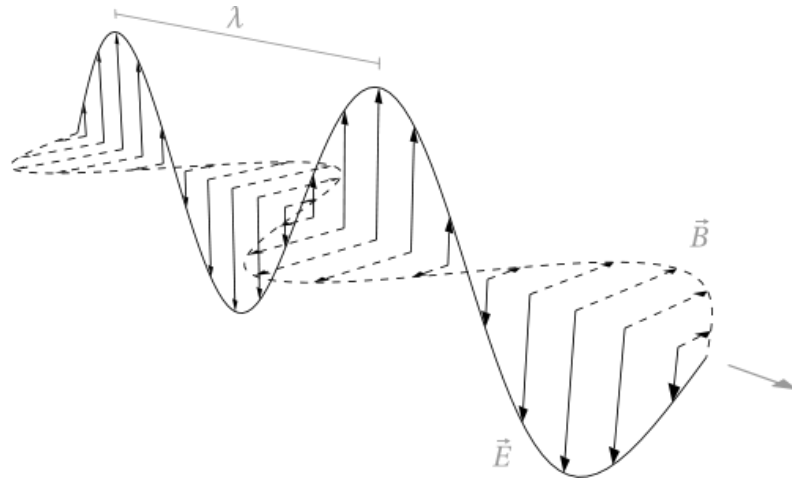




## Ondas Luminosas

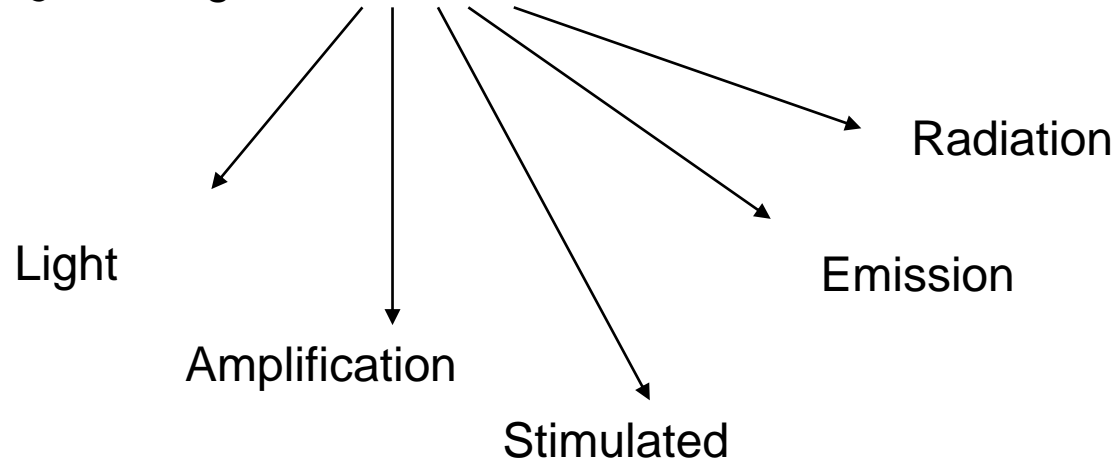
- En esta etapa del curso se buscará caracterizar la luz como fenómeno ondulatorio
- Luz  $\longrightarrow$  Ondas electromagnéticas transversales



El campo magnético y el campo eléctrico son ortogonales y el plano que definen es perpendicular a la dirección de propagación

En las prácticas usaremos como fuente la luz emitida por un **laser** en el rango de luz visible

¿ Que significa LASER ?



Light amplification by the stimulated emission of radiation

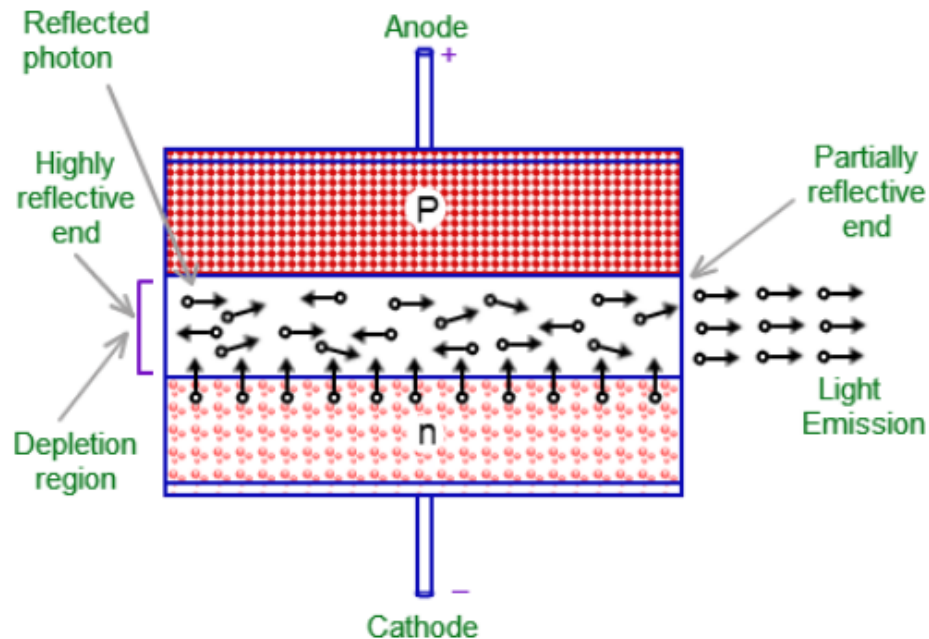
Entonces el láser es *una fuente luminosa que genera o amplifica radiación coherente del espectro electromagnético*

### Características

- Distribución angosta de frecuencia de emisión → monocromaticidad
- Gran intensidad de salida
- Mínima dispersión angular
- Direccional
- Coherencia espacial
- Ruido despreciable
- Se pueden generar pulsos de muy corta duración y alta potencia ( $\sim 10^{13}$  Watts)

# El diodo laser

- Cuando un semiconductor dopado contiene huecos libres se denomina tipo p, y cuando contiene electrones libres se conoce como tipo n.
- Las uniones p-n entre estas regiones son las responsables del comportamiento electrónico útil.



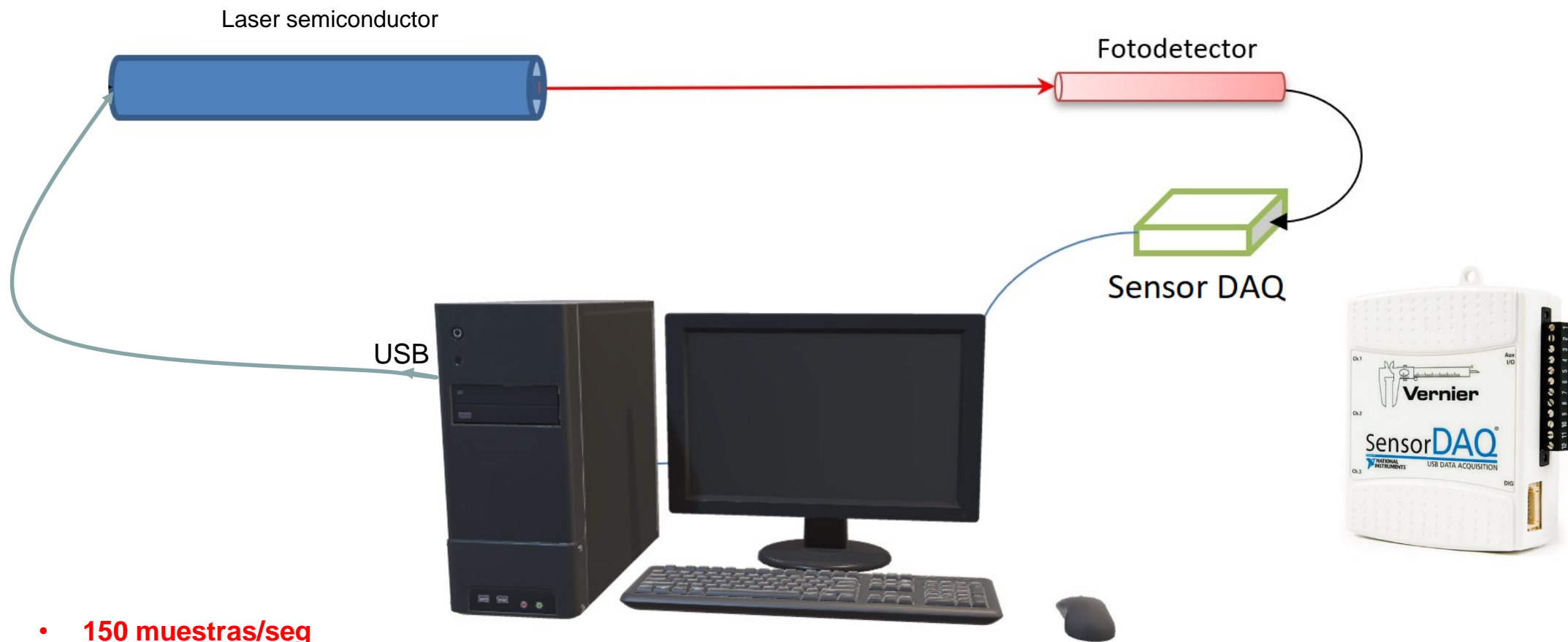
- Se forma una capa activa entre las capas de tipo p y n sobre un sustrato de tipo n.
- Se aplica entre los electrodos un voltaje a través de la unión p-n para crear la inversión de población necesaria dentro del diodo.
- Cuando se aplica un voltaje directo, los electrones se combinarán con los huecos en la unión p-n y emitirán la luz.
- Los extremos pulidos de la capa activa actúan como una cavidad de resonancia dentro del diodo láser. Por lo tanto, la luz se amplifica mediante el proceso de emisión estimulada y el diodo emite un haz coherente.
- Mientras que los láseres semiconductores más comunes operan en la región espectral del infrarrojo cercano o del infrarrojo medio, algunos otros generan luz roja, azul o violeta.



# 1. Estabilización del Láser

## Diseño experimental

- **Alineado**
- **Centrado**



- **150 muestras/seg**
- **6 tramos de 10 min**
- **0-150000 lux**



VOID EXPOSURE  
LASER RADIATION IS EMITTED  
FROM THIS APERTURE

**DANGER**

LASER RADIATION  
AVOID INDIRECT EYE EXPOSURE

Max Output < 5mW  
WAVELENGTH 650nm ± 10  
Class IIIa Laser Product  
This product complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11  
The Office Superstore, LLC.  
100 Stoughton Drive, Framingham, MA 01901

Potencia < 5 mW

650 nm

Clase III a

## Light Sensor (Order Code LS-BTA)



The Light Sensor can be used for measurements of light intensity in a variety of situations.

