

Capítulo 8.

Anexos.

Anexo A

Direcciones Web de las hojas de datos de los fabricantes.

A.1 LED L7850

<http://www.ortodoxism.ro/datasheets/hamamatsu/L7850.pdf>

A.2 Detector G6870

http://www.usa.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_G/G8370_series.pdf

A.3 Lock-in amplificador SR830

<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Catalog/SR810830c.pdf>

A.4 Programa de captura de datos del Amplificador Lock-in SR 830.

******Programa de captura de datos del Amplificador lock-in******

**** *DECLARACIÓN DE VARIABLES* ****

```
DECLARE SUB          grafics (xmin!, xmax!, ymin!, ymax!)
DECLARE SUB          inicializa ()
DECLARE SUB          espera (segons!)
DECLARE SUB          envia (comanda$)
DIM SHARED          esc(28)
DIM SHARED          isens
DIM SHARED          i AS LONG
```

***** *HABILITA PUERTO SERIE* *****

```
OPEN "COM1:9600, N, 8,2, CS, DS, CD" FOR RANDOM AS #1
envía "OUTX 0"
```

```
*****INICIACION*****
```

```
      Inicializa
graphics 0, 1800, 2E-09, .01
'hasta 30 min*60 s=1800 s (media hora) ***TIEMPO DE LOS EJES***
INPUT "archivo de salida"; filename$      **NOMRE DEL ARCHIBO**
OPEN filename$ FOR OUTPUT AS #2      ***LLAMA SUB-RUTINA***
tiempostart = TIMER ***TEMPORIZADOR***
```

```
*****ACTIVACION DE COMANDOS DEL LOCK-IN*****
```

```
i = 0
WHILE INKEY$ = " "
      vuelta:
      envía "OUTP?3"
INPUT #1, m$
      modulo = VAL(m$)
      envía "OUTP?4"
INPUT #1, f$
      fase = VAL(f$)
      tiempo = TIMER
```

```
*****CAMBIO DE ESCALA DEL LOCK-IN*****
```

```
IF modulo > esc(isens + 1) THEN
      isens = isens + 1
      envía "SENS " + STR$(isens)
      GOTO vuelta
      END IF
IF modulo < esc(isens) THEN
      isens = isens - 1
      envía "SENS " + STR$(isens)
      GOTO vuelta
      END IF
```

```
envía "OUTP?4"
INPUT #1, f$
fase = VAL(f$)
```

Anexo B.

Cálculos teóricos del coeficiente de absorción.

B.1 Absorción banda a banda

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se calcula la absorción banda a banda aplicando la teoría descrita en el apartado (3.1.1.). Para esto solo se tomaran las dos longitudes de ondas (1.1 y 1.4 μm) correspondiente a los resultados de la figura 16.

Para resolver la ecuación (5) del apartado (3.1.1.) sí tomamos la longitud de onda de 1,1 μm, es necesario conocer su equivalencia en eV y así tener el valor de $h\nu$. En este caso 1,1 μm es igual a 9,54E-01 eV. E_G ha sido calculada aplicando la ecuación (10). Para una temperatura de 27 °C el valor de es 1,1 eV. k es la constante de Boltzmann y θ_i es el mecanismo relacionado con emisión de fonones. Para $\theta_1 = 212$ K (óptica transversal) y $\theta_2 = 670$ K (acústica longitudinal) al resolver el numerador de la ecuación (5) del apartado (3.1.1) se obtienen dos valores, debido a que la variable l toma dos valore (1 y 2). Al aplicar las condiciones de la ecuación (6). Resulta 0 para cuando $l=1$ y 0,46208 para $l=2$. Ambos resultados se reemplazan en la ecuación (5) obteniendo el valor de α_{11} y α_{12} . Y la suma de estas dos componentes será la absorción total para este mecanismo (212 K).

$$\alpha_{11} = \frac{0}{\exp\left(\frac{212^\circ K}{300^\circ K}\right) - 1} = 0 \text{ cm}^{-1} \text{ y } \alpha_{12} = \frac{0,46208}{\exp\left(\frac{212^\circ K}{300^\circ K}\right) - 1} = 0,449 \text{ cm}^{-1}$$

Ahora se aplica el mismo procedimiento hecho con θ_i para la energía correspondiente temperatura de $\theta_2 = 670$ K, aplicando las condiciones de la ecuación (7). Obteniéndose dos componentes que al sumarlas nos dará el valor de la absorción total.

$$\alpha_{21} = \frac{0}{\exp\left(\frac{670K}{300K}\right) - 1} = 0 \text{ cm}^{-1} \quad \text{y} \quad \alpha_{22} = \frac{33,22441}{\exp\left(\frac{670K}{300K}\right) - 1} = 3,988 \text{ cm}^{-1}$$

Con las energías equivalentes en temperaturas de $\theta_3 = 1050$ K y $\theta_4 = 1420$ K la función empleada para el cálculo de la absorción es menos complicada. En estos casos se aplica directamente la ecuación (5) del apartado (3.3.1) y las condiciones de la ecuación (8) para θ_3 y la ecuación (9) para θ_4 obteniendo el valor directo del coeficiente de absorción.

