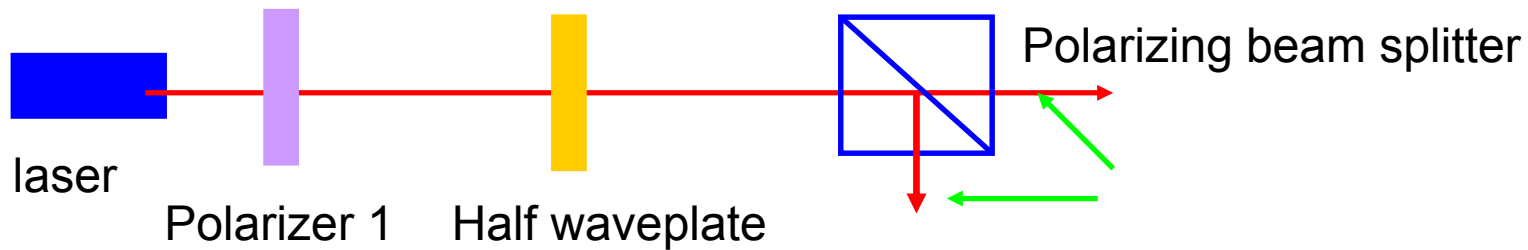


- Then add polarizer 3 into the beam path, rotate it and see the power after polarizer 2. Why the light can pass through the polarizer 2 again?

3, 偏振片藝術創作

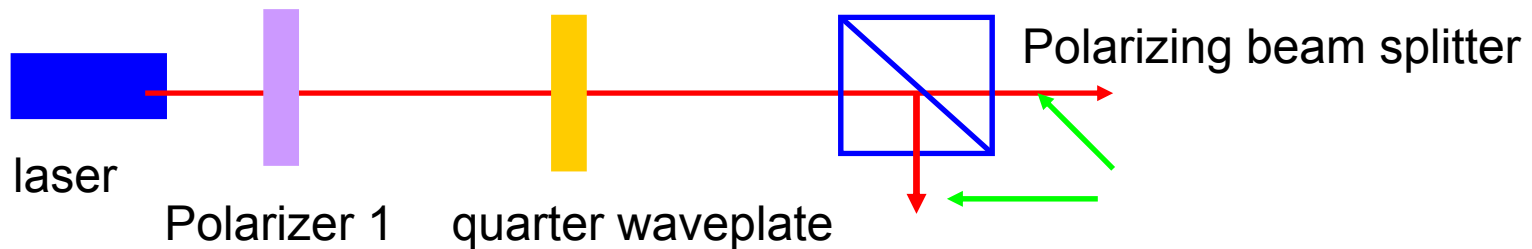


4,



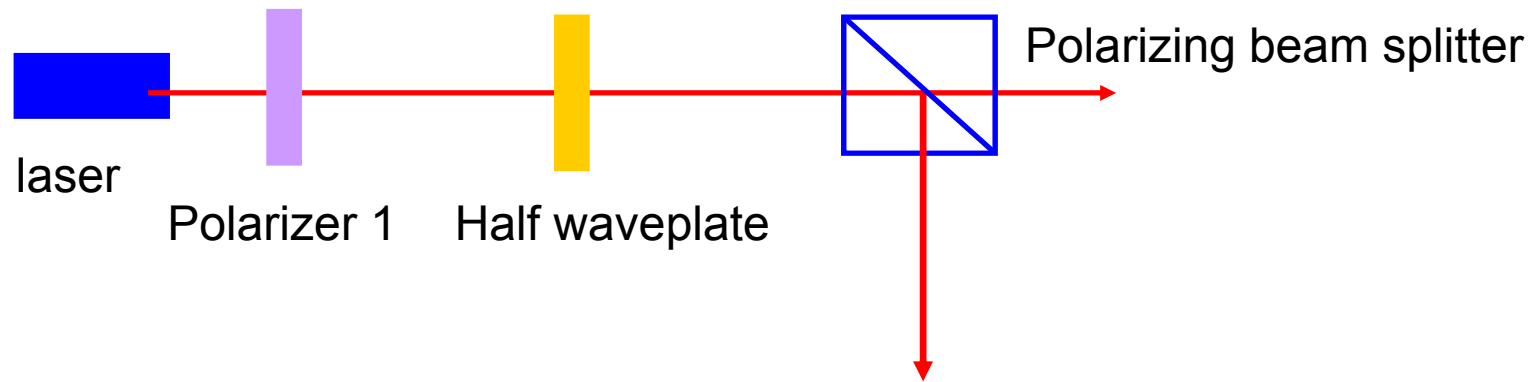
- Use polarizer 2 to check the polarization for transmitted and reflected light !
- Rotate angle of half waveplate and measure the transmitted and reflected power