- Perform inverse square light intensity experiments using a point source of light.
- Conduct polarized filter studies.
- Demonstrate the flicker of fluorescent lamps and other lamps.
- Carry out solar energy studies.
- Perform reflectivity studies.
- Study light intensity in various parts of a house or school.
- Use it as part of a study of plant growth to measure light intensity.

### Collecting Data with the Light Sensor

This sensor can be used with the following interfaces to collect data:

- Vernier LabQuest<sup>®</sup> 2 or the original LabQuest as a standalone device or with a computer
- Vernier LabQuest<sup>®</sup> Mini with a computer
- Vernier LabPro<sup>®</sup> with a computer or TI graphing calculator
- Vernier Go!<sup>®</sup>Link
- Vernier EasyLink<sup>®</sup>
- Vernier SensorDAQ<sup>®</sup>
- CBL 2<sup>™</sup>
- TI-Nspire<sup>™</sup> Lab Cradle

Here is the general procedure to follow when using the Light Sensor:

1. Connect the Light Sensor to the interface.
2. Start the data-collection software.
3. The software will identify the Light Sensor and load a default data-collection setup. You are now ready to collect data.

### Data-Collection Software

This sensor can be used with an interface and the following data-collection software.

- **Logger Pro 3** This computer program is used with LabQuest 2, LabQuest, LabQuest Mini, LabPro, or Go!Link.
- **Logger Lite** This computer program is used with LabQuest 2, LabQuest, LabQuest Mini, LabPro, or Go!Link.
- **LabQuest App** This program is used when LabQuest 2 or LabQuest is used as a standalone device.

- **EasyData App** This calculator application for the TI-83 Plus and TI-84 Plus can be used with CBL 2, LabPro, and Vernier EasyLink. We recommend version 2.0 or newer, which can be downloaded from the Vernier web site, [www.vernier.com/easy/easydata.html](http://www.vernier.com/easy/easydata.html), and then transferred to the calculator. See the Vernier web site, [www.vernier.com/calc/software/index.html](http://www.vernier.com/calc/software/index.html) for more information on the App and Program Transfer Guidebook.
- **DataMate program** Use DataMate with LabPro or CBL 2 and TI-73, TI-83, TI-84, TI-86, TI-89, and Voyage 200 calculators. See the LabPro and CBL 2 Guidebooks for instructions on transferring DataMate to the calculator.
- **DataQuest<sup>™</sup> Software for TI-Nspire<sup>™</sup>** This calculator application for the TI-Nspire can be used with the EasyLink or TI-Nspire Lab Cradle.
- **LabVIEW** National Instruments LabVIEW<sup>™</sup> software is a graphical programming language sold by National Instruments. It is used with SensorDAQ and can be used with a number of other Vernier interfaces. See [www.vernier.com/labview](http://www.vernier.com/labview) for more information.

**NOTE:** Vernier products are designed for educational use. Our products are not designed nor recommended for any industrial, medical, or commercial process such as life support, patient diagnosis, control of a manufacturing process, or industrial testing of any kind.

### Specifications

Resolution:

13-bit (with SensorDAQ)

0–600 lux:	0.1 lux
0–6000 lux:	1 lux
0–150000 lux:	25 lux

12-bit (with LabQuest 2, LabQuest, LabQuest Mini, LabPro, Go! Link, EasyLink, TI-Nspire Lab Cradle, ULI, or Serial Box Interface)

0–600 lux:	0.2 lux
0–6000 lux:	2 lux
0–150000 lux:	50 lux

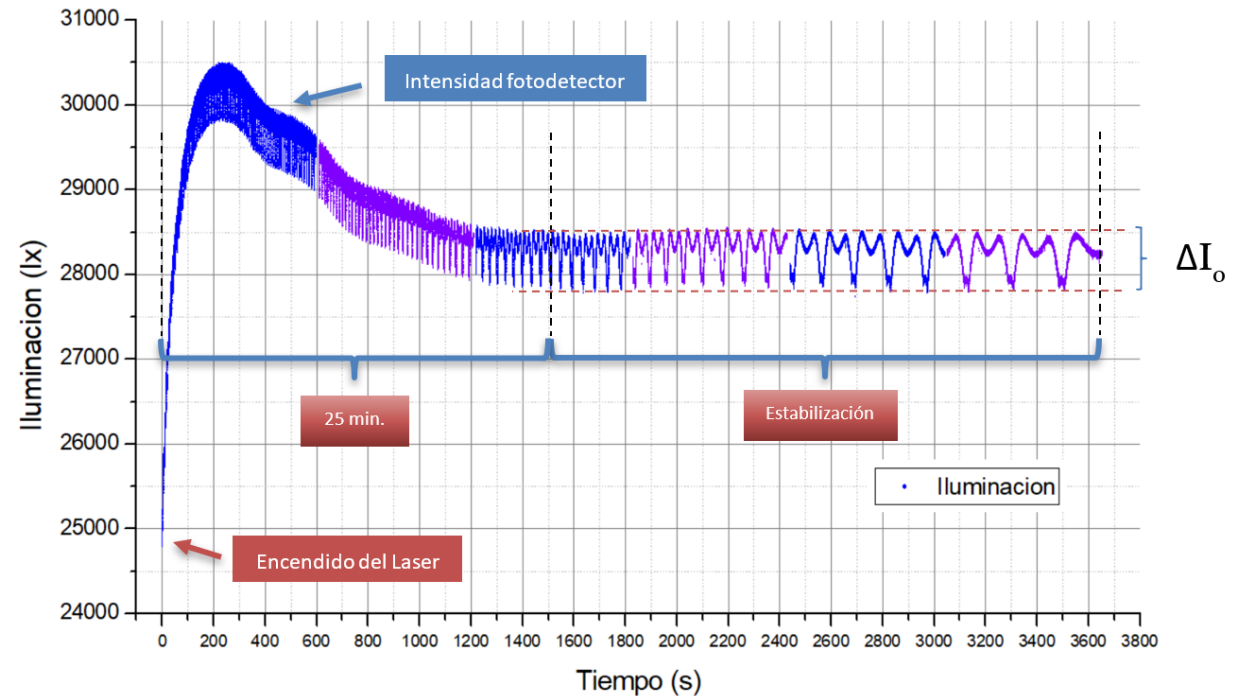
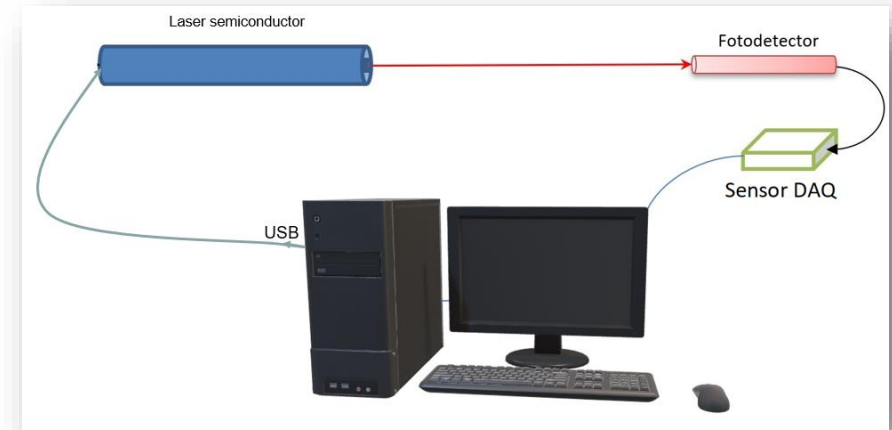
10-bit (with CBL 2)

0–600 lux:	0.8 lux
0–6000 lux:	8 lux
0–150000 lux:	200 lux

Stored calibration values

0–600 lux	slope:	154 lux/V
	intercept:	0 lux
0–6000 lux	slope:	1692 lux/V
	intercept:	0 lux
0–150000 lux	slope:	38424 lux/V
	intercept:	0 lux