Para 1050 K y a una temperatura de 27 °C.

$$\alpha_3 = \frac{6,284928}{\exp\left(\frac{1050K}{300K}\right) - 1} = 0,195 \text{ cm}^{-1}$$

Para 1420 K y a una temperatura de 27 °C

$$\alpha_4 = \frac{19,41165}{\exp\left(\frac{1420K}{300K}\right) - 1} = 0,1722 \text{ cm}^{-1}$$

La suma de la absorción correspondiente a cada mecanismo de energía conforman la α_{BG} y para una longitud de onda de 1,1 μm la absorción banda a banda para 6 temperaturas diferentes se muestran en la tabla I y para 1,4 μm se muestran en la tabla II.

$$\lambda = 1,1 \mu m$$

T [°C]	Eg [eV]	212 K		670 K		1050 K	1420 K	α_{BG}
27	1,1	0	0,4	0	3,9	0,1	0,1	4,8
100	1,0	0,3	1,4	0	10,3	0,5	0,5	13,2
300	1,0	7,9	9,9	12,6	55,2	3,2	3,8	109,2
500	0,9	32,8	38,9	112,2	196,3	11,5	14,6	458,5
700	0,8	104,4	112,8	422,9	543,7	32,1	41,6	1257,7
1000	0,7	315,4	325,3	1384,2	1527,9	90,2	118,6	3761,8

Tabla I. Valores de los mecanismos que conforman la α_{BG} para 1 μm y 6 valores de temperaturas distintas.

$$\lambda = 1,4 \mu m$$

T [°C]	Eg [eV]	212 K		670 K		1050 K	1420 K	α_{BG}
27	1,1	0	0	0	0	0	0	0
100	1,0	0	0	0	0	0	0	0
300	1,0	0	0	0	0	0	0	0
500	0,9	0	0	0	0	0,0	0,5	0,6
700	0,8	0	1,1	0	26,6	2,7	5,1	35,6
1000	0,7	31,2	46,6	79,5	295,0	20,7	31,2	504,5

Tabla II. Valores de los mecanismos que conforman la α_{BG} para 1,4 μm y 6 valores de temperaturas.

B.2 Absorción por cargas libres.

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se calcula la absorción por cargas libres aplicando la teoría descrita en el apartado (3.1.2.). Para esto solo se tomaran las dos longitudes de ondas correspondientes a los resultados de la figura 18.

Para el cálculo de los mecanismos que contribuyen a la absorción por cargas libres (α_{FC}) se utiliza la ecuación (11) del apartado (3.1.2.). Considerando una longitud de onda de 1,1 μm. Se debe conocer las componentes de secciones de captura relacionadas con los huecos y electrones. Para una oblea tipo p con $N_A = 1,6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, a 27 °C, $n =$ de 10831,58115

$$\sigma_n * n = 3,97118E-14 \text{ cm}^{-1} \quad \text{y} \quad \sigma_p * p = 0,029621 \text{ cm}^{-1}$$

La suma de estos dos mecanismos conforman la absorción por carga libres, tal y como se muestran en la tabla III para 1,1 μm y en la tabla IV para 1,4 μm.

$$\lambda = 1,1 \mu\text{m}$$

T [°C]	Eg (eV)	$\sigma_n * n$	$\sigma_p * p$	α_{FC}
27	1,1	0	0	0
100	1,0	0	0	0
300	1,0	0	0	0
500	0,9	0,7	0,4	1,2
700	0,8	10,1	5,2	15,3
1000	0,7	120,3	60,8	181,2

Tabla III. Valores de los mecanismos que conforman la α_{FC} para 1,1 μm y 6 valores de temperaturas.

$$\lambda = 1,4 \mu m$$

T [°C]	Eg (eV)	σ_n *n	σ_p *p	α_{FC}
27	1,1	0	0	0
100	1,0	0	0	0
300	1,0	0	0	0
500	0,9	1,2	0,7	1,9
700	0,8	16,4	8,4	24,8
1000	0,7	194,9	98,6	293,5

Tabla IV. Valores de los mecanismos que conforman la α_{FC} para 1,4 μm y 6 valores de temperaturas.