5,



- Rotate the angle of quarter waveplate such that the power ratio of transmitted and reflected power after a PBS is about 1:1. Light is circularly polarized now!
- Replace the PBS by polarizer 2. Measure the output power after polarizer 2 versus its angle. Make sure the power is almost constant for any angle!

6,



7,



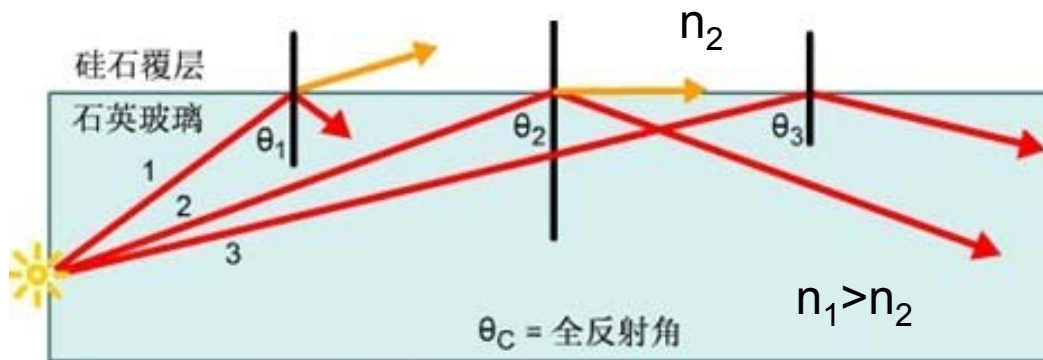
- Use the polarizer 2 to check how much the polarization angle change after the helical crystal or molasses.
- You can try to increase the density of the molasses to see if the polarization rotation angle become larger!

光的全反射

- 光從折射率大的介質打至折射率小的介質，當入射角大於一臨界角度以上，所有的光會反射（沒有折射光）。

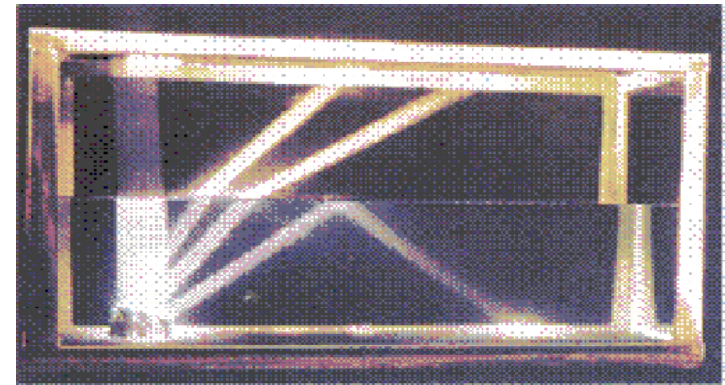
$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (n_1 > n_2); \sin \theta_r = \frac{n_1 \sin \theta_i}{n_2} \leq 1$$

$$Critical\ Angle \Rightarrow \theta_r = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \frac{n_1 \sin \theta_i}{n_2} = 1 \Rightarrow \theta_i = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$



- Ray 1: $\theta_1 < \theta_C$, 反射 + 折射
Ray 2: $\theta_2 = \theta_C$, 反射 + 折射
Ray 3: $\theta_3 > \theta_C$, 所有入射光將全部反射

