



**Escola Politècnica Superior
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE CARRERA

TÍTULO DEL TFC: Control y mejoras del instrumento Sinton WCT-100 para medidas de tiempo de vida de los portadores en c-Si

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialidad Sistemas de Telecomunicación

AUTOR: Natalia Diaz Puertas

DIRECTOR: Isidro Martín García

FECHA: 1 de diciembre de 2008

Título: Control y mejoras del instrumento Sinton WCT-100 para medidas de tiempo de vida de los portadores en c-Si

Autor: Natalia Diaz Puertas

Director: Isidro Martín García

Fecha: 1 de diciembre de 2008

Resumen

En los últimos diez años se ha producido un crecimiento global muy importante en el mercado fotovoltaico. El principal objetivo es reducir los costes de la generación fotovoltaica, de manera que resulte competitiva respecto a otras formas de energía. La mayor parte del mercado se ha volcado en células solares basadas en silicio y cada vez más delgadas. Debido al aumento de la relación superficie-volumen, se necesitan instrumentos que permitan una detallada caracterización de la recombinación superficial. La empresa Sinton Consulting es experta en el diseño de dichos instrumentos y en concreto el Sinton WCT-100 es ampliamente utilizado en el grupo de investigación fotovoltaica de la UPC. En este TFC se ha controlado y mejorado dicho instrumento.

La primera tarea realizada en el presente TFC es un rediseño del software de medida. Se mejoró el tratamiento de datos agrupándolos todos en un único libro de Excel permitiendo una mejor interpretación de los resultados. El protocolo de obtención de datos se modificó de hacerlo a través del puerto serie a utilizar el bus GP-IB.

Con el objetivo de ampliar el rango de niveles de inyección disponibles, para obtener información adicional sobre la recombinación superficial, se introdujo un amplificador lock-in en la detección. En un TFC anterior, se desarrolló un array de LED's con su correspondiente driver como fuente de luz. Esto permite una excitación modulada y por tanto una detección coherente mediante el lock-in. Se diseñó un software que permite la automatización del proceso de medida alcanzando dos órdenes de magnitud más en el rango disponible de niveles de inyección. Además, se desarrolló una rutina de calibración para el nuevo escenario.

Title: Control and improvements of Sinton WCT 100 lifetime tester

Author: Natalia Diaz Puertas

Director: Isidro Martín García

Date: December 1st, 2008

Overview

In the last ten years a very important global growth in the photovoltaic market has taken place. The main objective is to reduce the costs of the photovoltaic generation, so that it is competitive against the most common forms of energy. Most of the manufacturers have betted for solar cells based on silicon and a strong reduction in their thickness. Due to the increase in the surface-volume ratio, new instruments are needed that allow detailed characterization of the surface recombination. The company Sinton Consulting is expert in the design of these instruments and, particularly, Sinton WCT-100 is widely used in the group of photovoltaic research at UPC. In this TFC, this instrument has been controlled and improved.

The first task made in the present TFC is a redesign of the measurement software. The data processing improved grouping them all in a unique Excel file allowing a better interpretation of the results. The protocol for data acquisition was modified from make it through the port series to use GP-IB bus.

With the objective to extend the available range of injection level, so that to obtain additional information related to surface recombination, a Lock-in amplifier was introduced in the detection. In a previous TFC, a LED array with its corresponding driver circuit was developed to be used as light source. This allows a modulated excitation and therefore a coherent detection by means of Lock-in amplifier. New software was designed to automate the measurement process reaching two orders of magnitude more in the available range of injection levels. In addition, a calibration routine for the new setup was developed.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. MEDIDA DEL TIEMPO DE VIDA. FUNDAMENTOS FÍSICOS, INSTRUMENTACIÓN Y MEJORAS.	3
1.1. Principios Físicos.....	3
1.2. Instrumentación.....	5
1.3. Mejoras a introducir	8
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE LAS COMUNICACIONES.....	11
2.1. Estándar SCPI.....	11
2.1.1. Comunicaciones mediante puerto GPIB	12
2.1.2. Formato de los comandos SCPI.....	13
2.1.3. Comandos SCPI utilizados.....	15
2.2. Diseño de la arquitectura.....	17
CAPÍTULO 3. PRIMERA APROXIMACIÓN: PC-SINTON-OSCILOSCOPIO..	19
3.1. Procedimiento de medida.....	19
3.1.1. Medida de ejemplo	21
3.2. Diseño del software. Vista para medidas con osciloscopio	21
3.2.1. Funcionamiento	22
3.2.2. Plantilla utilizada.....	23
3.3. Desarrollo del software. Vista para medidas con osciloscopio	25
3.3.1. Form.frm	26
3.3.2. Oscilloscope.cls.....	26
3.3.3. GPIB.cls.....	26
CAPÍTULO 4. SEGUNDA APROXIMACIÓN: PC – SINTON – OSCILOSCOPIO – LOCK-IN – GENERADOR DE FUNCIONES.	29
4.1. Procedimiento de medida.....	29
4.1.1. Medida de ejemplo	34
4.2. Diseño del software. Vista para medidas con lock-in	35
4.2.1. Funcionamiento	36
4.2.2. Plantilla utilizada.....	37
4.3. Desarrollo del software. Vista para medidas con lock-in.....	39
4.3.1. Form.frm	39
4.3.2. Oscilloscope.cls.....	40
4.3.3. LockIn.cls.....	40
4.3.4. FG.cls	41
4.3.5. GPIB.cls.....	41

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	43
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....	45
ANEXO A. PRIMERA VERSIÓN DEL SOFTWARE PARA PRIMERA APROXIMACIÓN.....	47
A.1. Especificaciones puerto COM.....	47
A.2. Especificación del software	47
A.3. Plantilla utilizada	48
A.3.1 Botones.....	49

INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN.

Actualmente el mercado energético se basa en el uso masivo de combustibles fósiles. Dos factores impiden continuar con esta estructura del mercado energético: la escasez de combustibles y los problemas ambientales que derivan de la emisión de CO₂ y que producen un cambio climático cada vez más visible.

En este contexto, la conversión fotovoltaica de la energía solar va a desempeñar un papel importante, acaso determinante, en los próximos años. Diversos estudios internacionales prevén un desarrollo espectacular del mercado fotovoltaico en el horizonte 2020-2040. De hecho, en los últimos diez años, ya se está produciendo un crecimiento global muy importante. En la Figura 1 aparece la evolución del mercado fotovoltaico mundial en megavatios pico (MWp) anualmente producidos. Como se puede observar, la tendencia es claramente a la alza con un crecimiento en términos porcentuales y absolutos muy importante. De mantenerse la actual evolución, las previsiones realizadas pueden ser incluso superadas.

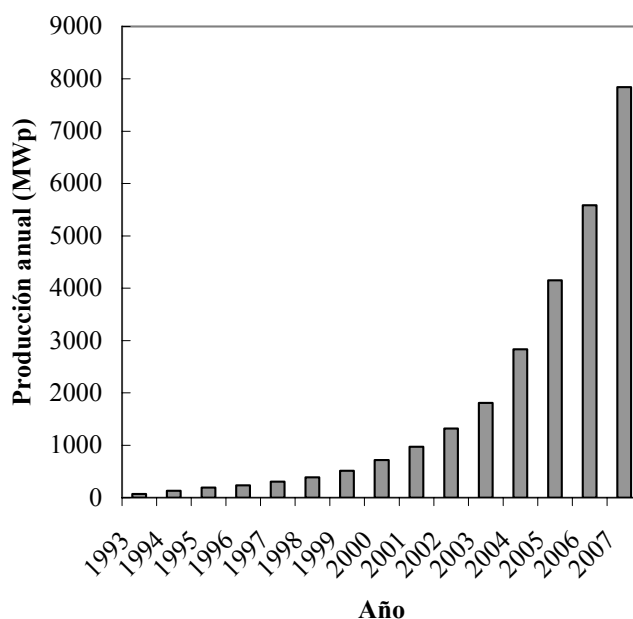


Fig. 1 Evolución de la producción anual de energía solar en megavatios pico.

La consecución de estos objetivos tan ambiciosos, obliga a reducir los costes de la generación fotovoltaica, hasta alcanzar a medio plazo un coste y unos rendimientos que le permita ser competitiva sin necesidad de primas por parte de entidades públicas. Los expertos han cifrado esta disminución de los 2-3 €/Wp actuales a los 0.5 €/Wp o incluso menos. Una de las claves para esta reducción de costes es conseguir una disminución en los costes de fabricación de los dispositivos. Las tecnologías dominantes están basadas en obleas de silicio perfectamente cristalino (c-Si) o multicristalino (mc-Si). Por tanto, los esfuerzos de reducción de costes se deben centrar en las células solares basadas en silicio.

Se calcula que entre 30-50% del coste de una célula solar de silicio proviene del material de partida. Por tanto, cualquier reducción del coste de este material repercutiría enormemente en el coste total. Los fabricantes ya se han dado cuenta de este hecho y una de las primeras estrategias ha sido el aumento de la utilización de silicio multicristalino, mucho más barato que el monocristalino. Además, estas obleas de silicio son cada vez más delgadas. Se ha pasado de las 350-400 μm a las actuales 225-250 μm y se espera una reducción todavía mayor a corto plazo. El adelgazamiento de estas obleas permite la extracción de un mayor número de dispositivos del mismo lingote reduciendo el coste.

La medida de tiempo de vida efectivo (τ_{eff}) de los portadores fotogenerados nos da una idea de la tasa recombinación o pérdida de dichos portadores. Esta información es fundamental a la hora de desarrollar las células solares de silicio y ha adquirido más protagonismo al adelgazar estos dispositivos. Debido a un aumento de la relación superficie/volumen, se ha hecho necesario controlar de forma exhaustiva la recombinación superficial. Recientemente han surgido diferentes técnicas de medida e instrumentos que permiten una medida fiable del tiempo de vida en función del nivel de portadores fotogenerados o nivel de inyección, Δn_{av} . Entre ellos destacan los equipos de la empresa Sinton consulting.

Este TFC se centra en mejorar la adquisición de medidas y aumentar el rango disponible en nivel de inyección del equipo Sinton WCT100. En concreto, este trabajo parte de un TFC anterior [1], donde se mejoró el instrumento introduciendo una fuente de luz nueva, concretamente un array de leds, con la finalidad de tener un mayor control en la señal de iluminación. Con esta mejora, los niveles de inyección mínimos para los cuales se obtenían medidas fiables se redujeron ligeramente. Sin embargo, es necesaria una ampliación mayor del rango disponible con el objetivo de obtener información adicional sobre la recombinación superficial. Aprovechando la posibilidad de modular la intensidad de luz, se propone incorporar un amplificador lock-in sincronizado con la señal de excitación. La detección de la respuesta de la muestra será pues coherente, con lo que se gana sensibilidad en el instrumento.

Por ello, este TFC tiene como principales objetivos:

- Utilizando el flash fotográfico incluido en el instrumento, mejorar el método de medida utilizado actualmente en el laboratorio, introduciendo un software que automatice las medidas, disminuya el tiempo necesario para ellas y permita una mejor gestión de los datos obtenidos.
- Desarrollar el software necesario para realizar las medidas con el amplificador lock-in como detector y el array de LED's como fuente de luz.
- Desarrollar un sistema de calibración adecuado en el nuevo escenario de medida.
- Obtener resultados con niveles de inyección lo más bajos posibles aumentando el rango disponible de medida.

CAPÍTULO 1. MEDIDA DEL TIEMPO DE VIDA. FUNDAMENTOS FÍSICOS, INSTRUMENTACIÓN Y MEJORAS.

Este apartado pretende ser una visión general sobre el presente TFC. Por ello, a continuación, se expondrán los principios físicos básicos en los que se basan las medidas, se presentarán los instrumentos utilizados y se plantearán las mejoras que se pretenden conseguir.

1.1. Principios Físicos

El término de tiempo de vida se usa para describir el proceso de recombinación definido por la cancelación de un par electrón-hueco. El tiempo de vida no es una propiedad del semiconductor pero sí una relación entre los portadores y las propiedades del semiconductor.