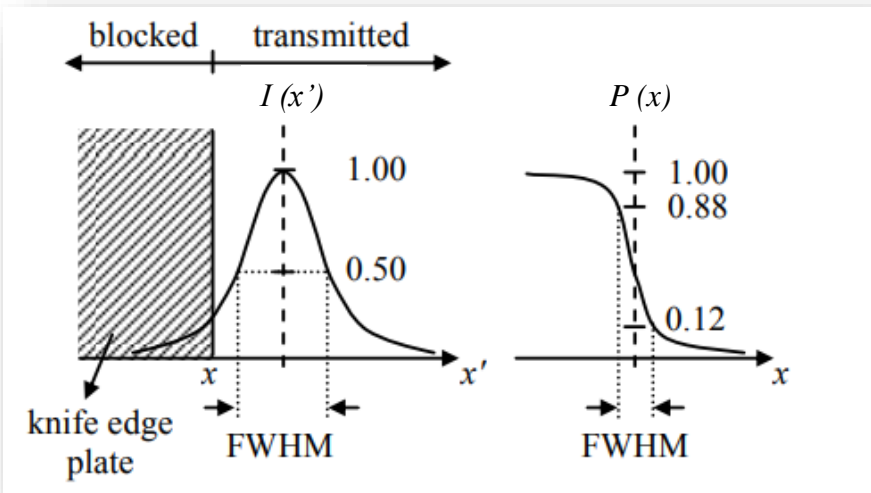
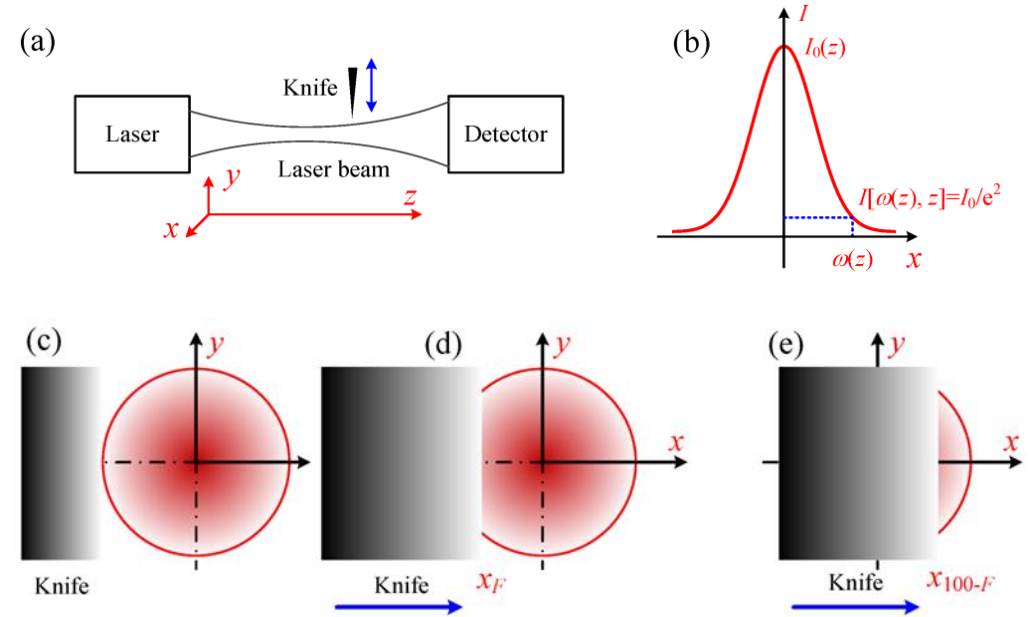
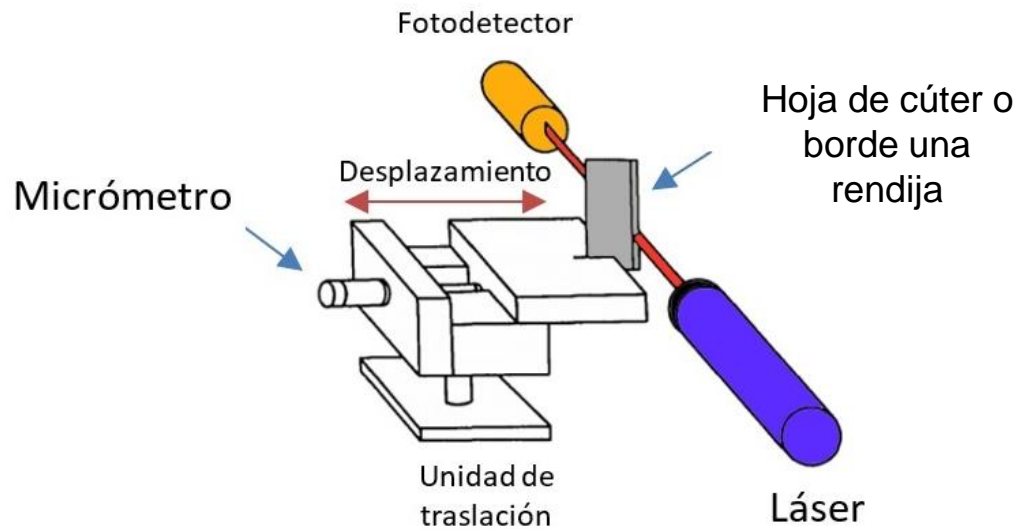
- Alinear al diodo laser tal que apunte al centro del fotodetector.
- Activar el software del Sensor DAQ
- Verificar que la señal de Intensidad luminosa no sature. Si sucede esto, setear el fotodetector en una escala donde no sature (660, 6000 o 150000 lux)
- Registrar esta señal durante 10 min. Analizar si es estable en el tiempo.



Estabilidad de un laser He-Ne



## 2. Medición de diámetro del haz de un laser



$$P(x) = k \int_x^{\infty} I(x') dx'$$

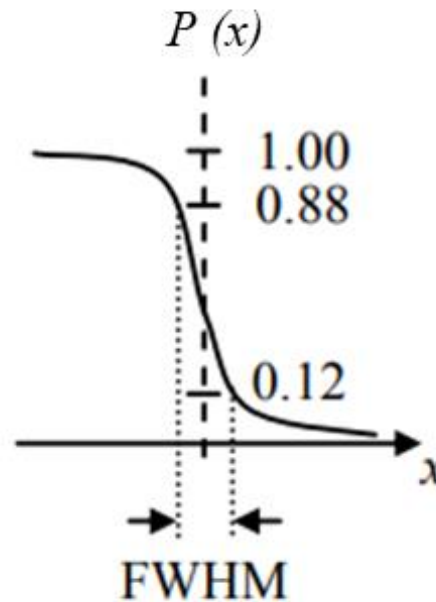
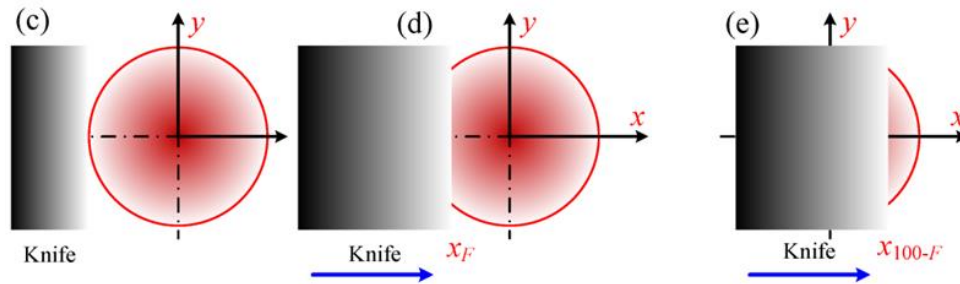
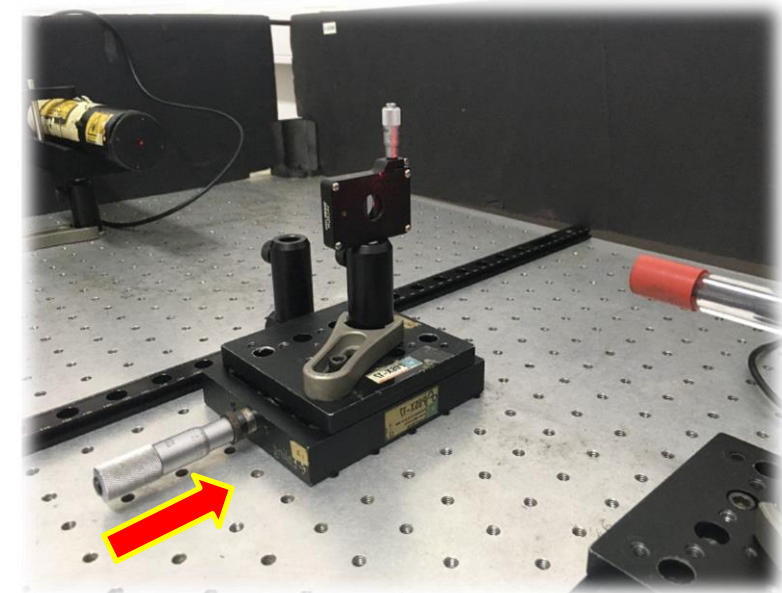
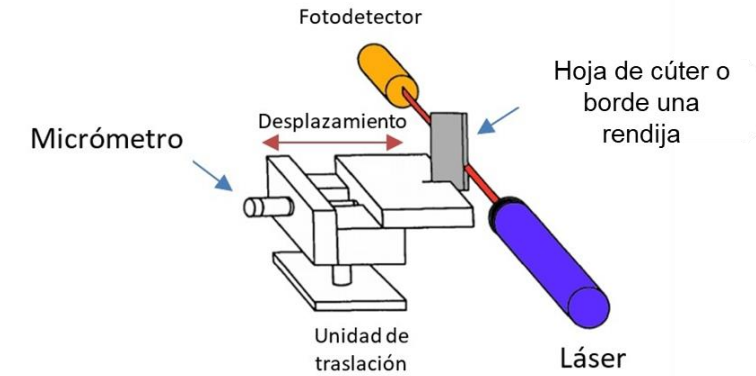
Sensibilidad del  
fotodetector

$$I(x) = -\frac{1}{k} \frac{dP(x)}{dx}$$

Distribución óptica

## 2. Medición de diámetro del haz de un laser

- Montar la unidad de traslación micrométrica con la rendija en la mesa óptica entre el laser y el fotodetector.
- Alinear el haz tal que atraviese completamente la rendija e incida en el centro del fotodetector.
- Fijar las siguiente condiciones de trabajo :
  - ✓ Velocidad de muestro del sensor Daq : 150 muestras/seg
  - ✓ Toma de datos por posición : 3 seg c/u
  - ✓ Escala del fotosensor : 0-150000 lux
- Comenzar a desplazar la unidad de traslación cada 0,02 mm y registrar la intensidad luminosa

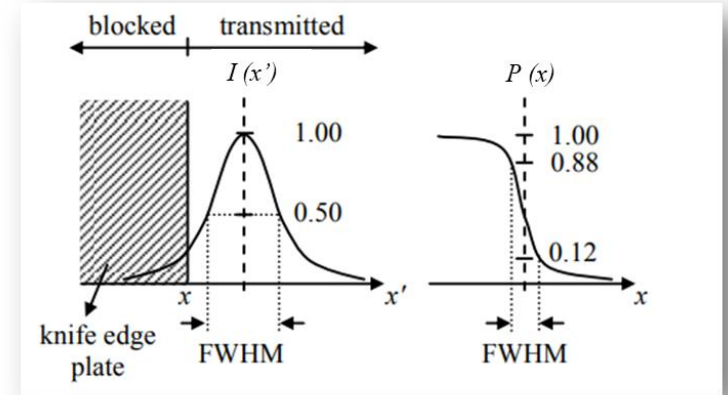


$$I(x, y) = I_0 \exp \left[ -\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{w^2} \right]$$

$w$  = radio en el cual la intensidad cae a 1/e

$$P_N = \frac{\int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^{\infty} I(x', y) dy dx'}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x', y) dy dx'}$$

$$P_N(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{x - x_0}{w} \right) \right],$$