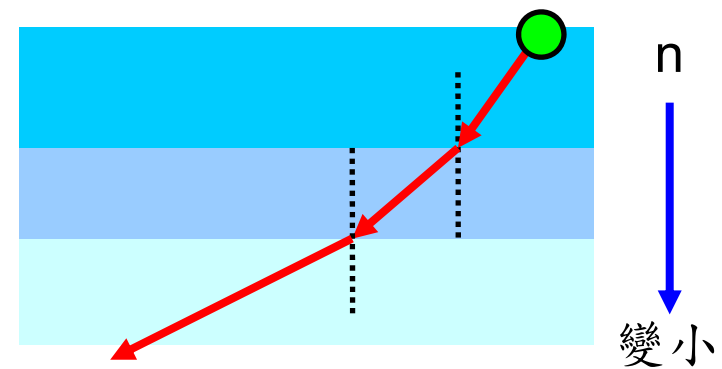
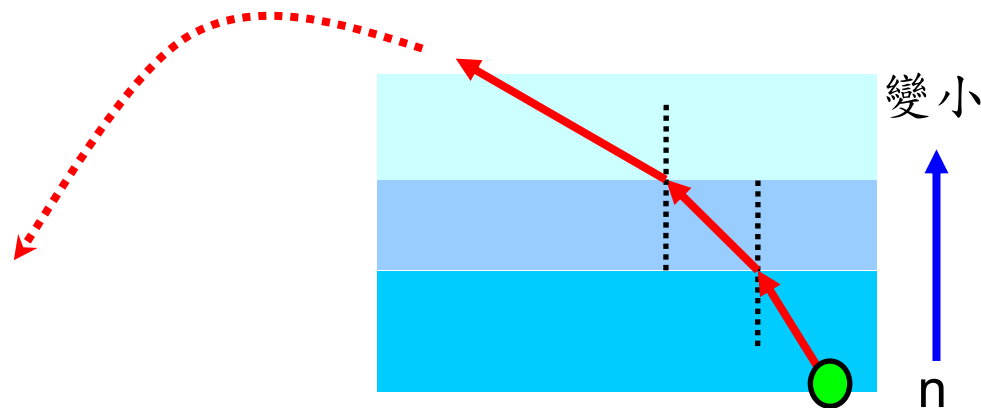
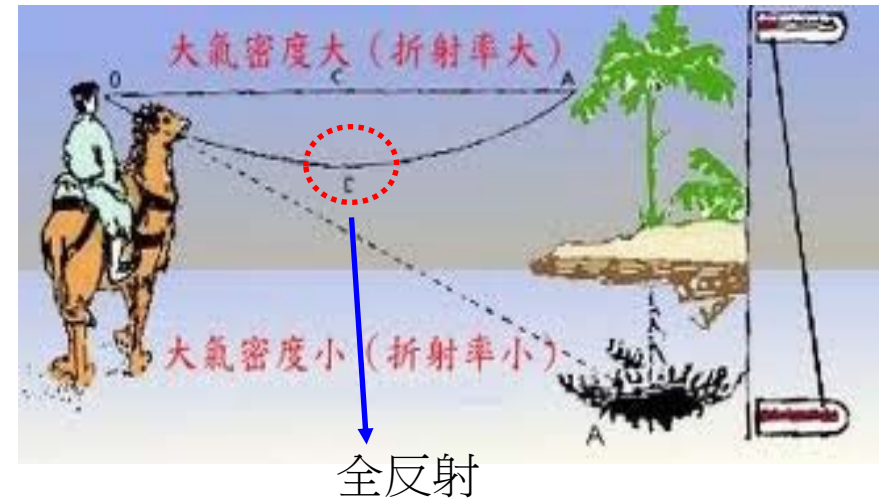
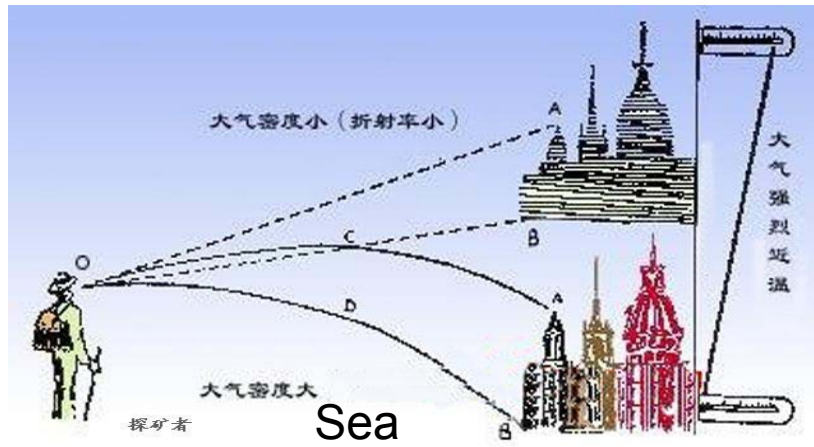
图 2.13 全反射原理