La definición del tiempo de vida efectivo, τ_{eff} , viene dada por,

$$\sum_i U = \frac{\Delta n_{av} \cdot W}{\tau_{eff}} \tag{1.1}$$

Donde U es la tasa de recombinación del par electrón-hueco, W es el grosor de la oblea utilizada y Δn_{av} es el exceso de densidad de portadores fotogenerados respecto a los que existen en el equilibrio. Por tanto, el tiempo de vida efectivo se define como el tiempo de vida medio de un portador desde que se produce su generación hasta su recombinación.

La siguiente figura muestra el diagrama de bloques de un sistema genérico de medida del τ_{eff} .

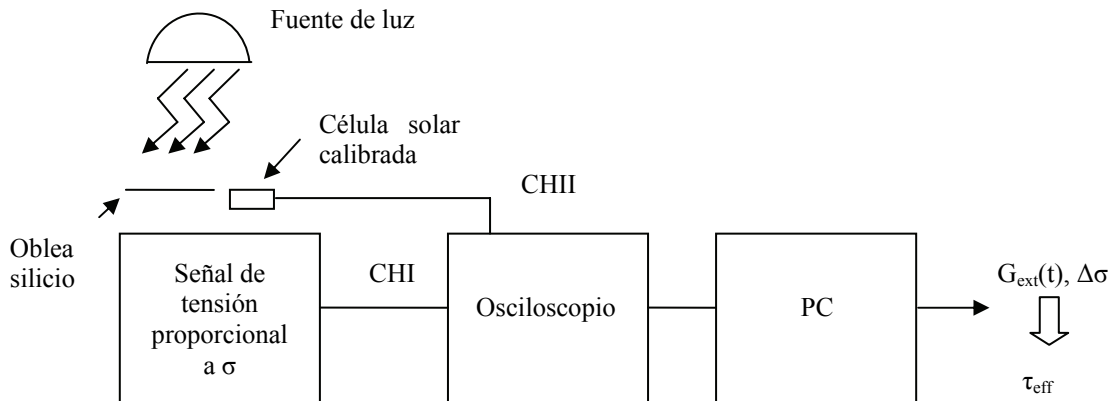


Fig. 1.2 Diagrama de bloques de un sistema genérico de medida del τ_{eff}

Estos sistemas, en general, miden dos magnitudes:

- *Fotoconductancia de la muestra, $\Delta\sigma$* . Al osciloscopio se le proporciona una señal proporcional a esta magnitud. Entonces, la densidad de portadores fotogenerados, Δn_{av} , se puede obtener mediante,

$$\Delta\sigma(t) = W \cdot q \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot \Delta n_{av} \quad (1.2)$$

donde, W es el grosor de la muestra, q es la carga fundamental y μ_n (μ_p) representan las movilidades de los electrones (huecos). $\Delta\sigma$ se mide en Siemens (S).

- *Intensidad de luz*. Se mide a partir de la corriente de cortocircuito de la célula solar calibrada situada al lado de la oblea de silicio. De esta magnitud se puede deducir la fotogeneración del par electrón-hueco de la oblea, $G_{ext}(t)$. Para determinar correctamente $G_{ext}(t)$ es necesario definir el factor óptico efectivo de transmisión, f_{opt} , que tiene en cuenta las pérdidas por reflexión de la muestra.

Una vez obtenidas las dos magnitudes implicadas en el cálculo de τ_{eff} , Δn_{av} y G_{ext} , se aplica el método general propuesto por Nagel et al. [2] donde para cada nivel de iluminación se evalúa la siguiente ecuación:

$$\tau_{eff}(\Delta n_{av}) = \frac{\Delta n_{av}(t)}{G_{ext}(t) - \frac{\partial \Delta n_{av}(t)}{\partial t}} \quad (1.3)$$

Para cada instante de tiempo, el resultado es un par de valores (τ_{eff} , Δn_{av}) por lo que mediante la variación del nivel de iluminación se puede obtener con facilidad la dependencia de τ_{eff} con un amplio rango de Δn_{av} .

Este método es general y siempre válido para cualquier variación temporal de la iluminación. Sin embargo existen dos casos límite, muy habituales en este tipo de medidas:

- *Medida Quasi-Steady State PhotoConductance (QSSPC)* [3]: la variación de luz es muy lenta y por tanto el término de la derivada en la ecuación (1.3) es despreciable. Este tipo de medida necesita la calibración de f_{opt} .
- *Medida PhotoConductance Decay (PCD)* [4]: la iluminación es muy corta con lo que se permite que los portadores fotogenerados se recombinen una vez terminada la iluminación. En la ecuación general (1.3) el término de $G_{ext}(t)$ será nulo y por tanto, τ_{eff} sólo dependerá de la magnitud Δn_{av} . Una buena calibración de la señal de fotoconductancia debería ser suficiente para obtener valores de τ_{eff} muy robustos. De hecho, la confrontación de medidas QSSPC y PCD de una misma muestra, tomando estos últimos como referencia, es una técnica habitual para determinar f_{opt} .

1.2. Instrumentación

Existen dos escenarios posibles para las medidas. Para la primera aproximación los instrumentos utilizados son: osciloscopio Tektronix TDS 210, Sinton WCT-100 y un PC (véase Fig.1.3).

El Sinton es un instrumento fabricado por la empresa Sinton consulting. Esta empresa se dedica a desarrollar y fabricar nuevos instrumentos para determinar la calidad del silicio de partida que se utiliza para la fabricación de las células solares.

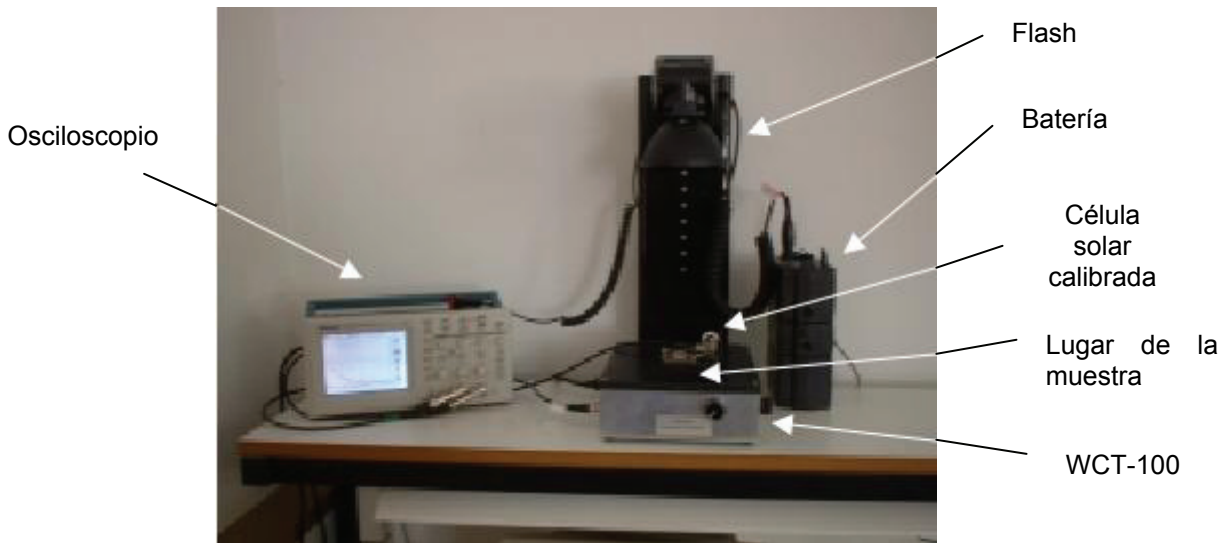


Fig. 1.3 Escenario de medida (fotografía extraída de [5])

El instrumento tiene como principal utilidad la de obtener el tiempo de vida efectivo, τ_{eff} , en función del nivel de inyección, Δn_{av} .

Para la obtención de la medida del tiempo de vida eficaz, se utiliza una técnica basada en un circuito de acoplo inductivo que permite obtener una tensión proporcional a la conductividad de la muestra sin contactos. Este hecho supone una ventaja del sistema ya que permite la medida de tiempo de vida en estructuras precursoras de célula solar sin acabar. En consecuencia, se puede seguir la evolución del dispositivo a medida que se realizan sus pasos de fabricación. Por otro lado, una célula solar calibrada colocada justo al lado de la muestra nos permite obtener una señal proporcional a la intensidad de iluminación que le llega a la muestra.

Por tanto, en el proceso de medida, se inyecta luz, gracias al flash fotográfico incluido en el Sinton WCT-100, a la oblea de silicio, y consecuentemente también a la célula solar calibrada. El instrumento genera una señal de radiofrecuencia que al pasar por el puente de RF, hace que la bobina de dicho puente se acople a la conductividad de la oblea (véase Fig.1.4). De esta forma se obtiene una señal de tensión, que se muestra en el osciloscopio, proporcional a la conductividad. Por otro lado, la célula solar calibrada mide la intensidad de la luz externa.

Tanto la señal de la intensidad de luz (V_{light}) como la de la fotoconductancia ($V\sigma$) son capturadas en el osciloscopio y transmitidas al PC. Allí se aplican los factores de calibración indicados por el fabricante, f_{σ} y f_{suns} , para obtener la fotoconductividad y la intensidad de luz en soles según [6]:

$$\Delta\sigma(t) = V\sigma(t) \cdot f_{\sigma} \quad (1.4)$$

$$Suns(t) = V_{Light}(t) \cdot f_{Suns} \quad (1.5)$$

Una vez obtenidas estas señales, se calculan Δn_{av} y G_{ext} utilizando las siguientes expresiones [25]:

$$\Delta n_{av}(t) = \frac{\Delta\sigma(t)}{q \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot W} \quad (1.6)$$

$$G_{ext}(t) = Suns(t) \cdot f_{opt} \cdot \frac{38 \cdot 10^{-3}}{q \cdot W} \quad (1.7)$$

Donde f_{opt} es el factor óptico que tiene en cuenta el porcentaje real de luz que entra en la muestra. Se considera que, en caso de que toda la luz genere portadores, se obtendrían 38 mA de corriente fotogenerada a 1 sol de iluminación. Finalmente, se aplica el método general expresado en la ecuación (1.3) para obtener la curva $\tau_{eff}(\Delta n_{av})$

Para aumentar la relación señal-ruido en la señal de la intensidad de luz, se ha substituido la célula solar calibrada integrada en el equipo por una externa que posee un selector de la resistencia que convierte la corriente fotogenerada en tensión medida por el osciloscopio. Variando la posición permite elegir entre cinco resistencias de diferente valor (véase tabla 1.1) de forma que a menor intensidad le correspondan valores mayores de resistencia que mantengan la tensión a niveles adecuados. Esta mejora repercute en el factor f_{suns} que convierte la tensión en soles de intensidad y el usuario debe seleccionar el factor adecuado a cada medida. De esta forma, la conversión entre corriente fotogenerada en la célula solar de referencia (proporcional a la intensidad de luz) y tensión (medida en el osciloscopio) se hace más ventajosa.