En el caso 1-D

$$\frac{dP_N(x)}{dx} = \frac{1}{\sqrt{\pi}w} \exp \left[ -\frac{(x - x_0)^2}{w^2} \right]$$

$$f(s) = \frac{1}{1 + \exp[p(s)]}$$

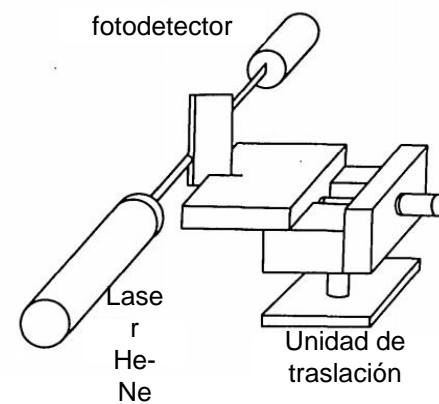
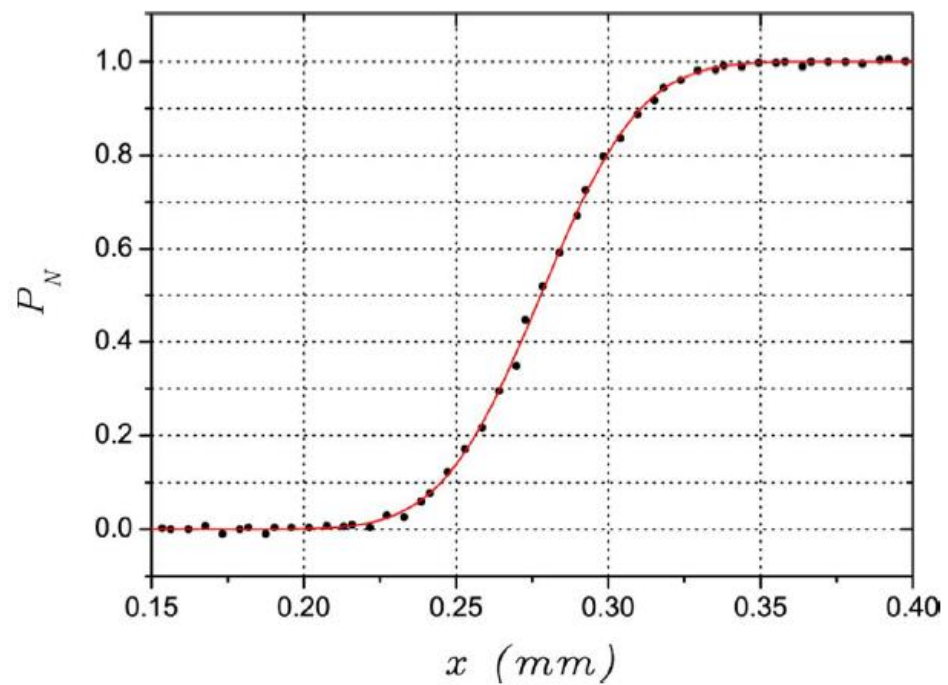
Khosrofian and Garetz  
(Appl. Optics 22 (1983) 3406)

$$p(s) = \sum_{i=0}^m a_i s^i,$$

$$s = \frac{\sqrt{2}(x - x_0)}{w}.$$

La aproximación trabaja bien con  $i = \text{impares}$   
(Appl. Optics 48 (2009) 393)

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = -1.5954086, \\ a_3 = -7.3638857 \times 10^{-2}, \\ a_5 = +6.4121343 \times 10^{-4}. \end{array} \right.$$



El objetivo es obtener  $w$

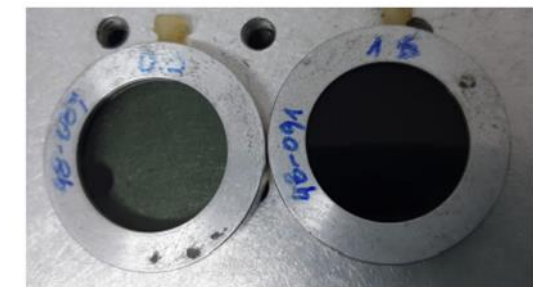
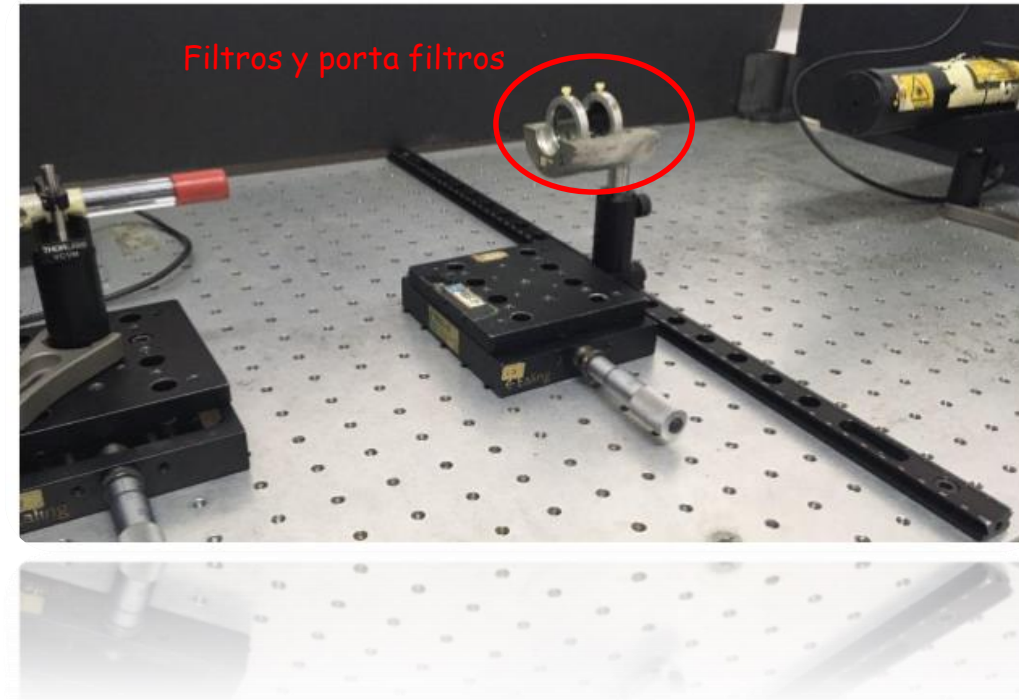
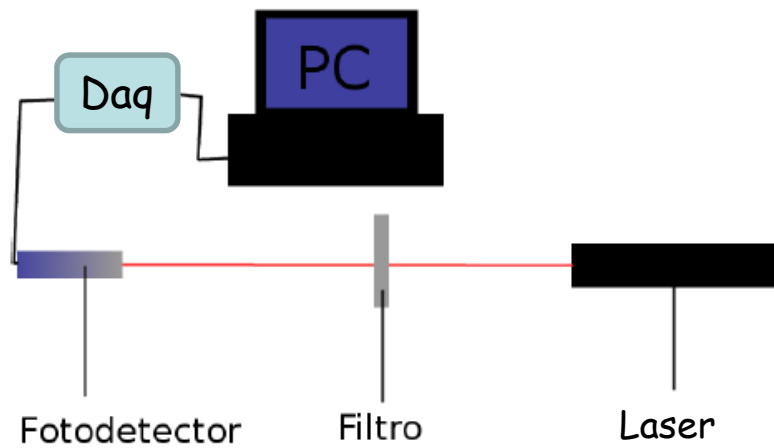
$$I(x, y) = I_0 \exp \left[ -\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{w^2} \right]$$

### 3. Transmitancia

Se define la transmitancia de un filtro como:

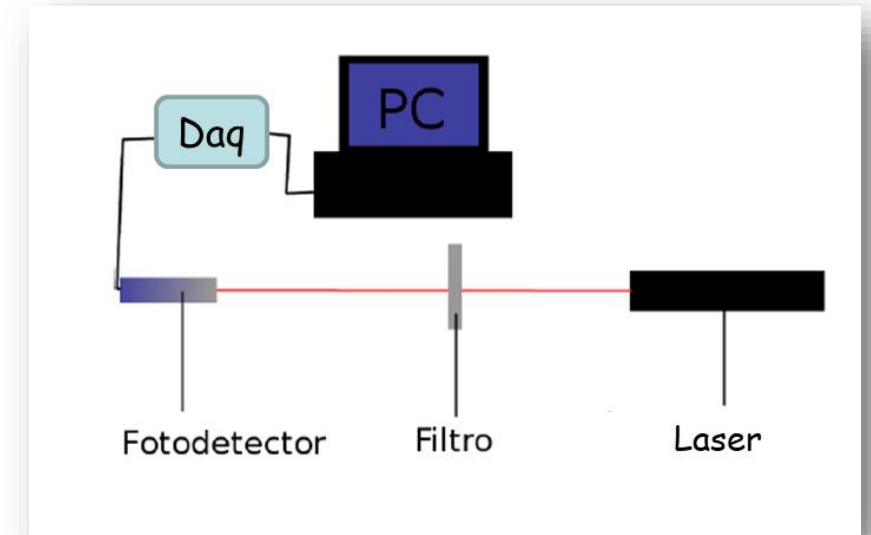
$$T = \frac{I_1}{I_0}$$

donde  $I_0$  es la intensidad de la onda antes de atravesar el filtro e  $I_1$  es la intensidad de la luz luego de atravesarlo. De la definición se deduce fácilmente que la transmitancia debido a dos filtros en serie es  $T = T_1 \cdot T_2$ , donde  $T_1$  es la transmitancia del primer filtro y  $T_2$  la del segundo.



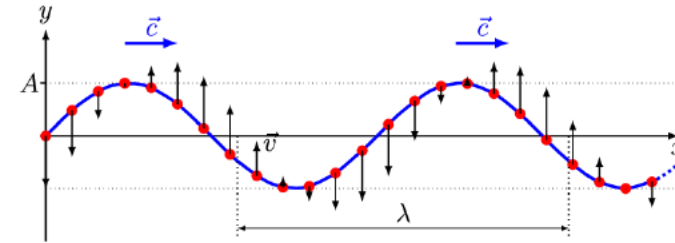
Filtros

- Se trabaja con 5 filtros
- Medir la intensidad del haz sin filtro.
- Medir la intensidad del haz colocando los distintos filtros.
- Calcular la transmitancia  $T$  de cada filtro.
- Hacer varias combinaciones de dos filtros y medir la intensidad del haz. ¿ Que escala del fotodetector se debe usar ?
- Verificar si se cumple la relación  $T_{12} = T_1 T_2$

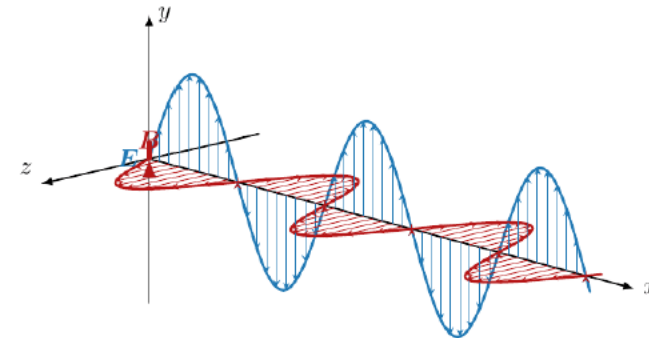
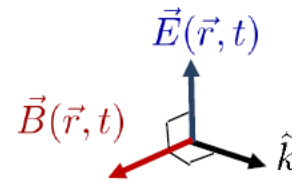