水槽內看到全反射的實驗。

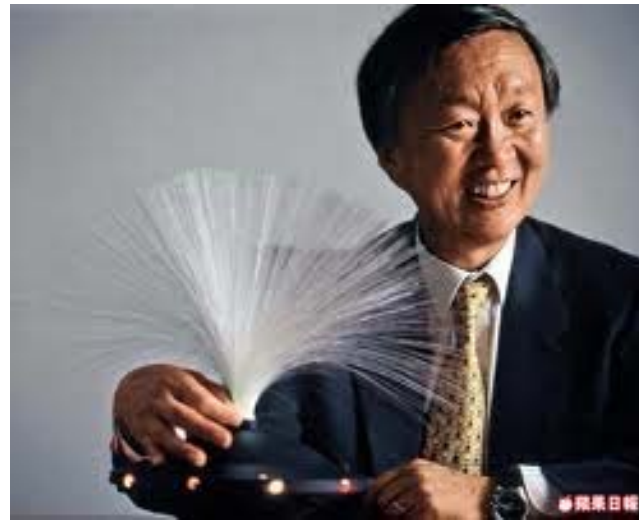
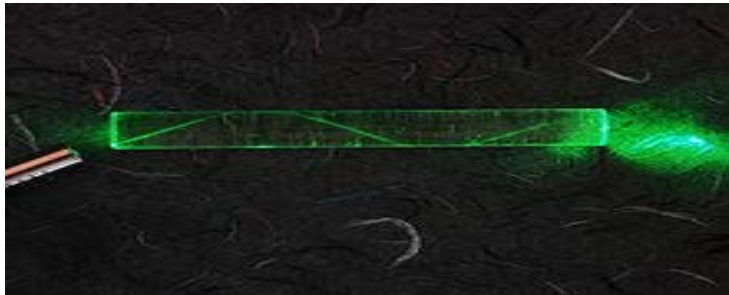
自然界中折射/反射對光的導引：海市蜃樓

- 在地表垂直溫差較大的環境（如海面或沙漠、路面），空氣折射率隨地表高度改變（溫度較高區空氣密度較小、故折射率較小），光因折射及/或(全)反射路徑呈曲線，人會誤認遠處物體變高或變近現象。



光的導引

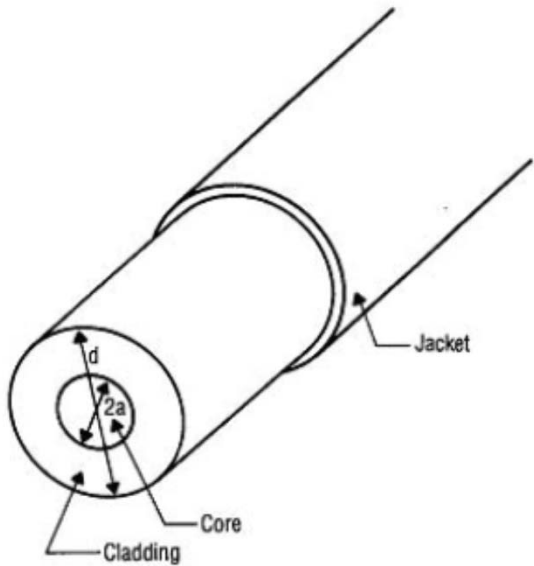
- 利用介質（如水或丙烯酸等）形成的導管及全反射現象，可做出光的導管（即“巨型”光纖）。
- 但是要有具體光傳輸應用的光纖，最重要的考量是其傳輸損失必須夠小
- 高錕博士於1966年提出以石英基玻璃纖維當光導進行光通訊的構想，關鍵是損失要小於20dB/km。他獲頒2009年諾貝爾物理獎。
- 1970年Corning glass 公司才做出損失約20dB/km的光纖[每公里損失約99%功率]。現今最好的光纖損失約0.18dB/km(@1550nm)[每公里損失約4%]。
- 現今，光纖通訊已經於每天的日常生活中使用，Internet如此發達、傳遞資料量如此高都要拜光纖的發展所賜。