B.3. Coeficiente de absorción total del c-Si.

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se calcula la absorción total aplicando la teoría descrita en el apartado (3.1.3.). Para esto solo se han tomado dos longitudes de ondas como ejemplo, contenidas entre los resultados presentados en la figura 19. Una vez conocida la α_{BG} y la α_{FC} se puede calcular la absorción total aplicando la ecuación (19) del apartado (3.1.3).

$$\lambda = 1,1 \mu m$$

T [°C]	Eg (eV)	α_{FC}	α_{BG}	α_T
27	1,1	0	4,8	4,8
100	1,0	0	13,2	13,3
300	1,0	0	109,2	109,2
500	0,9	1,2	458,5	459,7
700	0,8	15,3	1257,7	144,0
1000	0,7	181,2	3761,8	1943,0

Tabla V. Valores de los mecanismos que conforman la α_T para 1,1 μm y 6 valores de temperaturas.

$$\lambda = 1,4 \mu m$$

T °C	Eg (eV)	α_{FC}	α_{BG}	α_T
27	1,1	0	0	0
100	1,0	0	0	0
300	1,0	0	0	0
500	0,9	1,9	0,6	2,6
700	0,8	24,8	35,6	60,4
1000	0,7	293,5	504,5	798,0

Tabla VI. Valores de los mecanismos que conforman la α_T para 1,4 μm y 6 valores de temperaturas.

Se puede ver claramente que para medidas de 1,1 μm el mecanismo que domina es la α_{BG} sobre el mecanismo de α_{FC} , no obstante, para la longitud de onda de 1,4 μm el mecanismo que domina es la absorción por α_{FC} . En la tabla VII se muestra un resumen de los cálculos hechos para 7 longitudes de ondas diferentes y 6 valores de temperaturas.

	27°C	100°C	300 °C	500°C	700 °C	1000°C
λ [nm]	α_T [cm ⁻¹]	α_T [cm ⁻¹]	α_T [cm ⁻¹]	α_T [cm ⁻¹]	α_T [cm ⁻¹]	α_T [cm ⁻¹]
1000	77,22	139,99	498,13	1273,74	2669,09	6397,95
1100	4,81	13,30	109,23	459,72	1273,12	3943,12
1200	0,05	0,31	14,21	114,76	517,32	2323,73
1300	0,04	0,05	0,34	20,74	172,90	1346,85
1400	0,04	0,05	0,09	2,60	60,58	798,16
1500	0,05	0,06	0,11	2,26	32,24	538,39
1600	0,06	0,07	0,12	2,57	32,62	454,92

Tabla VII. Resumen de valores de los mecanismos que conforman la α_T para 7 longitudes de ondas diferentes y 6 valores de temperaturas.

Anexo C

Ecuaciones empleadas para determinar la absorción con medidas de transmisión óptica

C.1. Formula sencilla del coeficiente de absorción.

Partiendo de la definición de transmisión óptica hecha en el apartado (3.1.4.) ecuación (20) [32] [33]. Es posible hallar una solución sencilla para calcular el coeficiente de absorción a partir de medidas experimentales de transmisión y reflexión [31]. Sí tenemos en cuenta en la ecuación (20) que el término del denominador para cada valor de R_t será menor que 1 ($(R_t^2)e^{-2\alpha d} < 1$) [31], Entonces, este se puede despreciar simplificándose la ecuación obteniendo:

$$T_T = (1 - R_T)^2 e^{-\alpha_T d} \quad (\text{C.1.1})$$

De la ecuación (C.1.1) se puede despejar α_T quedando una ecuación simple en función de la transmisión y la reflexión.

$$\alpha_T = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{T_T}{(1 - R_T)^2} \right] \quad (\text{C.1.2})$$

C.2. Formula completa del coeficiente de absorción.

Partiendo de la definición de transmisión óptica hecha en el apartado (3.1.4.) ecuación (20) [32] [33]. Es posible hallar una solución que tenga en cuenta todas las reflexiones. J. M. Essick et al. [16] presentan en su trabajo una ecuación más completa para calcular el α_T a partir de medidas de de transmisión y reflexión.