Tabla 1.1. Valores de resistencia, factores de calibración e intensidad de luz

Posición	Valor Resistencia (Ω)	Factor Calibración, f_{suns} (V/Sun)	Rango de Intensidad de Luz (suns)
A	0,010	$6,55 \cdot 10E-4$	>10
B	0,100	$6,11 \cdot 10E-3$	10-1
C	1,00	$6,55 \cdot 10E-2$	1-0,1
D	10,0	$6,46 \cdot 10E-1$	0,1-0,01
E	100	6,5	<0,001

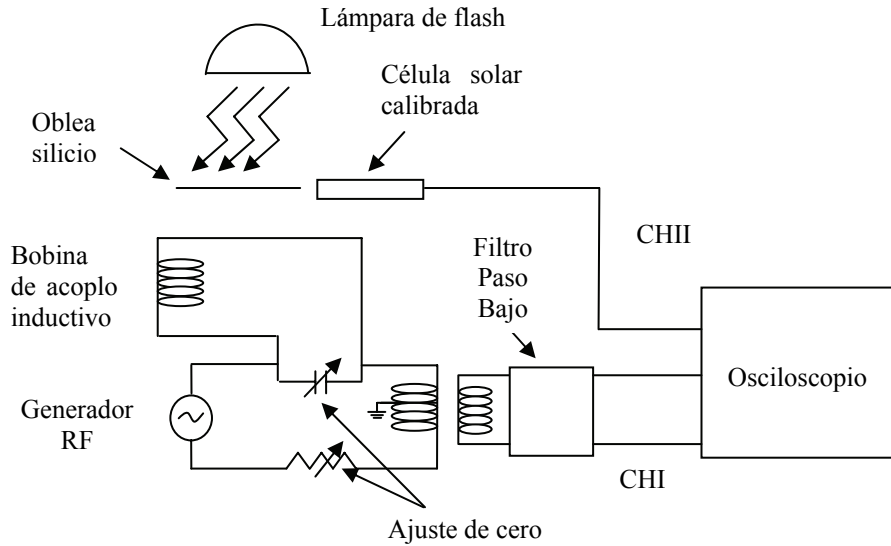


Fig. 1.4 Esquema circuito Sinton WCT-100

Por otro lado, la relación señal-ruido del canal donde se mide la fotoconductividad suele ser bastante baja debido a las propias características del acoplo inductivo. De hecho, la sensibilidad de este canal es el que nos limita el rango de medida a Δn_{av} alrededor de 10^{13} cm^{-3} sin posibilidad de medir en niveles de inyección menores. Aumentar esta relación señal-ruido nos lleva a una mejora del instrumento mediante la modulación de la fuente de luz y la introducción de un amplificador lock-in que permita una detección coherente. Por tanto se define un segundo escenario, formado por array de LED's, osciloscopio Tektronix TDS 210, Sinton WCT-100, Generador de funciones Agilent 33220A, amplificador de lock-in SR380 y un PC (véase Fig.1.5).

El proceso de medida es prácticamente el mismo que el explicado para la primera aproximación, sin embargo la obtención de las señales proporcionales a la conductividad y a la intensidad de luz varía substancialmente. Por un lado es necesario recalibrar el factor óptico ya que hemos modificado el espectro de la fuente de luz. Por otro lado, debemos hallar dos nuevos factores de calibración para el amplificador de lock-in ya que este amplificador no mide directamente la tensión asociada a las señales sino que proporciona la amplitud de los diferentes armónicos a partir de la frecuencia fundamental de la señal de excitación. Por tanto, se requieren dos factores de calibración, $f_{lock-in|s}$ y $f_{lock-in|light}$ que relacionen las amplitudes del armónico fundamental con la tensión pico a pico de cada uno de los canales, señal de fotoconductividad y señal de iluminación. En consecuencia, las expresiones a aplicar para la obtención de $\Delta\sigma(t)$ y $Suns(t)$ se modifican siendo ahora:

$$\Delta\sigma(t) = V_{Lock-in|\sigma}(t) \cdot f_{Lock-in|\sigma} \cdot f_{\sigma} \tag{1.8}$$

$$Suns(t) = V_{Lock-in|Light}(t) \cdot f_{Lock-in|Light} \cdot f_{suns} \tag{1.9}$$

Una vez obtenidas esas magnitudes, se continúan aplicando las mismas ecuaciones (1.6) y (1.7) que en el escenario anterior para el cálculo de G_{ext} y Δn_{av} .

Para recalibrar el f_{opt} se procede a realizar una medida QSSPC (flash largo) y una medida PCD (flash corto) con la nueva fuente de luz, el array de leds. En la medida de QSSPC, éste es atacado con una señal triangular a fin de obtener una señal similar a la proporcionada por el flash en la aproximación anterior. Después se realiza una medida PCD, lo que significa atacar el array de LED's con un pulso cuadrado de muy corta duración. La confrontación de ambas medidas nos permitirá determinar f_{opt} .

Para la obtención de los factores de calibración del lock-in, se realiza una medida y se recogen los datos del osciloscopio, que se consideran de referencia, y del lock-in. Los factores de calibración se obtienen al solapar ambos resultados.

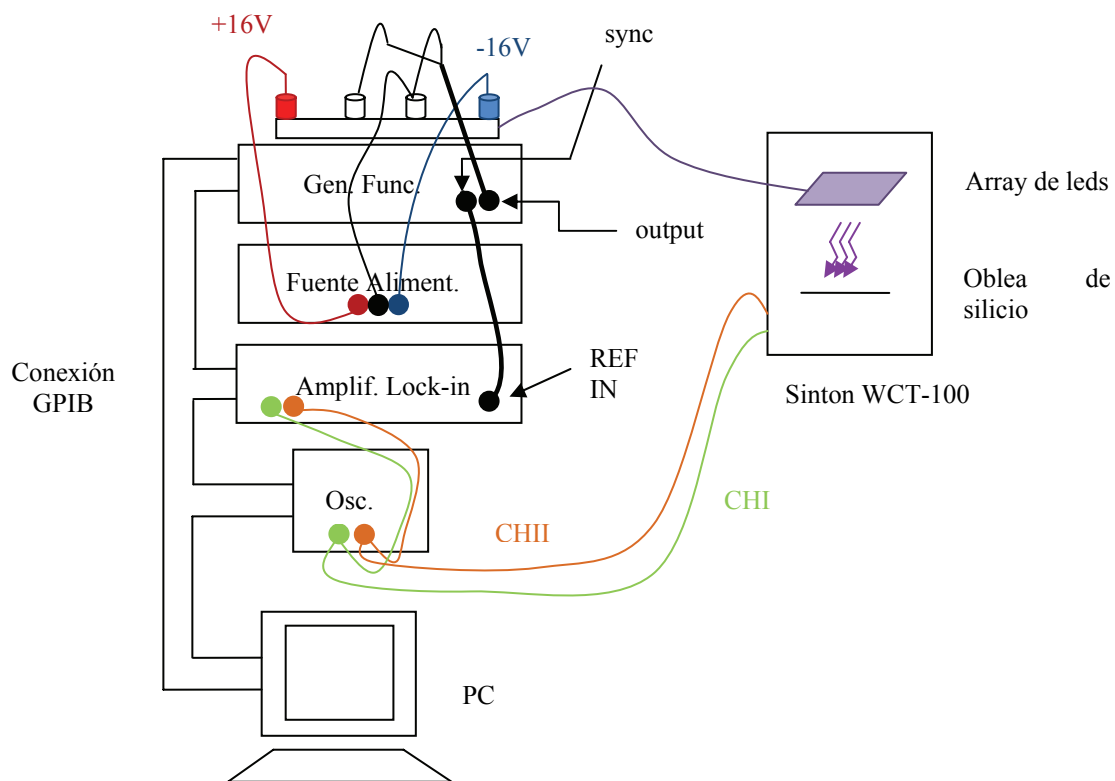


Fig. 1.5 Escenario medidas para segunda aproximación

1.3. Mejoras a introducir

Una primera mejora ya introducida en un TFC anterior [1], consiste en reemplazar el flash fotográfico por un array de LED's. De esta forma se controla mejor la fuente de luz y se puede mejorar ligeramente la sensibilidad del canal de fotoconductancia. Con esta nueva fuente de luz y utilizando el mismo software proporcionado por el fabricante se consiguieron medidas en niveles de inyección en el rango de $6-8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$.

Estos resultados eran esperanzadores y se propone dentro ya de este TFC el rediseño del software que permita la automatización del proceso de medida con el array de LED's. Esto repercutiría en un aumento en el rango de inyección disponible alcanzando medidas en $2-4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ y en el tiempo para realizar cada medida que sería menor. Además se podría realizar una mejor gestión de los datos de medida que habitualmente quedan dispersos en diferentes hojas de Excel para la misma muestra.

Con el objetivo de alcanzar medidas fiables en el rango de 10^{11} cm^{-3} se introduce un amplificador lock-in. Para poder aprovechar al máximo el nuevo instrumento se necesita de una aplicación que automatice y simplifique al máximo la rutina de medida así como la obtención de forma sencilla de los diferentes factores de calibración implicados.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE LAS COMUNICACIONES.

2.1. *Estándar SCPI*

Gran parte de los instrumentos empleados en muchos laboratorios actuales soportan programación remota a través de diferentes interfaces.

La programación de los instrumentos electrónicos empezó cuando Hewlett-Packard desarrolló el bus HP-IB. Paralelamente, otros fabricantes desarrollaron, basándose en el HP-IB, el *General Purpose Instrumentation Bus* (GPIB).

Sobre el 1978 *Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) estandarizó el bus, dándolo a conocer como el IEEE 488.

El estándar 488.1 define los parámetros mecánicos, eléctricos, así como el protocolo básico GPIB, pero no especifica el formato de los comandos. Por ello, en junio del 1987 se estableció el estándar 488.2, desarrollado sobre 488.1, donde se fijaron la sintaxis básica, los comandos independientes del dispositivo, las estructuras de datos y los protocolos de error.



Fig. 2.1 Detalle conector GPIB

El estándar basa la comunicación en el envío de cadenas de caracteres en código ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), conocidas como comandos, entre los diferentes dispositivos.

Debido al auge del estándar y que gran parte de los dispositivos programables contaban con comandos propios se introdujo un estándar para los mismos a principios de los 90, el *Standard Commands for Programmable Instrumentation* (SCPI). Pero todo y que ya se han definido los parámetros necesarios para la comunicación y la transmisión de los datos, hoy en día sigue sin existir una implementación universal del lenguaje. Con lo que queda a disposición de cada fabricante el seguir los estándares o incluir comandos propios para cada instrumento.

Por tanto, el SCPI define la estructura de los comandos, así como, la sintaxis para el control de los instrumentos programables, pero no especifica su comunicación física.

Existen diversas maneras para establecer la comunicación física, tales como: puerto COM (RS232), puerto GPIB, VXI, USB, etc.

2.1.1. Comunicaciones mediante puerto GPIB

Todo y que inicialmente se utilizó la comunicación RS2323 (véase anexo A) para conectar los diferentes instrumentos, finalmente se eligió la comunicación GPIB para el desarrollo de los objetivos de este trabajo final de carrera. Los dispositivos han sido controlados remotamente a través de un PC que estaba conectado a los demás dispositivos gracias a un cable GPIB-USB de National Instruments, como el que aparece en la Fig. 2.2.

A continuación se detallan algunas características básicas de dicha comunicación.



Fig. 2.2 Cable GPIB-USB

Las especificaciones del puerto GPIB son:

- Posibilidad de conectar hasta 15 dispositivos como máximo en un solo bus contiguo.
- Configuraciones posibles para la interconexión en red: en forma de estrella, lineal o mixta. Con una longitud de hasta 20 metros o 2 metros por dispositivo, lo que sea menor.
- La transferencia de mensajes es byte a byte si es transmisión serie, bit a bit si es en paralelo. Transferencia asíncrona de datos utilizando un sistema de negociación de tres cables.

- Máximas velocidades de datos: 1 megabyte por segundo para distancias limitadas, 250 a 500 kilobytes por segundo para la máxima distancia. Los dispositivos en el bus determinan la velocidad actual.
- Capacidad de direcciones. Direcciones primarias: 31 enviando y 31 recibiendo. Direcciones secundarias: 961 enviando y 961 recibiendo. Puede haber como máximo 1 dispositivo enviando y hasta 14 dispositivos recibiendo, a la vez en un mismo bus. Cada dispositivo debe tener una dirección única.