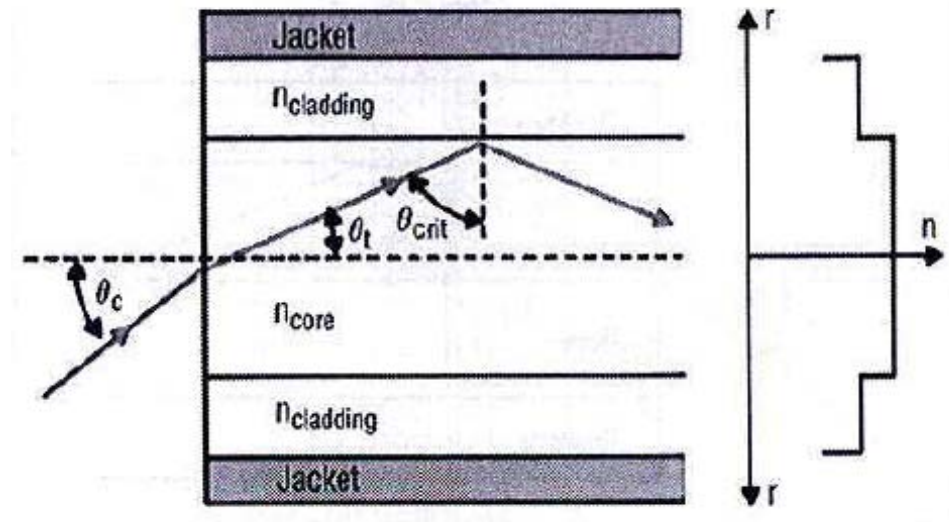
高錕

光纖: Structure

- Core: SiO_2 doped with GeO_2 ; 4-8 μm for single-mode fiber, 50-100 μm for multi-mode fiber
- Cladding: pure SiO_2 or with less GeO_2 , 125-140 μm
- Jacket: Plastic for protection, 500-1000 μm