Partiendo de la ecuación (20), si multiplicamos a ambos lados por el denominador del termino de la derecha y simplificando nos queda.

$$T_T - T_T R_T^2 e^{-2\alpha_T d} = (1 - R)^2 e^{-\alpha_T d} \quad (\text{C.2.1})$$

Si en la ecuación (C.2.1.) dividimos todo por $T_T R_T^2$ obtenemos.

$$e^{-2\alpha_T d} + \left(\frac{(1 - R_T)^2}{T_T R_T^2} \right) e^{-\alpha_T d} - \frac{T_T}{T_T R_T^2} = 0 \quad (\text{C.2.2})$$

La ecuación (C.2.2) tiene la forma de una ecuación cuadrática, y su solución la encontramos aplicando formula general.

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (\text{C.2.3})$$

Resolviendo la ecuación (C.2.2) aplicando (C.2.3) nos queda que:

$$e^{-\alpha d} = \frac{-\frac{(1-R_T)^2}{T_T R_T^2} \pm \sqrt{\left(\frac{(1-R_T)^2}{T_T R_T^2}\right)^2 + 4\frac{T_T}{T_T R_T^2}}}{2} \quad (\text{C.2.4})$$

En la ecuación (C.2.4) al termino de la derecha, en el radical si multiplica por

$\frac{T_T R_T^2}{T_T R_T^2}$ y operando obtenemos.

$$e^{-\alpha d} = \frac{-(1-R_T)^2}{2T_T R_T^2} \pm \sqrt{\frac{(1-R_T)^4}{4T_T^2 R_T^4} + 4\frac{T_T^2 R_T^2}{4T_T^2 R_T^4}} \quad (\text{C.2.5})$$

En la ecuación (C.2.5) aplicando factor común a toda la expresión y descartando el signo negativo que precede el radical se obtiene.

$$e^{-\alpha d} = \frac{1}{2T_T R_T^2} \left[-(1-R_T)^2 + \sqrt{(1-R_T)^4 + 4T_T^2 R_T^2} \right] \quad (\text{C.2.6})$$

En la ecuación (C.2.6) aplicando propiedades logarítmicas despejamos α_T .llegando al resultado de la ecuación (20) en el apartado (3.1.2).

$$\alpha_T = \left(-\frac{1}{d} \right) \ln \left\{ \frac{1}{2T_T R_T^2} \left[\sqrt{(1-R_T)^4 + 4T_T^2 R_T^2} \right] - (1-R_T)^2 \right\} \quad (\text{C.2.7})$$

Anexo D. Tabla de conversión de energía a longitud de onda

λ [μm]	λ [nm]	ν [cm^{-1}]	hv [eV]
1,0	1000	10000	1,24
1,5	1500	6667	0,83
2,0	2000	5000	0,62
2,5	2500	4000	0,50
3,0	3000	3333	0,41
3,5	3500	2857	0,35
4,0	4000	2500	0,31
4,5	4500	2222	0,28
5,0	5000	2000	0,25
5,5	5500	1818	0,23
6,0	6000	1667	0,21
6,5	6500	1538	0,19
7,0	7000	1429	0,18
7,5	7500	1333	0,17
8,0	8000	1250	0,15
8,5	8500	1176	0,15
9,0	9000	1111	0,14
9,5	9500	1053	0,13
10,0	10000	1000	0,12
10,5	10500	952	0,12
11,0	11000	909	0,11
11,5	11500	870	0,11
12,0	12000	833	0,10
12,5	12500	800	0,10
13,0	13000	769	0,10
13,5	13500	741	0,09
14,0	14000	714	0,09
14,5	14500	690	0,09
15,0	15000	667	0,08
15,5	15500	645	0,08
16,0	16000	625	0,08
16,5	16500	606	0,08

Anexo E. Tabla de constantes físicas, unidades y prefijos

E.1. constantes físicas

Nombre	Símbolo	Valor	Unidades
<i>Constante de Boltzmann</i>	<i>k</i>	$1,36 \times 10^{-23}$	j/K
<i>Carga del electrón</i>	<i>q</i>	$1,60 \times 10^{-19}$	C
<i>Masa del electrón</i>	<i>m_o</i>	$9,10 \times 10^{-31}$	kg
<i>Electrón voltios</i>	<i>eV</i>	1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$	j/K
<i>Constante de Planck</i>	<i>h</i>	$6,62 \times 10^{-34}$	js
<i>Velocidad de la luz</i>	<i>c</i>	$2,99 \times 10^{10}$	cm/s

E.2. Unidades y prefijos

Múltiplo	Prefijo	Símbolo
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^2	hecto	h
10	deka	da
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a