### 3. Polarización

- Es un fenómeno ondulatorio transversal descrito por las variaciones espacio-temporales de 2 campos vectoriales: Onda electromagnética
- Esta descrita por la ecuación de ondas vectorial:
- El campo eléctrico y el magnético oscilan en un plano perpendicular a la dirección de propagación y son ortogonales entre si



$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

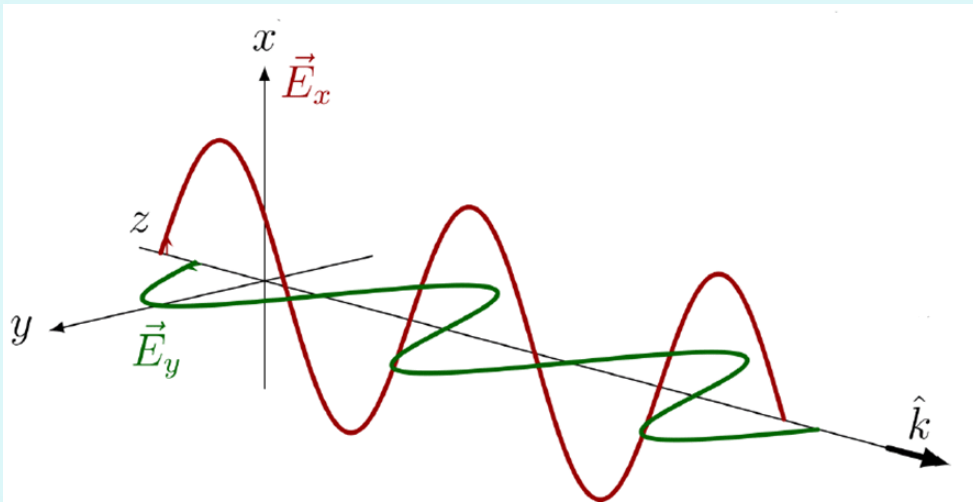


- La orientación del vector campo eléctrico a medida que la onda avanza es lo que define su estado de **polarización**

- Consideremos solo  $\vec{E}$ . Una onda que se propaga según  $z$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\vec{E}_x(z, t) = \underbrace{E_{ox} \cos(\kappa z - \omega t + \phi_x)}_{\vec{E}_x} \hat{x} + \underbrace{E_{oy} \cos(\kappa z - \omega t + \phi_y)}_{\vec{E}_y} \hat{y}$$



$$\phi = \phi_y - \phi_x ; \text{ Fase de polarización}$$

$$\vec{E} = e^{i\phi_x} \left( E_{ox} \hat{x} + e^{i\phi} E_{oy} \hat{y} \right) e^{i(\kappa z - \omega t)}$$

En que dirección apunta?



## Polarización lineal

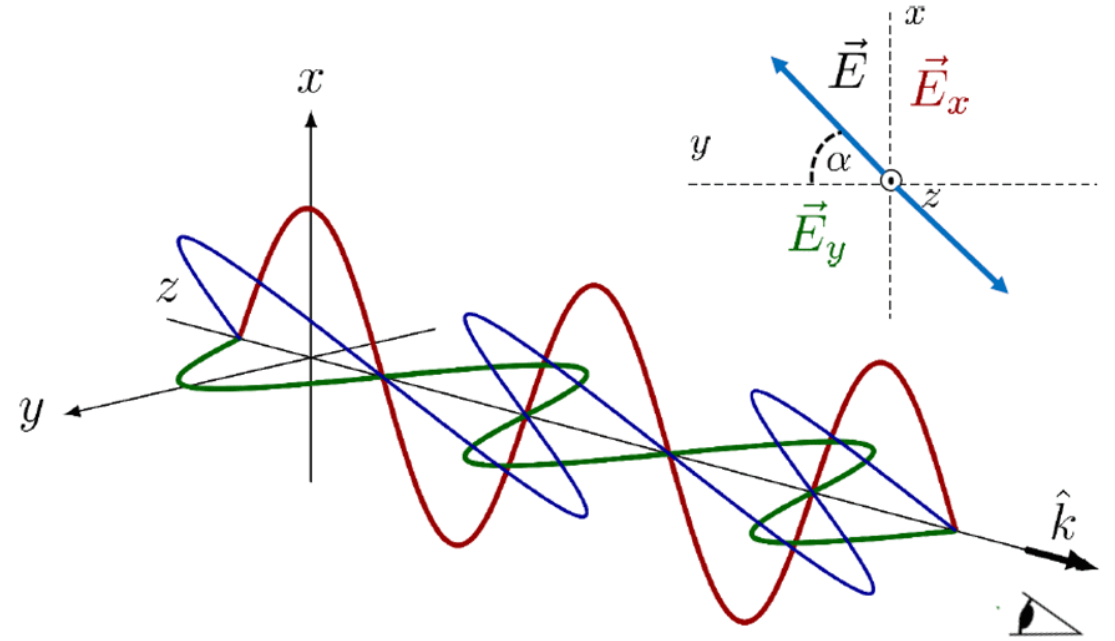
$$\vec{E} = (E_{ox}\hat{x} + e^{i\phi} E_{oy}\hat{y}) e^{i(kz-\omega t)}$$

$$E_{ox} \neq E_{oy}; \phi = 2m\pi$$

$m$  : múltiplos enteros

$$\vec{E} = (E_{ox}\hat{x} + E_{oy}\hat{y}) e^{i(kz-\omega t)}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{E_{ox}}{E_{oy}}\right)$$

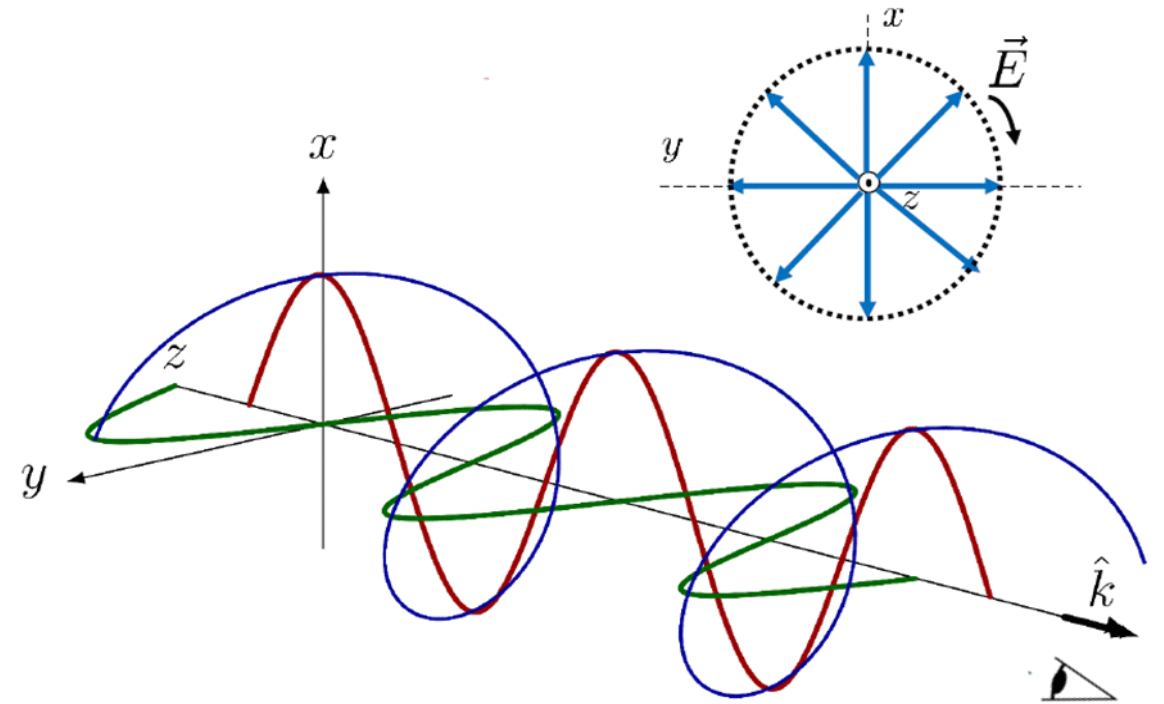


# Polarización circular

$$\vec{E} = (E_{ox}\hat{x} + e^{i\phi} E_{oy}\hat{y}) e^{i(kz - \omega t)}$$

$$E_{ox} = E_{oy}; \phi = 2m\pi \pm \pi/2$$

$m$  : múltiplos enteros



- + Horario (derecha)
- Anti-Horario (izquierda)

(mirado desde el receptor)

## Polarización elíptica

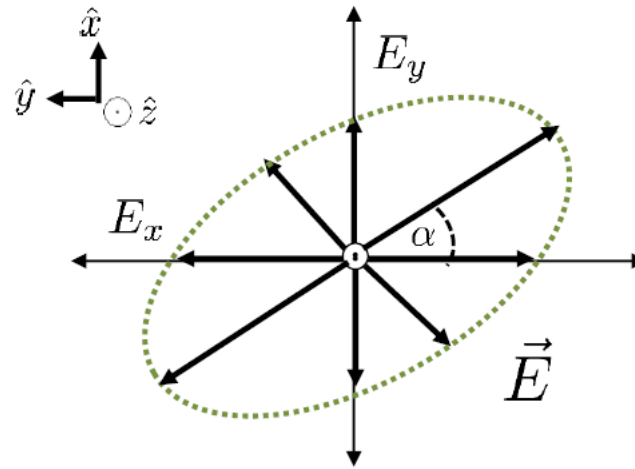
$$\vec{E} = (E_{0x}\hat{x} + e^{i\phi}E_{0y}\hat{y})e^{i(kz-\omega t)}$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos(\phi)}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2}$$

Ec. de una Elipse

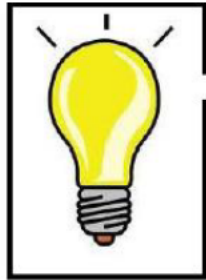
$\phi$ : Cualquier valor  
 $E_{0x} \neq E_{0y}$

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\cos(\phi) = \sin^2(\phi)$$



# Luz Natural

- La luz natural esta compuesta por varios emisores independientes y orientados al azar
- La superposición de todas las emisiones genera una onda cuya polarización fluctúa muy rápido ( $10^{-8}$  seg)