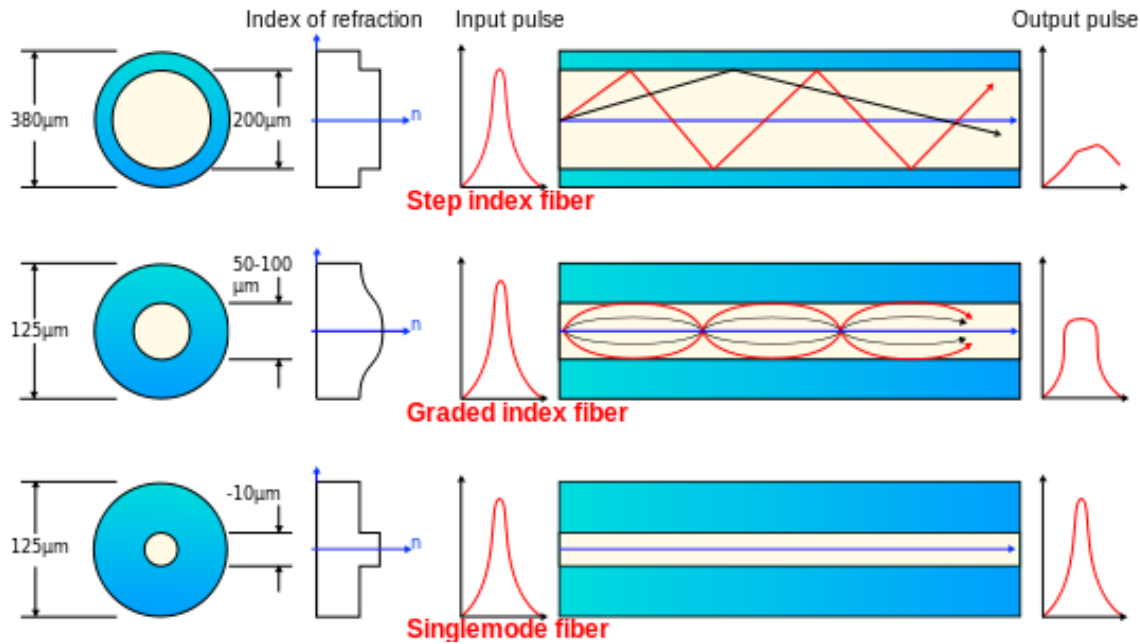


圖一 光纖剖面



圖二 步階式光纖

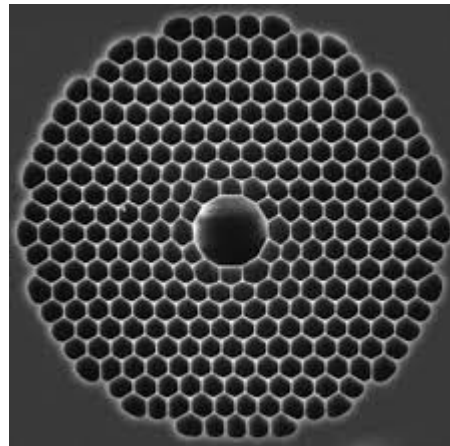
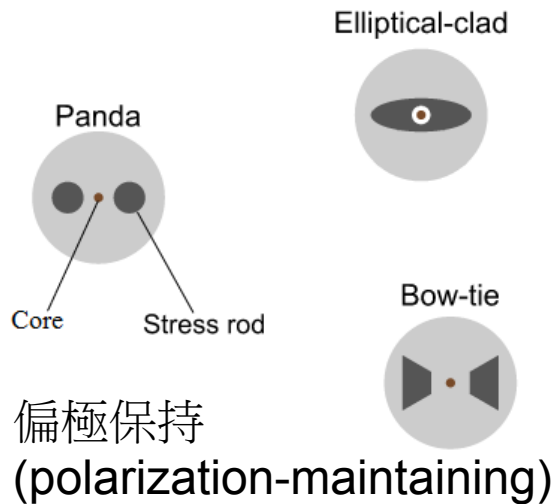
光纖：型式



多模 (multi-mode)

(減少不同光程的色散效應)

單模 (single mode)



中空光子晶格光纖
(hollow core photonic Band-gap fiber)

光纖:接受角或Numerical Aperture

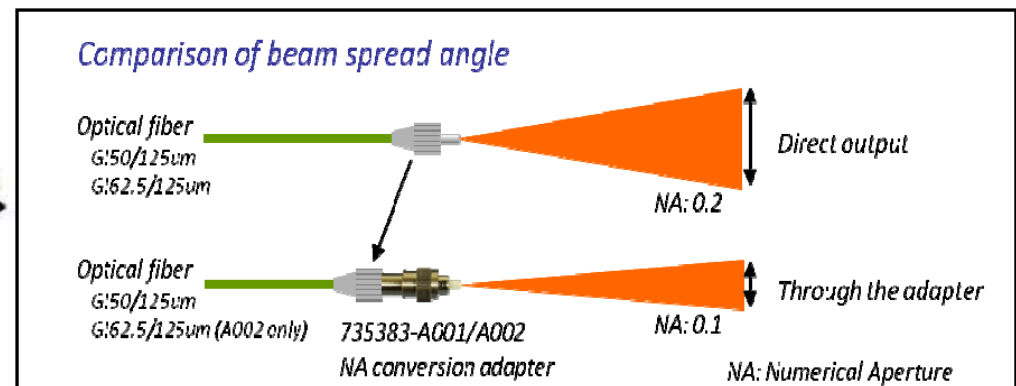
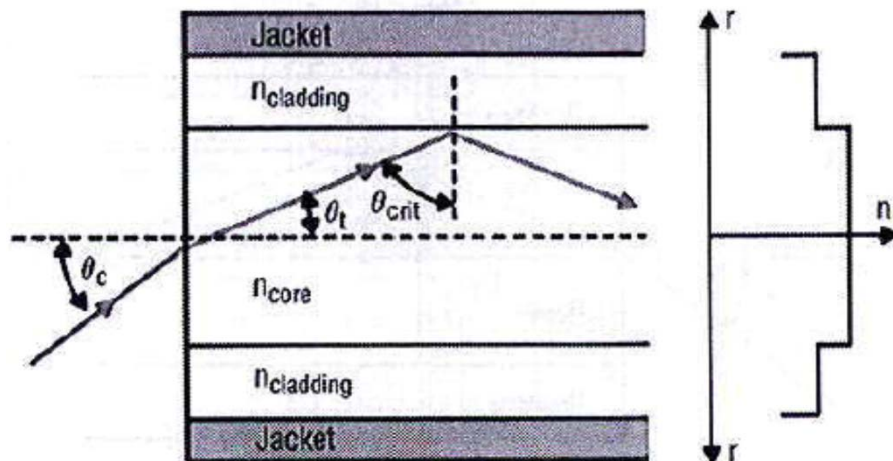
- 只有入射角小於一臨界角度的光，才能藉由全反射在光纖內來回反射及長距離傳遞，超出此角度的入射光會有部分折射至cladding層並快速損失

$$n_0 \sin \theta_c = n_{core} \sin \theta_t = n_{core} \sin(90 - \theta_{crit})$$

$$= n_{core} \cos \theta_{crit} = n_{core} \sqrt{1 - \sin^2(\theta_{crit})}$$

$$n_{core} \sin \theta_{crit} = n_{cl} \sin 90 = n_{cl}$$

$$\therefore n_0 \sin \theta_c = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cl}^2} \equiv N.A.$$