2.1.2. Formato de los comandos SCPI

Los comandos se describen utilizando la notación de Backus-Naur. Esta notación está formada por el grupo de símbolos de la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Símbolos de la notación Backus-Naur

Símbolo	Significado
< >	Elemento definido
::=	Se define como
	Or exclusiva
{ }	Grupo; un elemento es requerido
[]	Opcional; puede omitirse
· · ·	Elemento(s) previos pueden repetirse
()	Comentario

Existen dos tipos de comandos: los comandos *Set* y los comandos *Query*. Los primeros son utilizados para cambiar la configuración de los dispositivos o para ejecutar una determinada acción. Y los segundos fuerzan al dispositivo en cuestión a responder facilitando información y datos acerca de su estado.

Algunos de los comandos son tanto de tipo *Set* como *Query*. Un ejemplo sería el comando *CAL?. Dicho comando ejecuta una rutina de auto calibración del instrumento y a su vez devuelve el resultado de la calibración.

Los comandos tienen diferentes elementos, tal y como se muestra a continuación:

Tabla 2.2. Elementos de los comandos

Elemento	Explicación
<Header>	El nombre básico del comando. Si la <i>Header</i> acaba con un signo de interrogación, el comando es una <i>Query</i> . La <i>Header</i> debe empezar con dos puntos (:); si el comando está concatenado con otros comandos los dos puntos del principio son necesarios. Los dos puntos del principio nunca deben usarse con comandos con <i>Headers</i> que empiecen con asterisco (*)

<Mnemonic>	La cabecera (header) de una subfunción. Algunas <i>Headers</i> de algunos comandos sólo tienen un <i>mnemonic</i> . Si la <i>Header</i> de un comando tiene múltiples <i>mnemonics</i> , deben separarse siempre entre ellos con dos puntos (:)
<Argument>	Una restricción de cantidad, calidad asociada con la <i>Header</i> . No todos los comandos tienen un argumento, mientras otros tienen múltiples. Los <i>Argument</i> se separan de la <i>Header</i> por un <Space> y entre ellos por una <Comma>.
<Comma>	Para separar los diferentes <i>Argument</i> se usa una única <i>Comma</i> . Opcionalmente puede haber caracteres de espacio en blanco antes y después de una <i>Comma</i> .
<Space>	Entre la <i>Header</i> del comando y el <i>Argument</i> debe haber un <i>Space</i> . Opcionalmente puede consistir en múltiples espacios en blanco.

Por tanto la estructura de un comando Set debe ser:

[:]<Header> [<Space><Argument> [<Comma><Argument>] . . .]

Para un comando Query sería:

[:]<Header> ?
 [:]<Header> ? [<Space><Argument> [<Comma><Argument>] . . .]

La *Header* de un comando está compuesta por uno o más *Mnemonics* estructurados en una jerarquía en forma de árbol. El primer *mnemonic* es la base o raíz del árbol y cada subsiguiente *mnemonic* es un nivel del anterior. Los comandos en el nivel más alto en el árbol afectan a los de niveles inferiores. Los dos puntos al principio siempre devuelven a la base del árbol del comando.

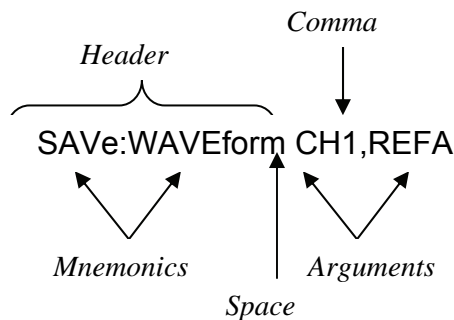


Fig. 2.3 Elementos de un comando del osciloscopio empleado

En la mayoría de instrumentos está permitida la abreviación de los comandos. Por lo general, se puede distinguir en la sintaxis de cada comando la parte que abrevia el comando general ya que esta parte está en letras mayúsculas.

La comunicación GPIB permite configurar el fin de mensaje a elección del programador. Así pueden usarse: LF, CR, EOI, etc. Para la comunicación establecida entre los instrumentos utilizados en la realización de este trabajo final de carrera se ha utilizado como fin de mensaje CR LF.

2.1.3. Comandos SCPI utilizados

2.1.3.1 Osciloscopio Tektronix TDS 210

Tabla 2.3. Comandos para osciloscopio

Sintaxis	Descripción
<i>ACQuire:STATE</i> { <i>OFF</i> <i>ON</i> <i>RUN</i> <i>STOP</i> }	Inicia o para las adquisiciones del osciloscopio.
<i>CH</i> < <i>x</i> > <i>POSition</i> < <i>NR3</i> >	Ajusta la posición vertical del canal seleccionado. < <i>NR3</i> > indica las divisiones desde el centro de la cuadrícula.
<i>CH</i> < <i>x</i> > <i>VOLts</i> < <i>NR3</i> >	Ajusta la escala vertical del canal seleccionado al valor de <i>NR3</i> .
<i>CURVe?</i>	Forma Query. Devuelve la señal mostrada en pantalla.
<i>DATA:ENCdg</i> { <i>ASCIi</i> <i>RIBinary</i> <i>SRIBinary</i> <i>SRPbinary</i> } <i>DATA:SOURce</i> < <i>wfm</i> >	Ajusta el formato de datos de la forma de onda. Selecciona la señal que será transferida con <i>Queries</i> como <i>CURVe?</i>
<i>DATA:STARt</i> < <i>NR1</i> >	Indica el punto de inicio en la transferencia de la señal desde o hacia el osciloscopio.
<i>DATA:STOP</i> < <i>NR1</i> >	Indica el último punto que será transferido, si no se especifica será 2500.
<i>DATA:WIDth</i> < <i>NR1</i> >	Indica el número de bytes que se transferirán por punto de la señal al ejecutar el comando <i>CURVe</i> .
<i>HEADer</i> { < <i>NR1</i> > <i>OFF</i> <i>ON</i> }	Activa o desactiva las cabeceras en las respuestas del osciloscopio.
<i>HORizontal:MAIn:POSition</i> < <i>NR3</i> >	Ajusta la posición horizontal.
<i>HORizontal:MAIn:SCALE</i> < <i>NR3</i> >	Ajusta la escala temporal.
<i>HORizontal:RECOrdlength?</i>	Devuelve el número de puntos a adquirir.
<i>*RCL</i> < <i>NR1</i> >	Restaura el estado del osciloscopio al guardado en memoria.
<i>SAVe:SETUp</i> < <i>NR1</i> >	Salva el estado actual del osciloscopio en el lugar de memoria especificado en <i>NR1</i> .
<i>TRIGger:MAIn:EDGE:SOURce</i> { <i>CH</i> < <i>x</i> > <i>EXT</i> <i>EXT5</i> <i>LINE</i> }	Ajusta la fuente de trigger.
<i>TRIGger:MAIn:LEVel</i> < <i>NR3</i> >	Ajusta el nivel de trigger.
<i>TRIGger:MAIn:MODE</i> { <i>AUTO</i> <i>NORMal</i> }	Ajusta el modo de trigger.
<i>WFMPre:XINcr?</i>	Forma Query. Devuelve el intervalo entre las muestras de la señal especificada por el comando <i>DATA:SOURce</i> .
<i>WFMPRE:XZErO?</i>	Forma Query. Devuelve la posición de la primera

	muestra de la señal especificada.
WFMPRE:YMULT?	Forma Query. Devuelve el valor de YMULT de la señal especificada.
WFMPRE:YOFF?	Forma Query. Devuelve el valor YOFF de la señal especificada.
WFMPRE:YZERO?	Forma Query. Devuelve el valor YZERO de la señal especificada.

2.1.3.2. Generador de funciones Agilent 33220A (20Mhz)

Tabla 2.4. Comandos para generador de funciones

Sintaxis	Descripción
<i>APPLY:PULSe</i> [<i><frequency></i> [, <i><amplitude></i> [, <i><offset></i>]]]	Pone a la salida un pulso con la frecuencia, amplitud y offset especificados.
<i>APPLY:SQUare</i> [<i><frequency></i> [, <i><amplitude></i> [, <i><offset></i>]]]	Pone a la salida una señal cuadrada con la frecuencia, amplitud y offset especificados.
<i>APPLY:RAMP</i> [<i><frequency></i> [, <i><amplitude></i> [, <i><offset></i>]]]	Pone a la salida una rampa con la frecuencia, amplitud y offset especificados.
<i>FUNCTION</i> { <i>SINusoid</i> / <i>SQUare</i> / <i>RAMP</i> / <i>PULSe</i> / <i>NOISe</i> / <i>DC</i> / <i>USER</i> }	Selecciona el tipo de señal a la salida.
<i>FUNCTION:RAMP:SYMMetry</i> { <i><percent></i> / <i>MINimum</i> / <i>MAXimum</i> }	Ajusta la simetría para la señal rampa.
<i>FUNCTION:PULSe:DCYCLE</i> { <i><percent></i> / <i>MINimum</i> / <i>MAXimum</i> }	Ajusta el Duty Cycle de la señal pulso, en porcentaje.
<i>FUNCTION:PULSe:WIDTH</i> { <i><seconds></i> / <i>MINimum</i> / <i>MAXimum</i> }	Ajusta la anchura de la señal pulso.
<i>FREQuency</i> { <i><frequency></i> / <i>MINimum</i> / <i>MAXimum</i> }	Ajusta la frecuencia deseada.
<i>OUTPut:LOAD</i> { <i><ohms></i> / <i>INFinity</i> / <i>MINimum</i> / <i>MAXimum</i> }	Selecciona la terminación deseada.
<i>OUTPut</i> { <i>OFF</i> / <i>ON</i> }	Activa o desactiva la salida del generador.
<i>VOLTage:OFFSet</i> { <i><offset></i> / <i>MINimum</i> / <i>MAXimum</i> }	Pone el offset adecuado.
<i>VOLTage:UNIT</i> { <i>VPP</i> / <i>VRMS</i> / <i>DBM</i> }	Ajusta las unidades de la amplitud de salida.
<i>SYSTEM:COMMunicate:RLState</i> { <i>LOCal</i> / <i>REMote</i> / <i>RWLock</i> }	Ajusta el estado de trabajo del instrumento.

2.1.3.3. Amplificador de Lock-in SR380

Tabla 2.5. Comandos para Lock-In

Sintaxis	Descripción
<i>DDEF i {, j, k}</i>	Selecciona los displays del canal 1 y 2 (i=1,2) a XY, Rθ, XnYn, Aux 1,3 o Aux 2,4 (j=0..4)
<i>FMOD {i}</i>	Selecciona la señal de referencia i=1 interna, i=0 externa.
<i>HARM {i}</i>	Configura al lock-in para que detecte el armónico i th de la frecuencia de referencia. (i=1..19999)
<i>ISRC {i}</i>	Selecciona el input A (i=0), A-B (i=1), I (1 MΩ) (i=2) or I (100 MΩ) (i=3).
<i>LOCL {i}</i>	Configura al lock-in en estado: local (i=0), remoto (i=1) y local lockout (i=2).
<i>OFLT {i}</i>	Ajusta la constante de tiempo.
<i>OUTR ? i</i>	Lee los valores del display del CH1 (i=1) o CH2 (i=2)
<i>SENS (?) {i}</i>	Forma Query. Pide la sensibilidad a la que está en ese momento.
<i>*CLS</i>	Limpia todos los registros de estado.
<i>*RST</i>	Resetea el SR830 a sus configuraciones por defecto.

2.2. Diseño de la arquitectura.

Existen diferentes escuelas de programación. Una de ellas es la basada en el diseño por capas. El máximo objetivo de este tipo de programación es la separación lógica de las diferentes partes del programa para asegurar la independencia entre las distintas capas. Esta independencia asegura que en el momento en que se introduzca un cambio en capas inferiores las superiores no se vean afectadas.

Siguiendo esta metodología se ha dividido el programa a diseñar en 4 capas: vista/lógica, instrumentación, comunicación y física.

La capa vista es la encargada de implementar la interacción con el usuario. Recoge los eventos de teclado y ratón y efectúa las acciones indicadas.

La capa de instrumentación consiste en la representación lógica de los diferentes instrumentos que intervienen en las medidas realizadas. Esta capa por tanto, contiene las funciones necesarias para la interacción con el usuario mencionadas, anteriormente, en la capa anterior.