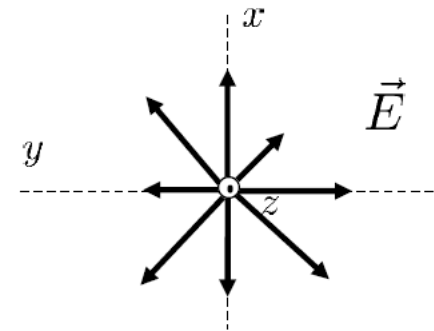


$$\vec{E} = (E_{ox}\hat{x} + e^{i\phi} E_{oy}\hat{y}) e^{i(kz - \omega t)}$$

$\phi(t)$  : Varía rápidamente y al azar

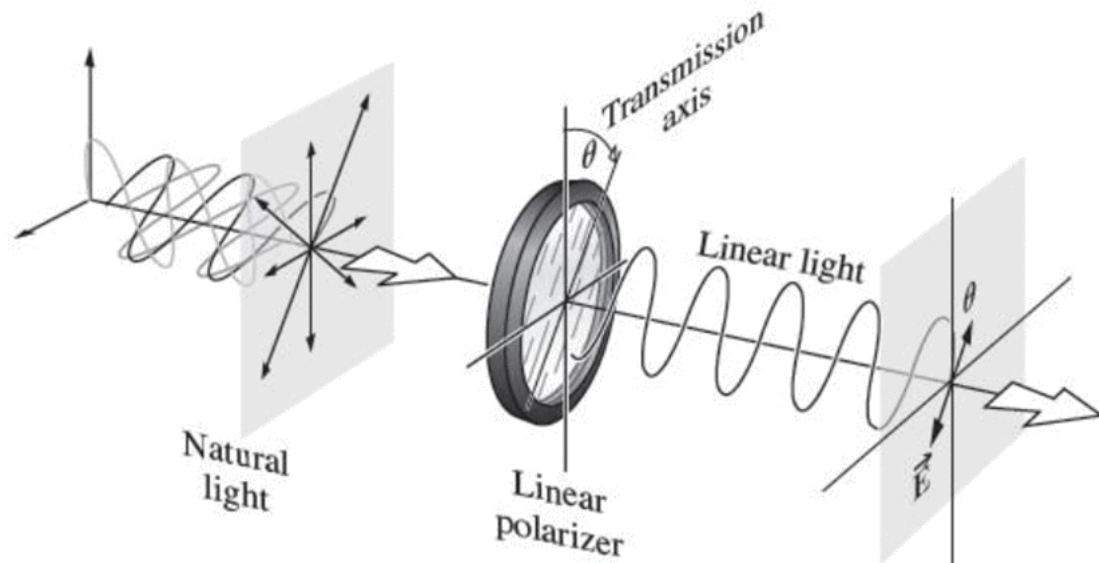
No hay un estado de polarización definido

Luz no polarizada o aleatoriamente polarizada

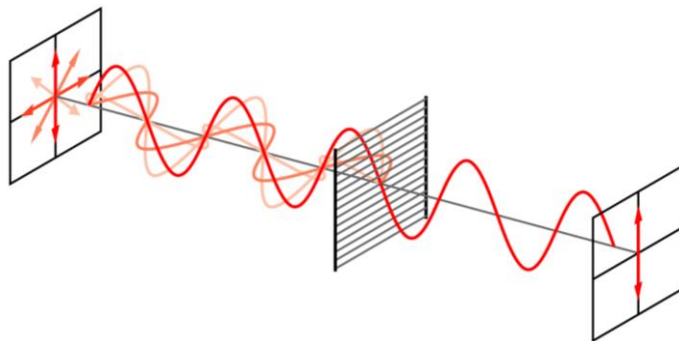
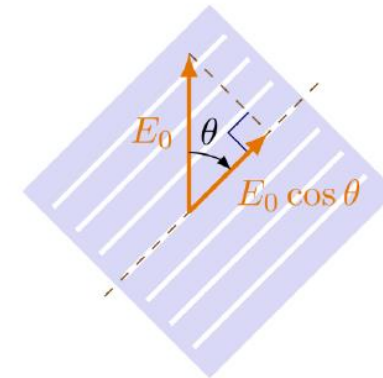


## ¿Cómo polarizar la luz?

- Dicroísmo (Absorción selectiva). Polarizadores

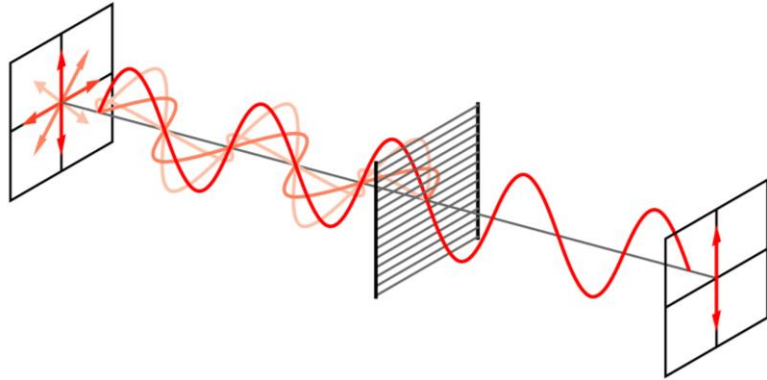


Film polimérico

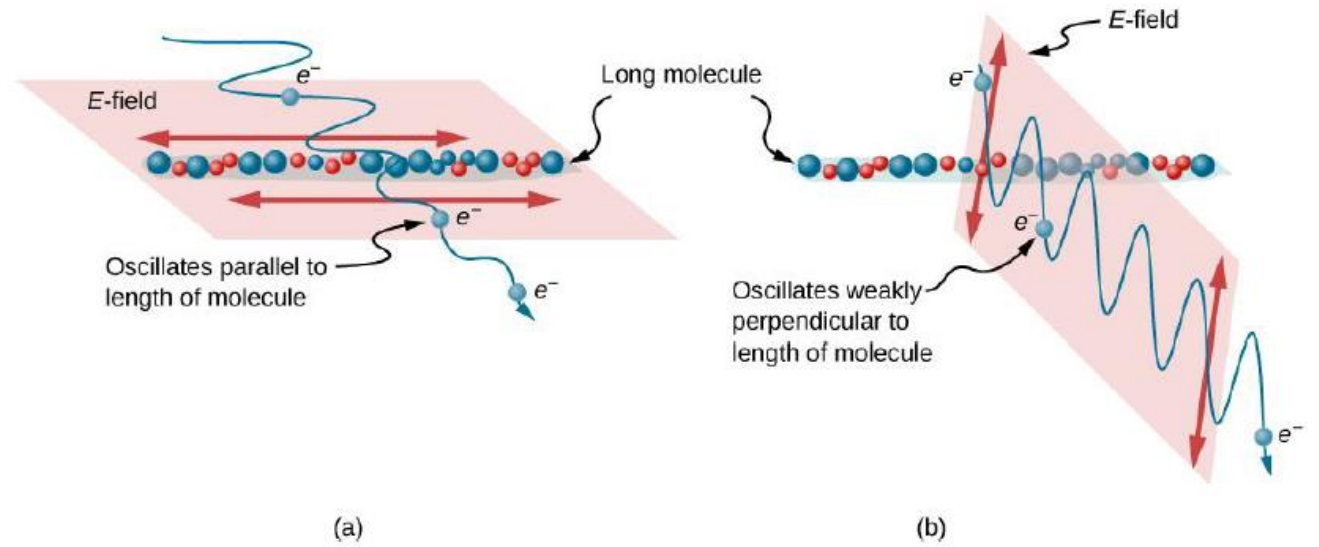
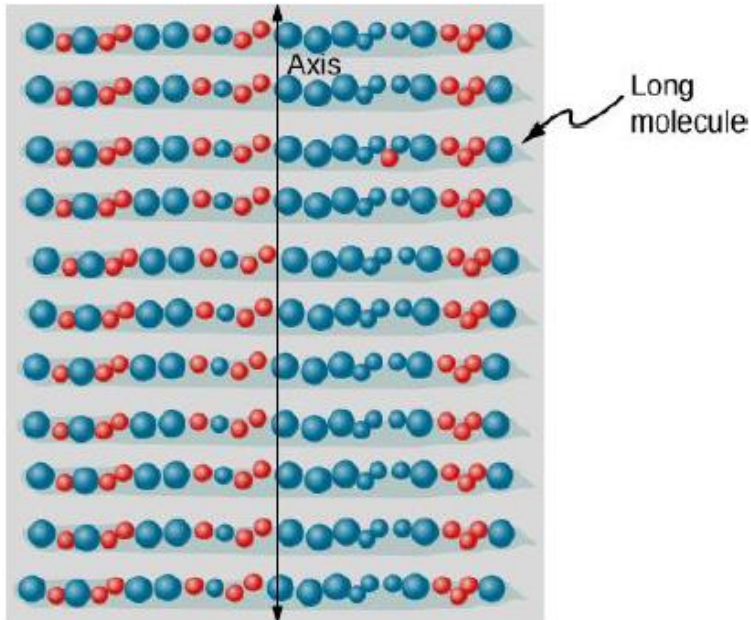


Los polarizadores poseen un eje de transmisión que permite el paso de luz en estado de polarización paralelo a su eje.

- Dicroísmo (Absorción selectiva). Polarizadores

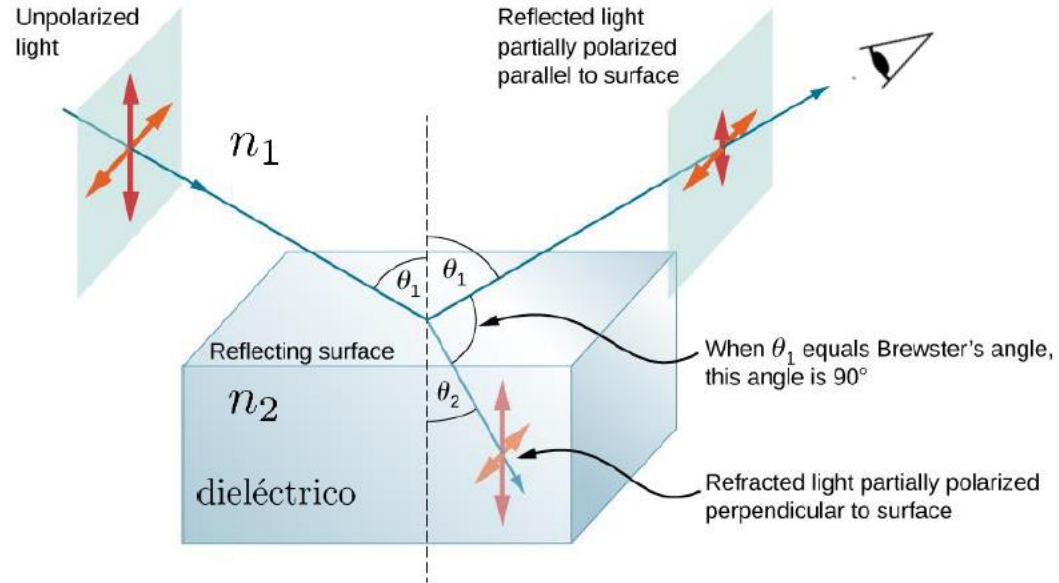


Film polimérico



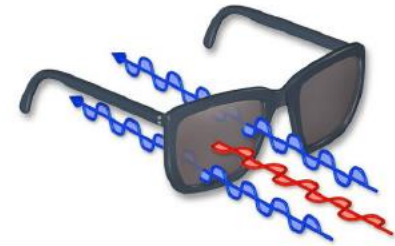
# ¿Cómo polarizar la luz?