光纖：橫模(Transverse Mode)

- 除了上述接受角外，考慮光的傳遞之Maxwell波動方程，在橫（radial）方向還要滿足邊界條件（駐波條件），光才能在core穩定傳播。

$$2\pi \left[\frac{2a}{\lambda_0 / (n_{core} \cos \theta)} \right] - 2\phi = 2m\pi$$

m : 整數

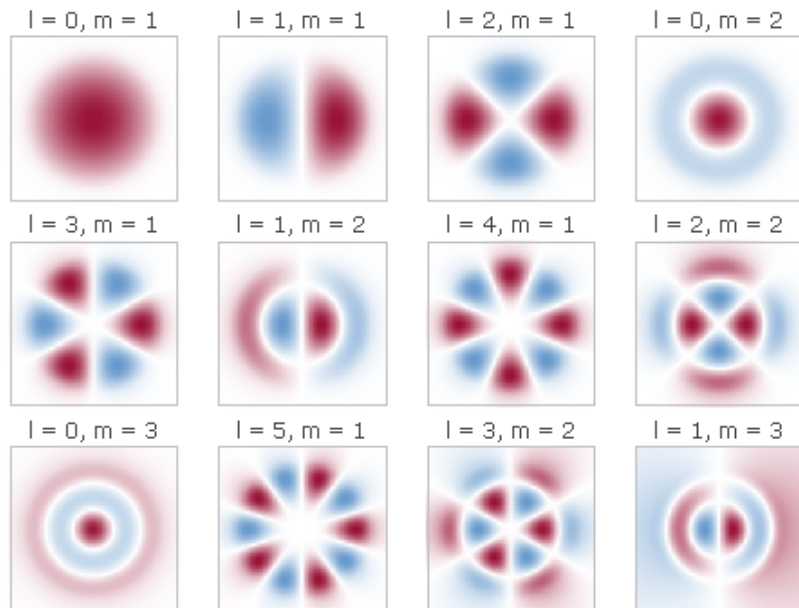
其中 a 為核心半徑

λ_0 為光波於真空中的波長

ϕ 為界面全反射引進之相位差

or $\frac{2\pi a n_{core} \cos \theta}{\lambda_0} - \phi = m\pi$

- 最多的傳播模態數可由最大接受角估



$$m \leq \frac{2an_{core}}{\lambda_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_{cl}}{n_{core}}\right)^2} - \frac{\phi}{\pi} \equiv \frac{V}{\pi} - \frac{\phi}{\pi}$$

where $V \equiv \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_{core}^2 - n_{cl}^2}$