En cuanto a la capa de comunicación, como su nombre indica, permite la comunicación entre instrumentos de medida y de recogida de datos, gracias a las diversas funciones implementadas con tal fin.

Por último, se encuentra la capa física. Ésta está formada por los instrumentos, en sí, utilizados para los experimentos.

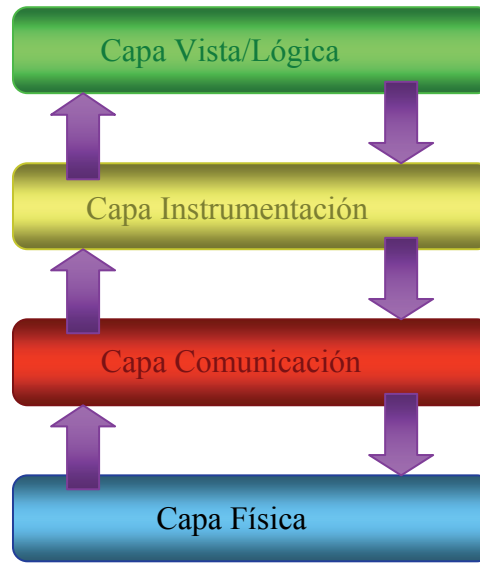


Fig. 2.4 Esquema arquitectura por capas

CAPÍTULO 3. PRIMERA APROXIMACIÓN: PC-SINTON-OSCILOSCOPIO.

3.1. Procedimiento de medida

Este apartado pretende ser una guía de utilización para el usuario. Por ello se detallarán los pasos a seguir necesarios para realizar las medidas.

Para abrir el programa se debe clicar sobre el ejecutable que tiene por nombre *GPIBOscMeasure.exe*. Una vez hecho esto aparecerán en pantalla la vista principal del programa y la plantilla.

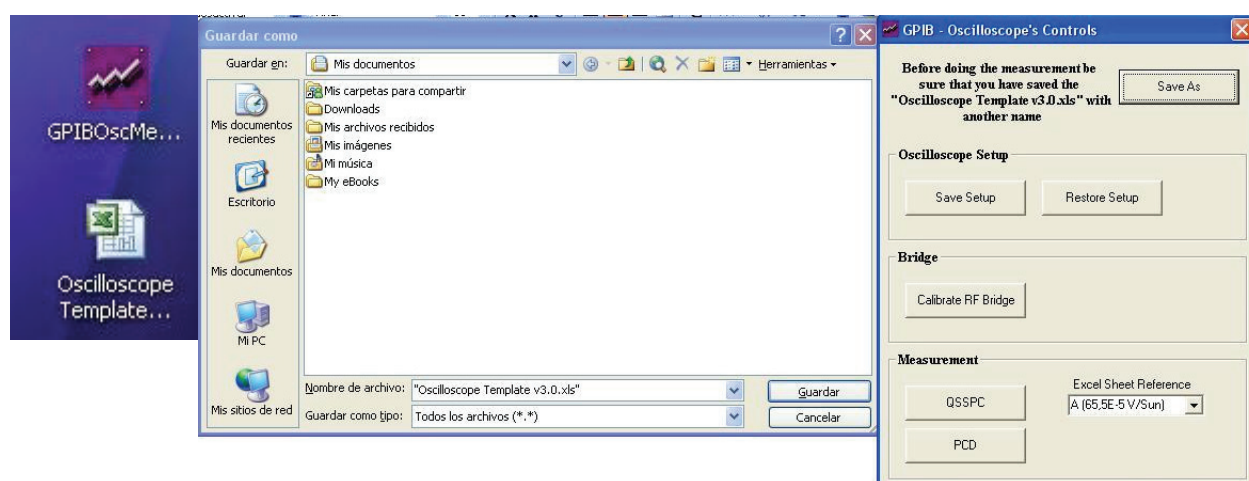


Fig. 3.1 Aspecto del ejecutable y la plantilla y menú de navegación del botón *Save As*

Antes de realizar cualquier medida es necesario guardar la plantilla con otro nombre, como indica la vista del programa, apretando el botón *Save As*. (véase Fig. 3.1)

Una vez guardado el libro de Excel se debe apretar el botón *Calibrate Bridge RF*. Éste configurará el osciloscopio consecuentemente y mediante un mensaje por pantalla informará de que el osciloscopio está listo y ya se puede calibrar el puente de RF (véase Fig. 3.2). Esta calibración consiste en minimizar la señal de conductancia mediante los controles de resistencia y capacidad del puente de RF. Posteriormente, se gira el control de resistencia en sentido horario hasta alcanzar una tensión de 100 mV.

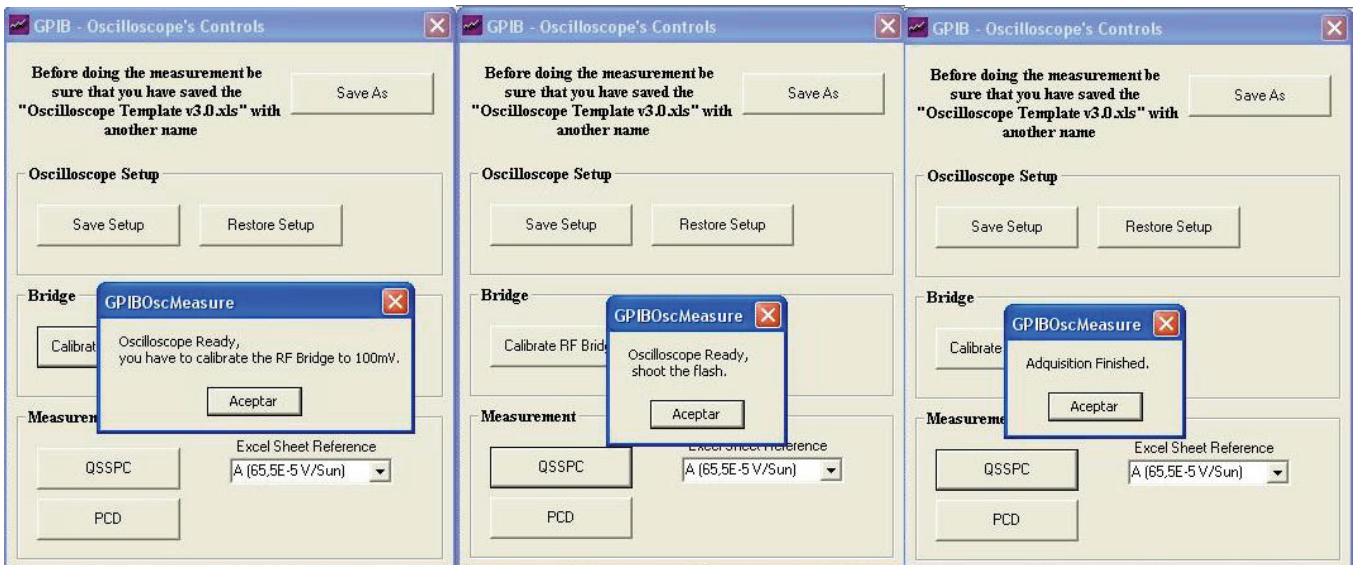


Fig. 3.2 Detalle de los mensajes por pantalla del programa en orden de aparición, de izquierda a derecha

Después de calibrar el puente se puede proceder a realizar la medida. Dependiendo de si se quiere realizar una medida de tipo PCD o de tipo QSSPC se debe presionar uno u otro botón. La diferencia entre una u otra medida es la duración del flash por lo que el usuario debe configurarlo adecuadamente antes de clicar en el botón.

Para los dos tipos de medidas, el procedimiento es el mismo. Primeramente presionar el botón, a continuación el programa informa de que el osciloscopio está preparado y de que se debe disparar el flash fotográfico. Una vez se dispare el flash, las señales quedan almacenadas en el osciloscopio y se presiona *Aceptar* en el mensaje por pantalla para que el programa recoja los datos. Mediante un mensaje por pantalla se informa al usuario de que la medida ha finalizado. (véase Fig. 3.2)

3.1.1. Medida de ejemplo

El procedimiento anterior describe una medida de tiempo de vida. Sin embargo, para poder barrer un amplio rango de niveles de inyección se utilizan filtros neutros que disminuyen la luz del flash sobre la muestra. De esta manera, se pueden ir concatenando diferentes medidas QSSPC hasta completar un rango en Δn_{av} de 10^{13} cm^{-3} hasta 10^{17} cm^{-3} . Además, para una correcta calibración del factor óptico, f_{opt} , en las medidas QSSPC se añade una medida PCD. El factor óptico se modifica hasta que los datos de ambas medidas coinciden.

El resultado de todo este proceso se puede observar en la figura 3.3, donde se han realizado 5 medidas QSSPC y 1 medida PCD de la misma muestra. Cada uno de los flashes corresponde con una posición del selector de la célula calibrada (ver tabla 1.1). Si todo está correctamente calibrado, como es el caso, se consigue una curva $\tau_{eff}(\Delta n_{av})$ continua en todo el rango.

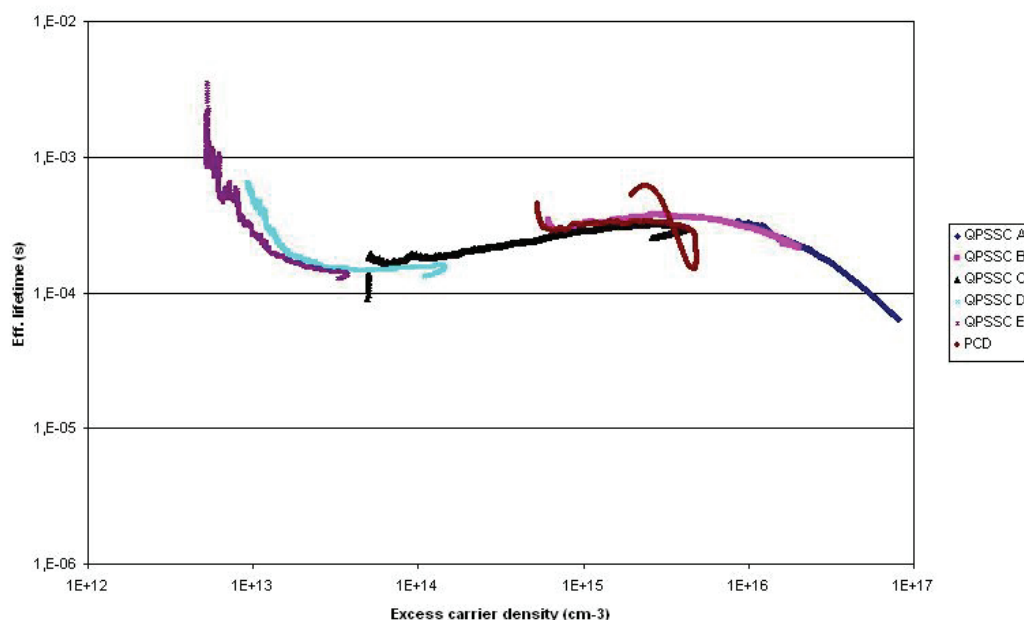


Fig. 3.3 Gráfica de ejemplo de una medida $\tau_{eff}(\Delta n_{av})$

3.2. Diseño del software. Vista para medidas con osciloscopio

El diseño del software parte de la necesidad de automatizar las medidas que se llevaban a cabo en el laboratorio de test con el instrumento Sinton WCT-100. Para el diseño del software se ha utilizado el entorno de desarrollo Visual Basic 6.0.