- Reflexión: Angulo de Brewster. (Ley de Snell & Ecs. De Maxwell)



$$\tan(\theta_B) = \frac{n_2}{n_1}$$

- Agua:  $\theta_B \approx 53^\circ$
- Vidrio:  $\theta_B \approx 56^\circ$

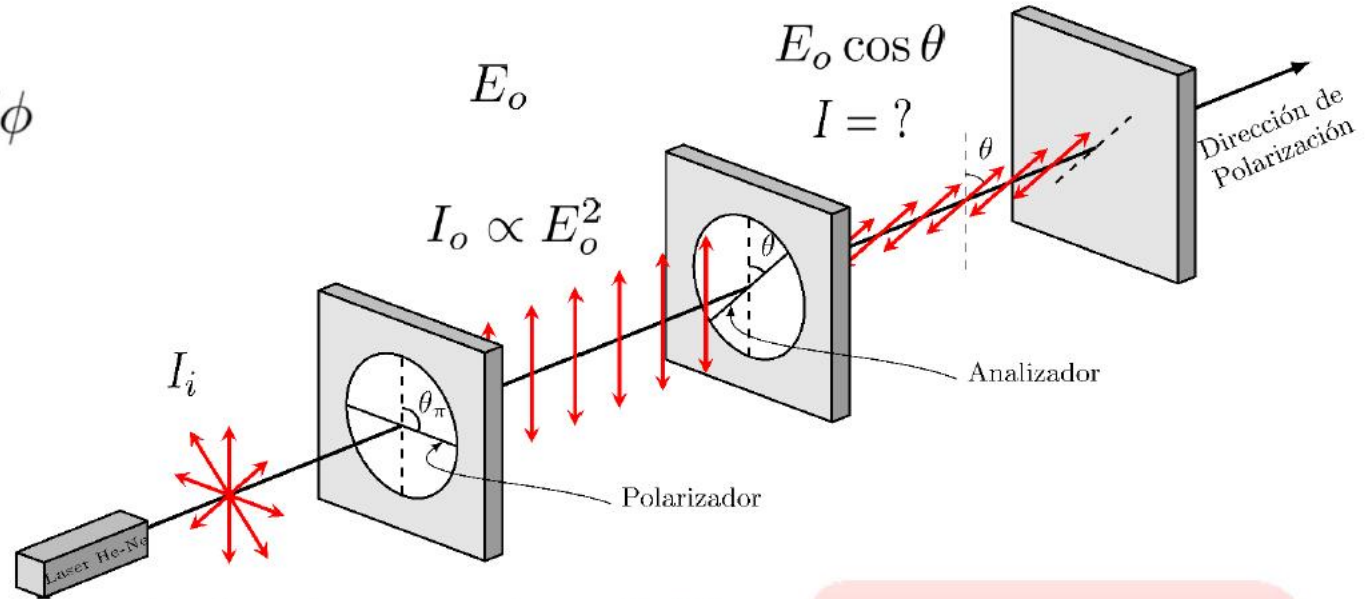


# Ley de Malus

Intensidad a la salida de un polarizador con respecto a la intensidad de la onda original

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\vec{E} \cdot \vec{E}^*}{2} d\phi$$

$$I \propto |\vec{E}|^2$$



Relación entre  $I_o$  y  $I_i$  ??

$$I_o = \frac{I_i}{2}$$

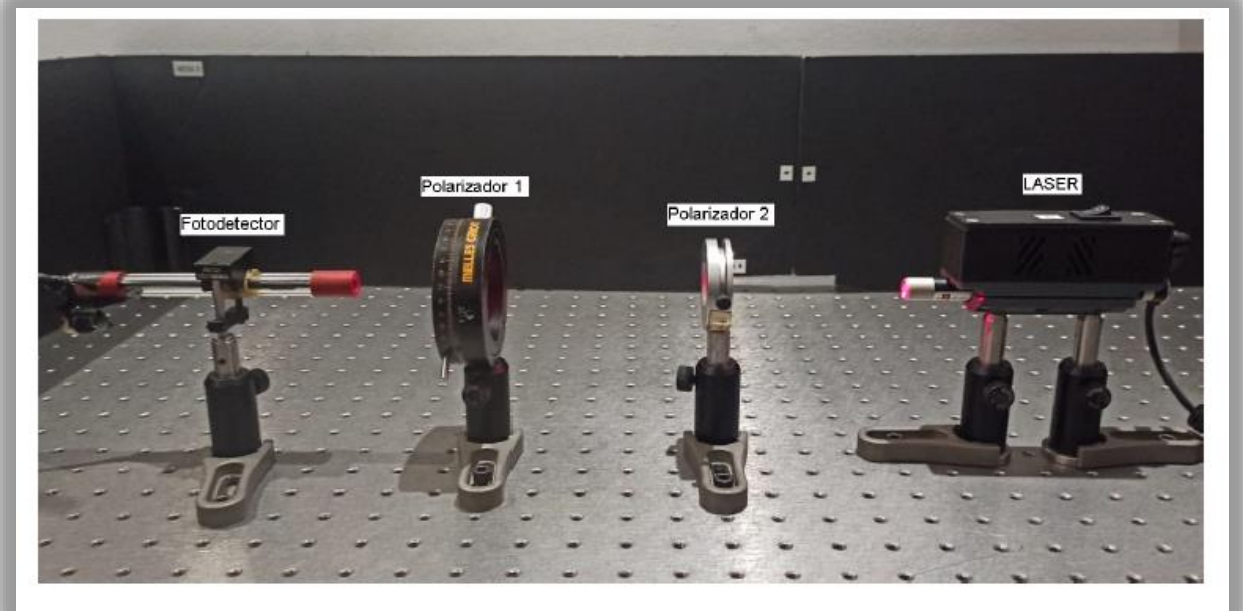
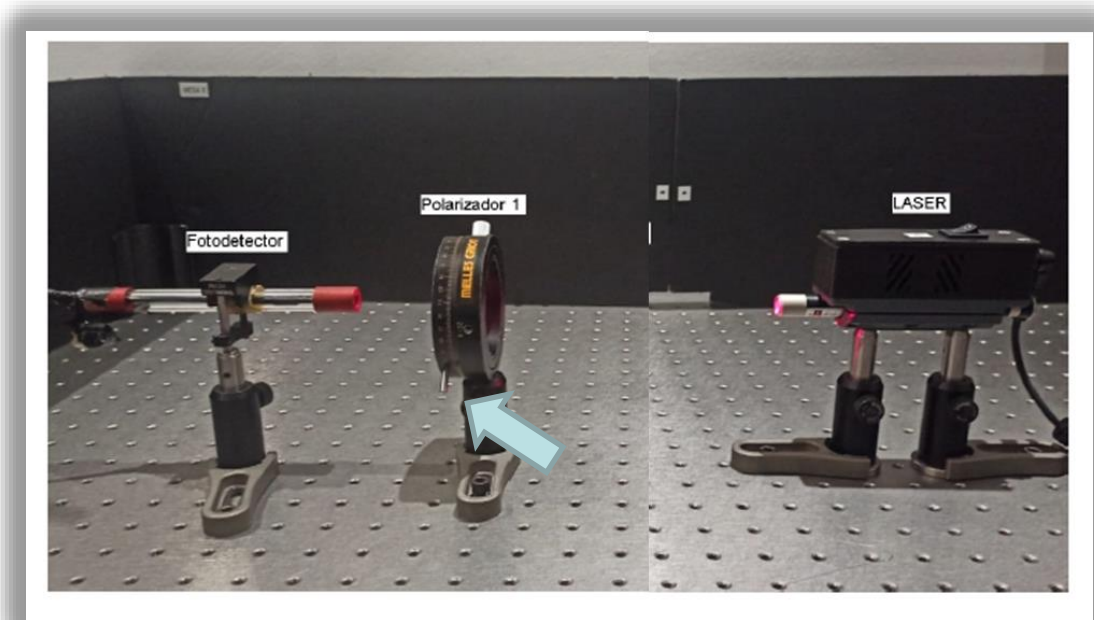
$$I(\theta) = I_o \cos^2(\theta)$$



#### 4. Descubrir si el haz del laser está polarizado

- Se trabaja con un polarizador montado en un goniómetro.
- Se alinea el laser con el fotodetector. Se mide la intensidad del haz.
- Se ubica el polarizador entre laser y fotodetector tal que el haz impacte en el centro del mismo
- Rotar el goniómetro y medir la intensidad cada  $5^\circ$ . Rango  $[-90^\circ$  a  $90^\circ]$ .
- ¿Se verifica la ley de Malus? ¿Está el laser linealmente polarizado? . Si no es así, ¿Cómo lo pueden linealizar la luz emitida?

$$I(\theta) = I_o \cos^2(\theta)$$





**¿ PREGUNTAS ?**

# Tipos de materiales dopantes

## Tipo n

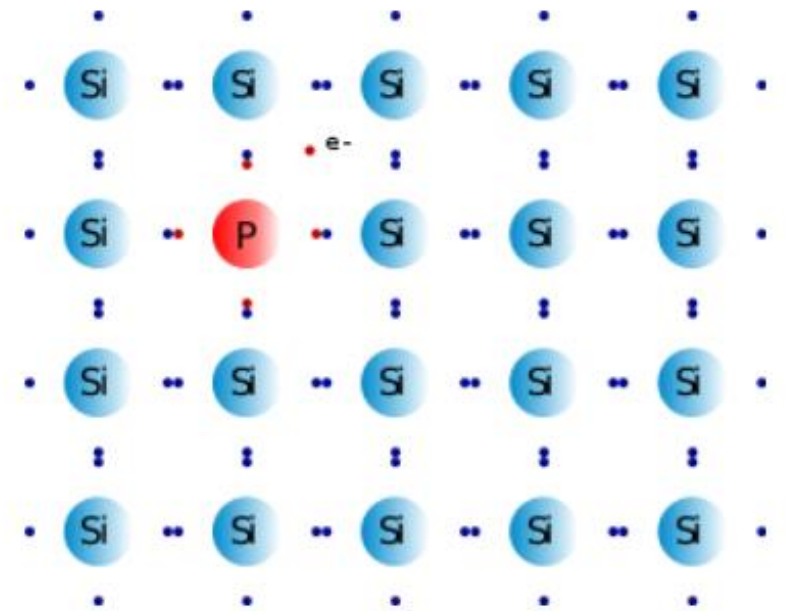
Material que posee átomos de impurezas que permiten la aparición de electrones (negativos) sin huecos asociados a los mismos semiconductores.