若core半徑較小， $V < 2.405$ ，則只有單一模態；若core半徑較長，則可允許多模態。

光纖：連接器型式

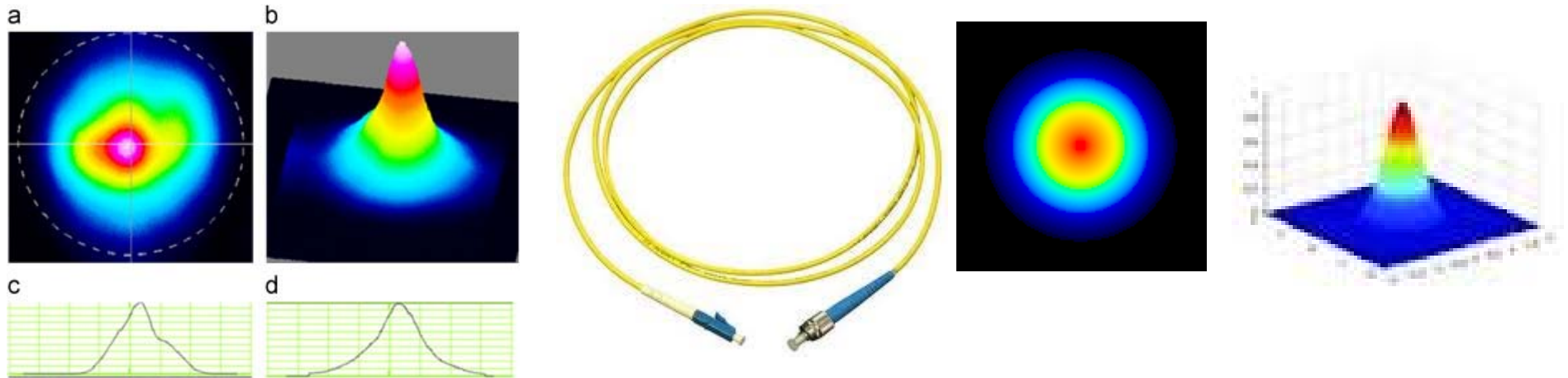


斜面 (7°)
避免反射

平面

光纖於實驗室應用

- 某些雷射光（例如半導體雷射）形狀不好，可耦合進單模光纖整成高斯光束，以利應用。但會犧牲部分功率，因此光的高效率耦合至光纖是一重要工作。
- 許多雷射可集中於一溫度、振動控制良好的光學桌，並以光纖將光導至實驗區。避免因光路走太遠，光學桌或機械元件熱漲冷縮造成光路改變。



光纖實驗

- 實驗目的：認識單模與多模光纖輸出光的不同，熟悉高效率的將光耦合至單模光纖的過程。
- 實驗儀器：單模光纖一條、多模光纖兩條、紅光半導體雷射一台(波長663nm)、光纖耦合器、球面透鏡數個、柱面透鏡數個、光功率計一個、鏡子數個、光纖檢測器 (fiber checker)，CCD光束分佈診斷儀。
- 實驗內容：
 - 先用光纖檢測器快速讓光耦合至單模或多模光纖，觀察其輸出光的形狀有何不同。
 - 讓光纖檢測器的光維持連續開狀態並耦合至單模光纖，以CCD光束分佈診斷儀量測從光纖出來的光之光束大小隨其距光纖出口距離的變化情形，利用高斯光束傳播公式，決定光的發散角度以及光束在光纖出口處的大小。
 - 架設雷射光、兩個鏡子、及光纖耦合器至適當相對位置，嘗試用不同焦距的物鏡，利用CCD光束分佈診斷儀診斷光束聚焦情形，看何種組合才能得到最接近如2所決定出光的收斂角度與光束大小。
 - 架設光功率計於單模光纖輸出量測其功率，微調鏡架、透鏡距光纖距離等，反覆最佳化，得到最高的光功率，並量測輸入光纖前後的功率，決定所到的最高耦合效率。

注意事項

- 眼睛不可直視雷射光，也請留意勿打到別人眼睛，否則視網膜有被永久打壞的危險！
- 勿撞擊半導體雷射電流源線，否則電突波可能打壞雷射二極體！
- 不要用手觸摸任何光學元件及光纖頭！
- 光學元件面勿直接碰觸桌面，避免刮傷！
- 螺絲要鎖緊但不要緊到斷掉！
- 壓電材料（P Z T）不可加負壓，在接入P Z T前用示波器檢驗波形產生器電壓輸出。
- 光纖請勿大角度（小曲率半徑）轉彎、勿重壓，否則會損壞！
- 光學鏡架（或功率計）不用時盡量平躺勿直立，避免不小心揮手撞倒。

經驗談（莫非定律Murphy's Law）

- 有機會出錯的事就一定會出錯，只是時間早晚的問題，請小心謹慎！
- 不要不動腦筋就拼命做，先想一想你大致上要怎麼安排光路、元件順序、與位置等，有譜了再動手。
- 調光路（例如讓兩道光重合等）是有方法與道理的，請動動腦筋想想，如果耗費太多時間嘗試，可請教會的人。
- 對儀器、鏡座等等你覺得使用上不太會用、不大對勁時（例如羅斯卡卡的），請教會的人、勿硬做，不然你就會變破壞王！
- 工預善其事，必先利其器！在特定事情用對的工具將事半功倍，遇到操作困難時，停下來問一下是否有更合適的工具。
- 做事不要太急躁，從容不迫地做，否則很容易出事！