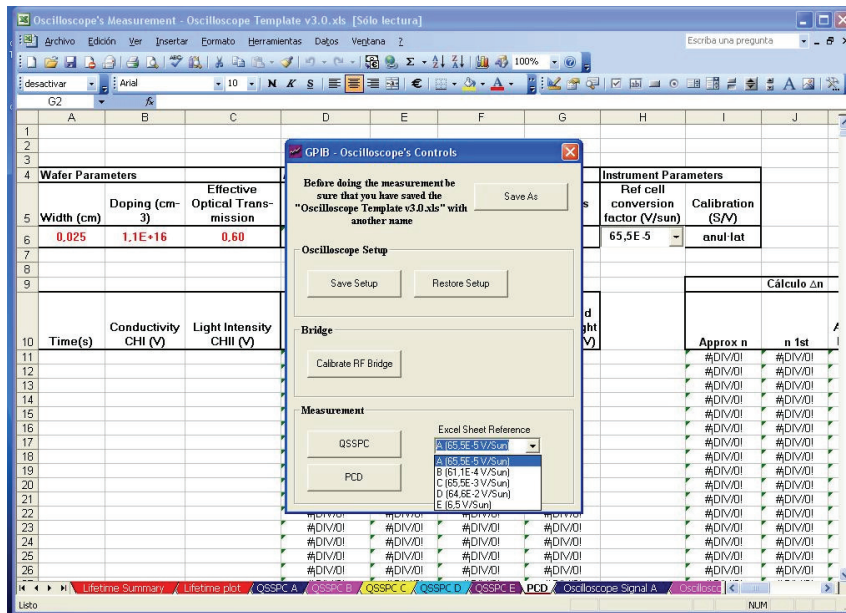


Fig. 3.4 Vista del programa y su plantilla

3.2.1. Funcionamiento

Una vez se ejecuta el programa aparece la vista principal y se abre una plantilla de Excel. La vista está formada por 6 botones y una lista desplegable.

3.2.1.1. Botón Save As

Al clicar sobre el botón se abre un navegador de ficheros que permite seleccionar el lugar y el nuevo nombre con el que se desea guardar el libro de Excel. Esto debe realizarse antes de comenzar ninguna medida debido a que la plantilla es de sólo lectura.

Una vez salvado, el libro de Excel que está abierto pasa a ser el que acabamos de guardar. Evitando así sobrescribir la plantilla.

3.2.1.2. Botón Save Setup

Se vio que era interesante poder guardar la última configuración utilizada y ya retocada por el usuario a fin de poder repetir las medidas exactamente con el mismo escenario.

Una vez el usuario clicca este botón el programa abre una comunicación GPIB con el osciloscopio, salva la configuración actual del instrumento y cierra la comunicación establecida. El programa siempre guarda la configuración en la posición 1 de memoria del osciloscopio, sobrescribiéndola cada vez que se vuelva a presionar el botón.

3.2.1.3. *Botón Restore Setup*

Al clicar el botón el usuario restaura la última configuración guardada, siendo esta la única recuperable, ya que como se explicó anteriormente el botón de guardado sólo permite guardar una configuración.

El programa inicia una comunicación con el osciloscopio, restaura la configuración que está guardada en la memoria y se cierra la comunicación.

3.2.1.4. *Botón Calibrate RF Bridge*

Este botón fue pensado para facilitar la calibración del puente RF del instrumento Sinton WCT-100, ya que configura al osciloscopio en los valores idóneos.

Si se presiona el botón se establece una comunicación GPIB con el osciloscopio, se ejecuta una rutina de calibración predefinida y se cierra la comunicación establecida.

3.2.1.5. *Botón QSSPC*

Este botón está relacionado directamente con la lista desplegable de la vista. La lista desplegable contiene los valores de las diferentes posiciones del selector acoplado a la célula solar calibrada. Según se comentó en el capítulo 1, este selector permite cambiar la sensibilidad de voltios por soles de intensidad mejorando la relación señal-ruido. Por ello, antes de presionar el botón QSSPC, el usuario debe asegurarse de que la opción elegida en la lista desplegable es la que se corresponde con la posición del selector, para que los datos que resulten de la medida se recojan en la hoja del libro de Excel adecuada.

El programa selecciona la hoja del libro de Excel que corresponda, dependiendo de la opción escogida en la lista desplegable, abre una comunicación con el osciloscopio, realiza la rutina de medida de tipo QSSPC y cierra la comunicación.

3.2.1.6. *Botón PCD*

Al clicar sobre el botón el programa selecciona la hoja del libro de Excel que corresponde con la medida de tipo PCD. Seguidamente se establece la conexión vía GPIB con el osciloscopio, se ejecuta la rutina de medida de tipo PCD y se cierra la comunicación.

3.2.2. **Plantilla utilizada**

La plantilla empleada es un libro de Excel llamado *Oscilloscope Template v3.0.xls*. Este libro está formado por diferentes hojas, concretamente cuenta con 14 hojas: *Lifetime Summary*, *Lifetime Plot*, *QSSPC A*, *QSSPC B*, *QSSPC*

C, QSSPC D, QSSPC E, PCD, Oscilloscope Signal A, Oscilloscope Signal B, Oscilloscope Signal C, Oscilloscope Signal D, Oscilloscope Signal E y Oscilloscope Signal PCD.

3.2.2.1. *Lifetime Summary*

En esta hoja se encuentran las constantes necesarias, tales como el ancho de la oblea de silicio, su dopado, el factor óptico (f_{opt}) y el Coeficiente de Auger, para realizar los cálculos una vez obtenidos los datos de las medidas. Estas constantes pueden ser modificadas por el usuario y en caso de que eso ocurra se verán modificadas también en el resto de hojas del libro en dónde intervengan.

Como su propio nombre indica, esta hoja, es un recopilatorio del libro de Excel, ya que contiene los datos de *Apparent Carrier Density* y *TAU* de todas las medidas *QSSPC* y *PCD*.

Existe también un botón de *Reset* que vacía las celdas de *Time*, *Conductivity* y *Light Intensity* de las hojas de medida (todas las de *QSSPC* y también la de *PCD*) así como los valores de *Apparent Carrier Density* y *TAU* de cada una de las medidas que se recogen en la hoja *Lifetime Summary*.

3.2.2.2. *Lifetime Plot*

En el gráfico contenido en esta hoja se muestran los datos recopilados en la hoja *Lifetime Summary*.

Dicho gráfico muestra la dependencia del tiempo de vida efectivo en función de la densidad de portadores superponiendo todas las medidas realizadas. Si se han escogido adecuadamente los niveles de iluminación se obtiene una curva continua desde $\Delta n_{av} = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ a 10^{17} cm^{-3} aproximadamente. Además, la medida *PCD* debe solapar con el resto de medidas una vez se halla introducido el valor de f_{opt} adecuado.

3.2.2.3. *QSSPC*

Todas las hojas referentes a las medidas tipo *QSSPC* tienen la misma forma. La estructura que presentan está dividida en dos partes principales. En la parte superior de la hoja aparecen las constantes de la hoja *Lifetime Summary* (*Width*, *Doping*, *Effective Optical Transmission*, *Auger Coefficient* y *Ligth Bias*) así como el parámetro de *Reference Cell Conversion*. Para éste ultimo existe una lista desplegable dónde están contenidos los 5 valores necesarios para las diferentes medidas posibles (A, B, C, D y E) de forma que, dependiendo del tipo de medida que se desee hacer, sea posible modificarlo.

En la parte inferior, y ordenados por columnas, se encuentran primeramente los datos obtenidos del osciloscopio (*Time*, *Conductivity* y *Light Intensity*) y a continuación todos los cálculos necesarios (*Excess Conductivity*, *Excess Ligth*

Intensity, Smoothed Excess Conductivity Intensity, Suns, etc.) para obtener los valores de interés: la *Apparent Carrier Density* y el coeficiente *TAU*.

3.2.2.4. PCD

Al ser una hoja de medida, todo y tratarse de un tipo de medida diferente, el aspecto general de la hoja es el mismo que el de las hojas QSSPC.

3.2.2.5. Oscilloscope Signal

En estas hojas se representan, en una gráfica, los canales del osciloscopio en función del tiempo. Cada tipo de medida (QSSPC A, B, C, D, E y PCD) cuenta con su propia hoja.

3.3. Desarrollo del software. Vista para medidas con osciloscopio

Anteriormente se especificó la arquitectura general en capas. En este apartado se presenta su implementación en clases.

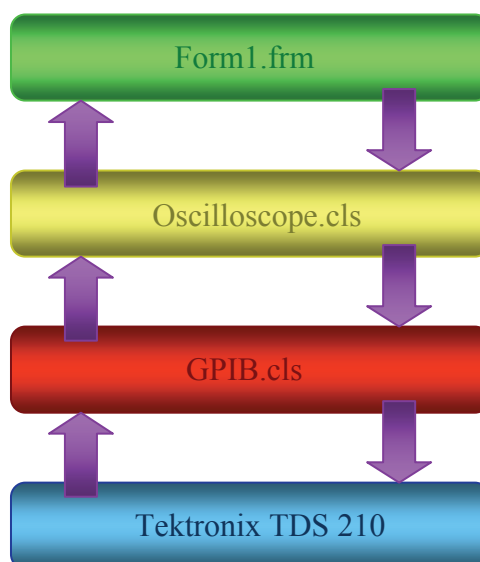


Fig. 3.5 Arquitectura del software

3.3.1. Form.frm

Este módulo se encarga de la relación directa con el usuario, captando los eventos de teclado y ratón que produce el mismo. A parte, es el encargado de, por un lado, cargar la plantilla de Excel, mencionada anteriormente, y de actualizar los datos en ella para poder obtener los resultados de las medidas.

3.3.2. Oscilloscope.cls

En la clase *Oscilloscope.cls* se incluyen las funciones necesarias para la calibración y obtención de datos del instrumento.

Calibrar_osc() es la función encargada de la calibración general del osciloscopio. Ésta consiste en ajustar los niveles y el modo de trigger (disparo con CH1, modo AUTO) y la escala correcta para el CH1 (50mV/DIV).

La función *Get_Channels()* obtiene los datos capturados por el osciloscopio y los transmite directamente a una hoja de Excel. Para ello, primero se selecciona el CH1 indicando el número total de muestras a obtener. Seguidamente se obtienen los parámetros necesarios para el escalado de la señal (*YZERO*, *YMULT*, *XINCR*, *XZE*) y por último se solicita la señal mediante la orden *Curve*. El mismo procedimiento es seguido para obtener los datos del CH2. Una vez obtenidos ambos canales, se escalan y se introducen los datos en la hoja de Excel correspondiente.

QSSPC() es la función, que como su nombre indica, es llamada para realizar este tipo de medidas. Primeramente se envía una configuración específica para la medida QSSPC (resolución CH1 50mV/Div y CH2 150mV/Div y mode NORMAL, level, fuente CH2 y posición de inicio del Trigger) y a continuación se hace una llamada a la función *Get_Channels()*.

En la función *PCD()* ocurre lo mismo que en la función *QSSPC()*.

Por último, dos funciones interesantes son la de *SSetup()* y *RSetup()*, que guardan y recargan respectivamente, la configuración del osciloscopio en un momento determinado.

3.3.3. GPIB.cls

Esta clase es la encargada de la comunicación entre el PC y el osciloscopio, por ello contiene las funciones necesarias para: enviar, *Send()*, recibir, *Receive()*, conectar *Connect()* y desconectar, *Disconnect()*.