Suelen ser **de valencia cinco (Grupo XV de la tabla periódica)**, como el Arsénico y el Fósforo. De esta forma, no se ha desbalanceado la neutralidad eléctrica, ya que el átomo introducido al semiconductor es neutro, **pero posee un electrón no ligado**, a diferencia de los átomos que conforman la estructura original.

La energía necesaria para separar el  $e^-$  del átomo será menor que la necesitada para romper una ligadura en el cristal de silicio (o del semiconductor original).

Finalmente, existirán más electrones que huecos. **Los  $e^-$  serán los portadores mayoritarios** y los huecos los minoritarios.

La cantidad de portadores mayoritarios será función directa de la cantidad de átomos de impurezas introducidos.



Dopaje de tipo N

# Tipos de materiales dopantes

## Tipo p

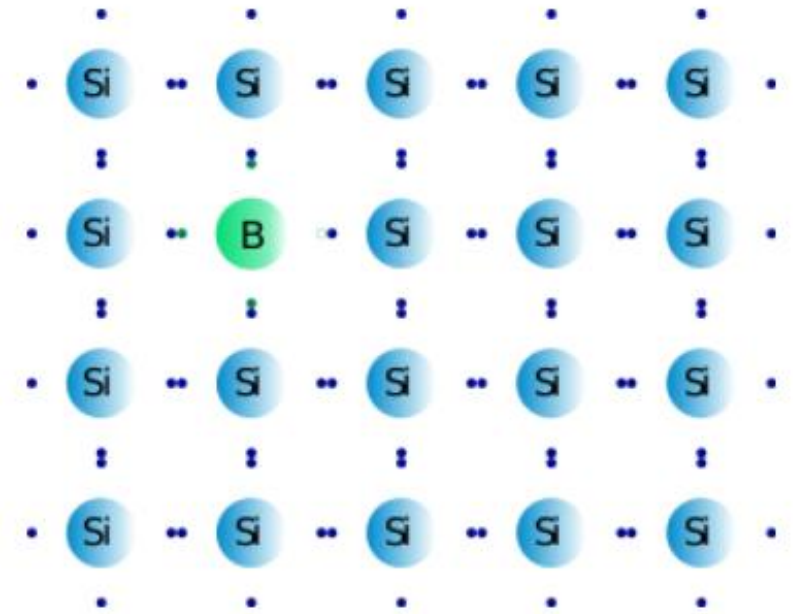
Material que tiene átomos de impurezas que permiten la formación de huecos (positivos) sin que aparezcan electrones asociados a los mismos, como ocurre al romperse una ligadura.

Suelen **ser de valencia tres (grupo XIII de la tabla periódica)**, como el Aluminio, el Indio o el Galio.

El átomo introducido es neutro, por lo que no modificará la neutralidad eléctrica del cristal, pero debido a que solo tiene tres electrones en su capa de valencia, aparecerá una ligadura rota.

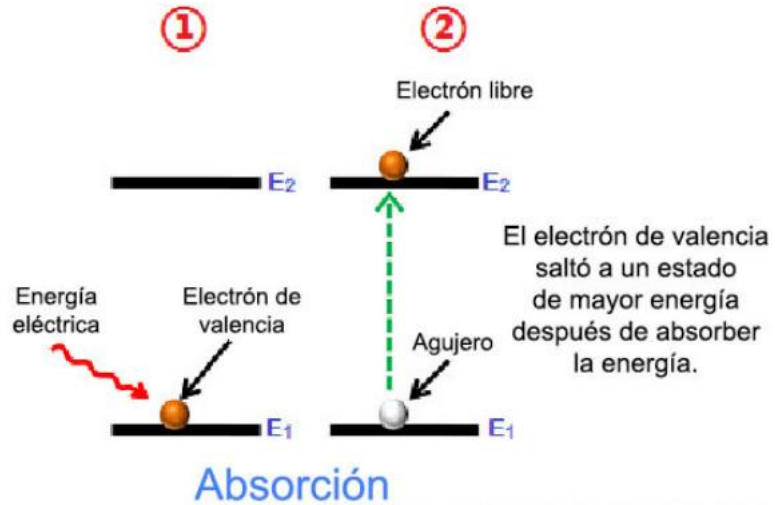
Esta tenderá a tomar electrones de los átomos próximos, **generando finalmente más huecos que electrones. Los huecos son los portadores mayoritarios y los e- los minoritarios.**

La cantidad de portadores mayoritarios será función directa de la cantidad de átomos de impurezas introducidos.



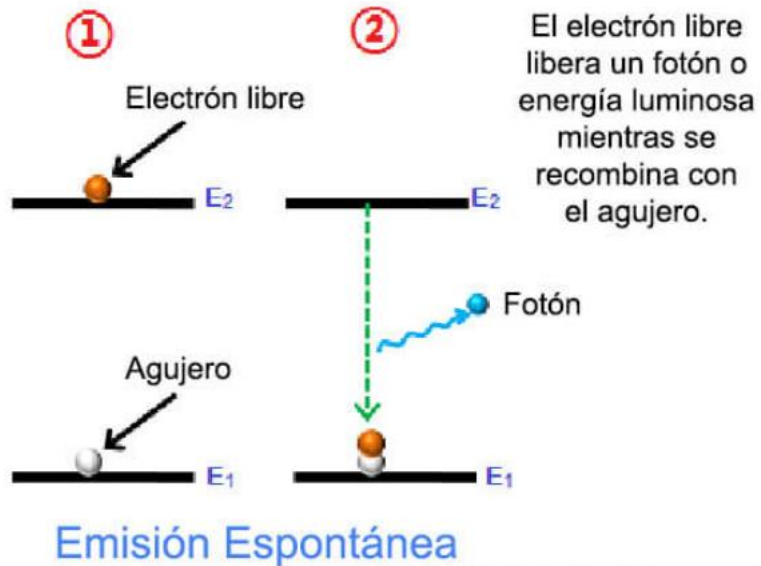
Dopaje de tipo P





En la absorción, los electrones de los niveles de energía más bajos saltan a un nivel de energía más alto, es decir, de la banda de valencia a la banda de conducción, cuando los electrones reciben una fuente de energía externa.

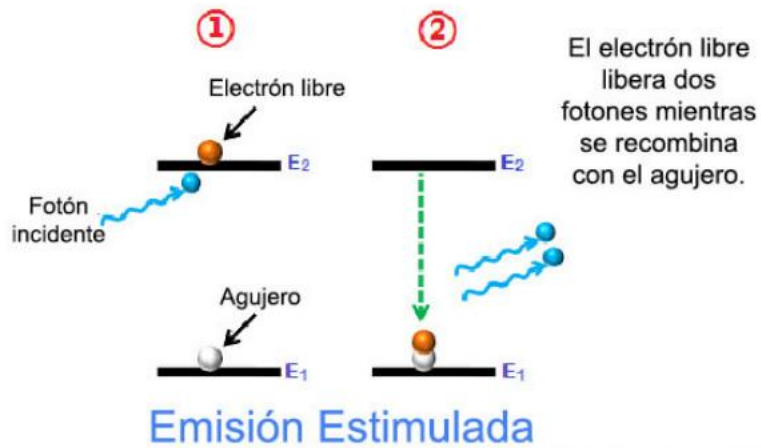
Entonces hay agujeros en el nivel de energía más bajo, (la banda de valencia) y electrones en el nivel de energía más alto, (la banda de conducción).



Si los electrones en el nivel de energía más alto son inestables, entonces tenderán a moverse al nivel de energía más bajo para lograr la estabilidad.

Pero si se mueven de un nivel de energía más alto a un nivel de energía más bajo, esta energía será la diferencia de energía entre estos dos niveles.

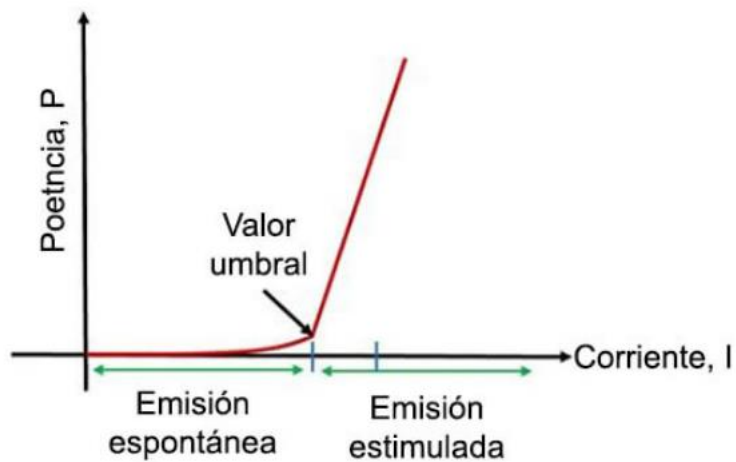
La energía liberada será en forma de luz y por tanto se emitirán fotones. Este proceso se llama emisión espontánea.



En la emisión estimulada, los fotones interactúan con los electrones en un nivel de energía más alto y estos fotones se suministran desde una fuente de energía luminosa externa.

Cuando estos fotones chocan con los electrones, éstos ganan energía y se recombinan con huecos y liberan un fotón adicional.

Así, un fotón incidente estimula la liberación de otro fotón.



Curva característica del diodo láser

La línea horizontal es la corriente y la línea vertical muestra la potencia óptica de la luz producida. Se aprecia claramente un aumento gradual de la potencia hasta que alcanza un punto umbral.

Después del valor umbral, hay un rápido aumento de la potencia incluso para un pequeño incremento de la corriente.

La potencia producida por el diodo láser también depende de la temperatura asociada al dispositivo.