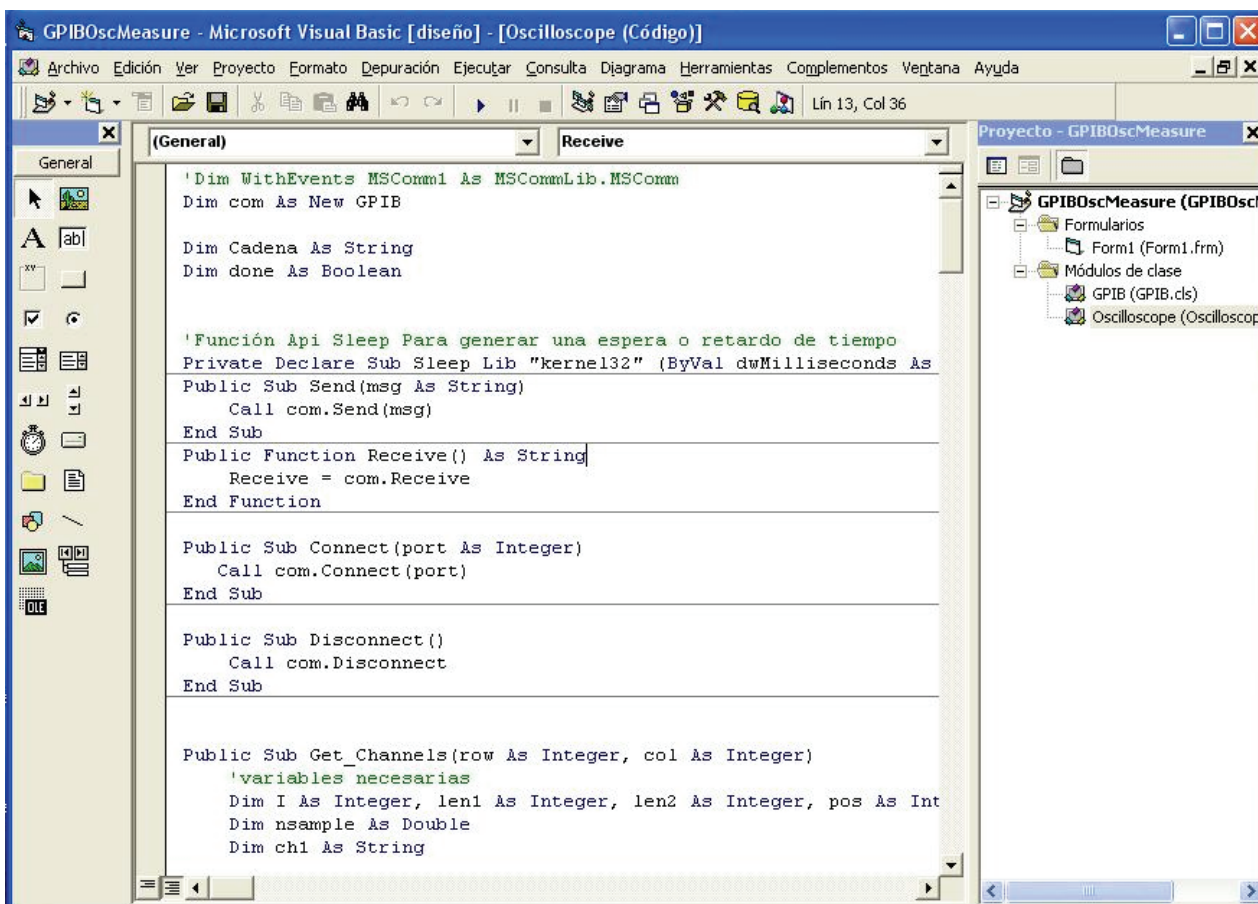


Fig. 3.6 Detalle del código en VB 6 y las clases

CAPÍTULO 4. SEGUNDA APROXIMACIÓN: PC – SINTON – OSCILOSCOPIO – LOCK-IN – GENERADOR DE FUNCIONES.

4.1. Procedimiento de medida

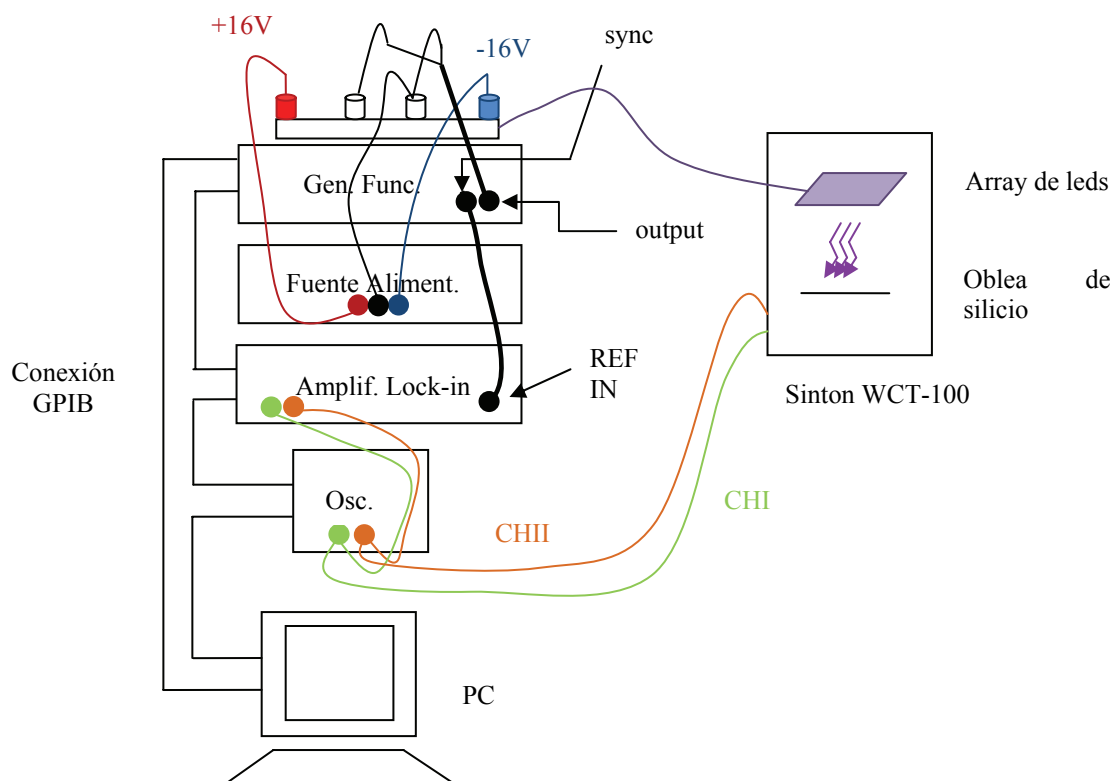


Fig. 4.1 Escenario de medidas para segunda aproximación

Al igual que para la aproximación primera en el apartado 3.1 se detallan los pasos necesarios a seguir para realizar una medida, en este apartado se indican los que deben seguirse para la segunda aproximación.

Al clicar sobre el ejecutable que tiene por nombre GPIBLock-in.exe aparece en pantalla la vista del programa y su plantilla. Primero de todo se debe pulsar el botón Save As para guardar la plantilla con otro nombre (véase Fig. 4.2)

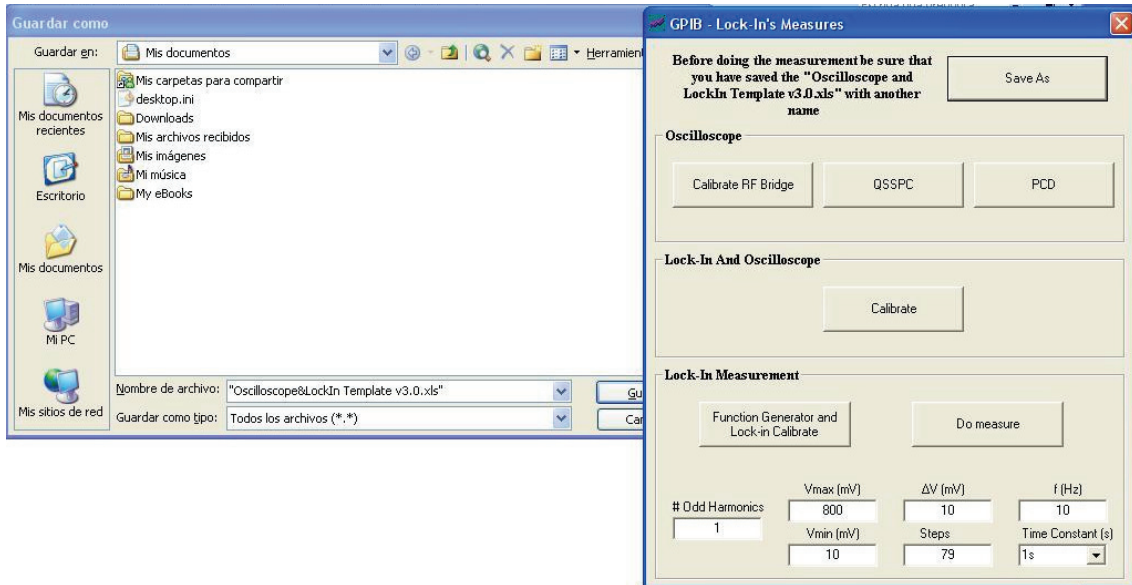


Fig. 4.2 Menú de navegación y vista del programa

Debido a que en la segunda aproximación se ha cambiado la fuente de luz a un array de leds y se ha introducido un nuevo instrumento para la medida, es necesario volver a calibrar el factor óptico (f_{opt}). Para ello se realiza una medida QSSPC (de flash largo) y una medida PCD (de flash corto) pero atacando la nueva fuente de luz, el array de leds. Para ello utilizamos el osciloscopio de forma muy similar a como ocurría en el escenario anterior. Por ello, el primer botón a pulsar debe ser el de *Calibrate RF Bridge*. El osciloscopio se configurará adecuadamente y mediante un mensaje por pantalla se informará de que el osciloscopio está listo y que debe calibrarse el puente de RF a 100 mV (véase Fig. 4.3)

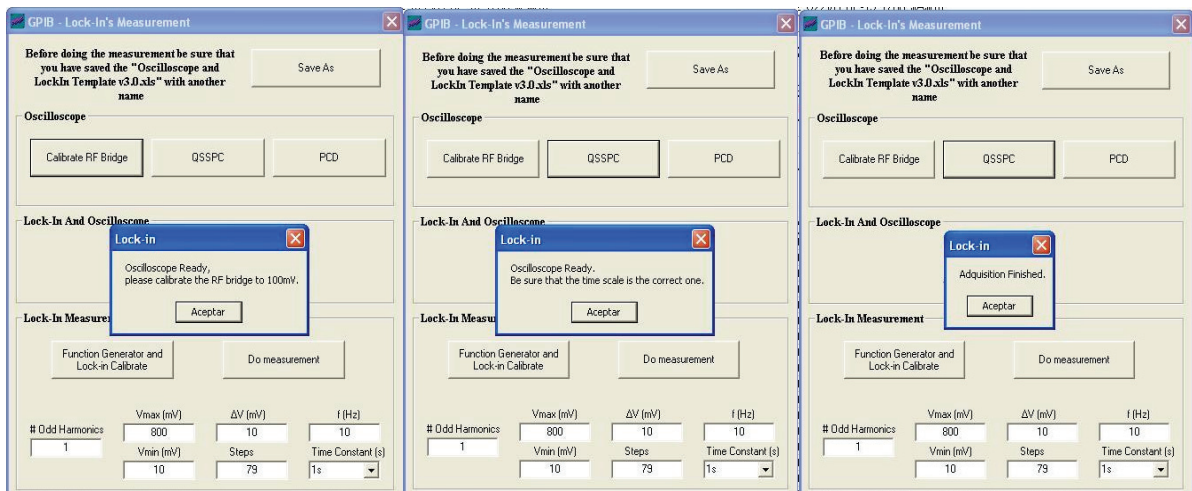


Fig. 4.3 Mensajes por pantalla: *Calibrate RF Bridge*, osciloscopio preparado compruebe escala temporal y final de la medida

Una vez el puente ha sido calibrado entonces se pueden realizar las medidas: primero la de tipo QSSPC, donde la señal de excitación es triangular con el objetivo de obtener una señal similar a la que proporcionaba el flash; y después la PCD, donde se atacan los LED's con un pulso muy corto de luz. Al presionar el botón un mensaje por pantalla informará al usuario de que el osciloscopio está listo y que se debe comprobar que la escala temporal es la correcta (véase Fig. 4.3). Al presionar aceptar se iniciará la medida. Cuando la medida finalice un mensaje por pantalla indicará que la adquisición ha terminado (véase Fig. 4.3).

Una vez calibrado f_{opt} , se procede a encontrar los factores de calibración del lock-in. Lo que se busca obtener es el valor pico a pico de las señales de fotoconductividad e iluminación y el lock-in lo que da es la amplitud de los armónicos a partir de la frecuencia fundamental de la señal de excitación. Como primera idea surgió sumar “todos” los armónicos para así poder llegar a obtener el valor pico a pico de la señal. Pero este método resultó ser demasiado lento. Entonces, como segunda idea surgió coger la amplitud del armónico principal, que será proporcional al valor pico a pico de la señal, y multiplicarlo por un factor de calibración, $f_{lock-in|\sigma}$ y $f_{lock-in|light}$ para la señal de fotoconductividad e iluminación respectivamente (para más detalle véase capítulo 1).

Dichos factores de calibración se encuentran haciendo la misma medida primero con el osciloscopio y después con el lock-in y tomando los primeros datos como referencia. Esta medida se realiza en modo “*Steady state*”, esto quiere decir que la señal de luz está en estado estacionario. En la práctica supone que la luz está encendida durante un tiempo largo en relación al coeficiente τ_{eff} que se quiere medir. Esto se consigue mediante una señal cuadrada de muy baja frecuencia. En la primera medida, a realizar con el osciloscopio, la señal periódica es como si se disparara el flash fotográfico continuamente, y de hecho, permite hacer un promediado directamente en el osciloscopio, reduciendo así el ruido. Una vez capturadas las señales se procesan y se obtiene un único punto $\tau_{eff}(\Delta n_{av})$ relativo al nivel de iluminación, Al haber calibrado anteriormente f_{opt} se considera esta medida como de referencia. A continuación, se recoge la misma información del lock-in, que en realidad, se trata del primer armónico de la señal de fotoconductividad e intensidad de luz. Por tanto, los dos factores de calibración se determinan solapando los datos de τ_{eff} y Δn_{av} con los anteriormente obtenidos mediante el osciloscopio.

El software sigue fielmente el procedimiento detallado. Presionando el botón *Calibrate* se configurarán correctamente el generador de funciones, el lock-in y el osciloscopio. Cuando el usuario considere que el osciloscopio recoge adecuadamente las señales presionará el botón de aceptar y comenzará la adquisición de los datos del osciloscopio. Un mensaje por pantalla indicará que la obtención de datos del osciloscopio ha finalizado (véase Fig. 4.4). Seguidamente la adquisición de los datos del lock-in se inicializará y finalizará cuando el programa lo indique mediante un mensaje por pantalla (véase Fig. 4.4)

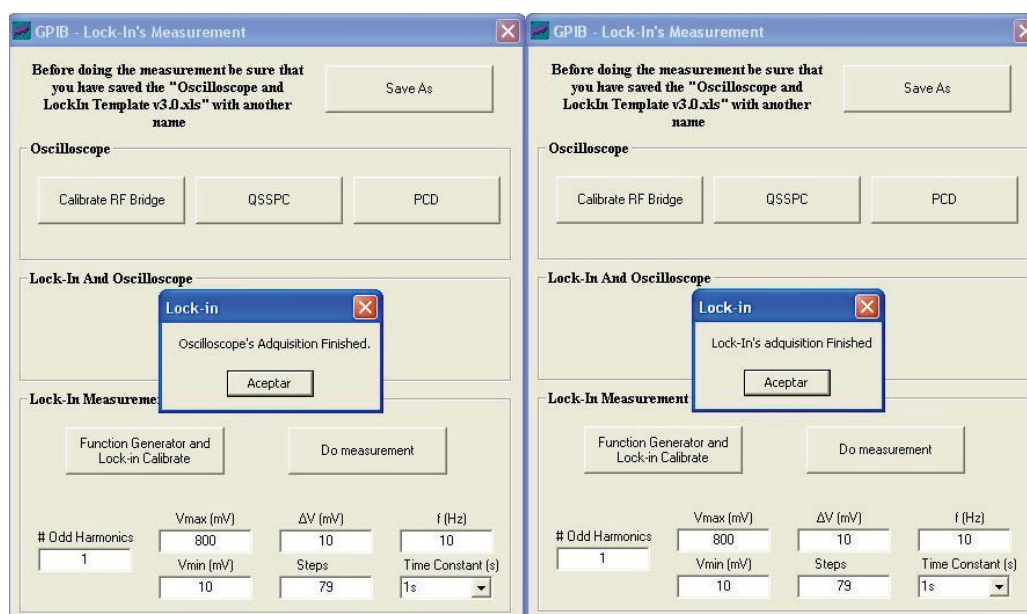


Fig. 4.4 Mensajes por pantalla: adquisición del osciloscopio finalizada y medida del lock-in finalizada

Una vez obtenidos los factores de calibración, estamos listos para realizar la medida propiamente dicha. Para ello, primero se presionará el botón *Function Generator and Lock-in Calibrate*, a fin de que el usuario compruebe que la medida que va a realizar va a ser exitosa. Se configuran ambos instrumentos con el máximo de iluminación y se dejan libres para que el usuario modifique las señales a conveniencia y compruebe el correcto funcionamiento del sistema. Mediante un mensaje por pantalla el programa informará de que tanto el lock-in como el generador están listos (véase Fig. 4.5)

Antes de presionar el botón *Do Measurement* se deben introducir los parámetros ($V_{m\acute{a}x}$, $V_{m\acute{i}n}$, ΔV , f , *Steps*, *Time Constant* y número de armónicos impares que se desea tener en cuenta, *# Odd harmonics*) con los que se quiere realizar la medida. A continuación se describen estos parámetros.

$V_{m\acute{a}x}$ indica, tal y cómo se puede deducir por su nombre, el máximo valor que tomará la señal cuadrada de salida en el generador de funciones para realizar la medida. Así mismo, el $V_{m\acute{i}n}$, será el valor mínimo. Mediante estos parámetros controlaremos el rango de iluminaciones a cubrir durante la medida. Para realizar la medida, se parte del valor $V_{m\acute{a}x}$ especificado en la vista y se decrementa hasta llegar a $V_{m\acute{i}n}$. El voltaje pico a pico de salida del generador de funciones será en realidad dos veces del indicado. El array de leds limitará las tensiones negativas ya que los propios diodos entrarán en corte. El valor máximo debe ser más grande que el valor mínimo. $V_{m\acute{a}x}$ debe ser menor a 5000 mV y además $V_{m\acute{i}n}$ debe ser mayor que 5 mV.

ΔV y *Steps* especifican el incremento en milivoltios entre cada nivel de iluminación y el número de pasos en los que se discretiza el rango de tensiones a barrer. Estos parámetros están relacionados de tal forma que al cambiar uno,

en la vista, el otro valor se recalcula automáticamente. El número de tramos se puede controlar mediante el parámetro *steps* en la vista o bien con el parámetro ΔV . Si incrementamos el número de pasos, se decrementará la anchura de los tramos, ya que se debería repartir el total entre más tramos. Incrementar el número de pasos equivale a capturar un mayor número de muestras en un mismo intervalo. Con esto se obtiene una representación más suave de los resultados, a costa de incrementar el tiempo total necesario para realizar la medida. Por otro lado, un incremento excesivo no mejorará significativamente los resultados. El parámetro ΔV debe ser como mínimo 1mV.

f es la frecuencia de la señal cuadrada de excitación de los LED's. Su valor debe ser tal que su periodo sea suficientemente largo en comparación con los tiempos de vida que se van a medir. Su valor habitual es 10 Hz lo que nos lleva a periodos de 100 ms. Esto nos permitirá medir sin problemas valores de τ_{eff} de hasta 20 ms.

Time constant se refiere al tiempo de integración que utilizará el amplificador de lock-in en la medida. En el caso del escenario de medida propuesto, es posible que exista ruido a la entrada del amplificador. Por tanto, cuanto mayor sea el tiempo de integración del instrumento (Time Constant) tendremos más rechazo al ruido ya que la detección coherente se hará en un ancho de banda más estrecho alrededor de la frecuencia fundamental. Al aumentar su valor el tiempo de la medida se incrementará cuantitativamente.

Por último, el parámetro *#Odd Harmonics*. Al incrementar su valor se incrementa el número de armónicos impares que se utilizan para obtener la medida. Esto proporciona más precisión al resultado final, ya que se obtiene una amplitud de señal más próxima a la real. Sin embargo, el tiempo que se emplea en la rutina de medida aumenta drásticamente ya que cada armónico se considera una medida nueva. Su valor mínimo es 1 y como máximo puede valer 10000.

Presionando el botón *Do Measurement* se iniciará la medida con el lock-in. Al finalizar el programa lo indicará mediante un mensaje por pantalla (véase Fig. 4.5)

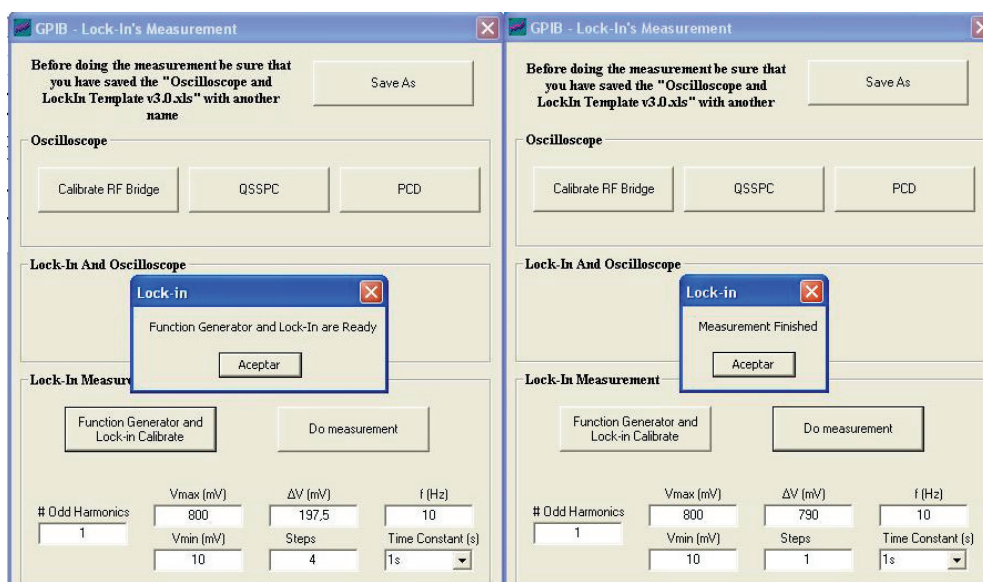


Fig. 4.5 Mensajes por pantalla: Generador de funciones y lock-in preparados, medida finalizada

4.1.1. Medida de ejemplo

En la figura 4.6 se observa el resultado de seguir el procedimiento de medida arriba comentado. La medida QSSPC (símbolos rojos) y la medida PCD (símbolos azules) se utilizan para calibrar el nuevo foft. La calibración del lock-in utilizando un solo nivel de iluminación nos proporciona el rombo negro situado al nivel más alto de inyección. Para obtener unos factores de calibración, $f_{lock-in|\sigma}$ y $f_{lock-in|light}$, lo más exactos posibles se ataca el array de LED's con la máxima señal posible.

Una vez obtenidos los factores de calibración, se procede a la medida propiamente dicha. En primer lugar, con el array de LED's lo más cercano posible a la muestra se barre el máximo rango de tensiones de excitación y se obtiene la primera serie de puntos (rombos verdes) justo antes de la interrupción que se puede observar en la gráfica. Con la idea de conseguir niveles de inyección todavía más bajos, se sitúa el array de LED's lo más lejos posible de la muestra e incluso se gira sobre su propio eje "apuntando" a unos 90° de la muestra. De esta manera se repite la medida obteniéndose la segunda serie que barre desde $3-4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ hasta 10^{11} cm^{-3} . Finalmente, para intentar concatenar las dos series se realizan una serie de medidas sueltas con niveles de iluminación intermedios. Se puede observar como la correcta obtención de los factores de calibración hace que todos los valores de $\tau_{eff}(\Delta n_{av})$ se solapen cuando el nivel de iluminación es alto. A medida que bajamos la intensidad de luz, las medidas QSSPC y PCD se ven limitadas por el ruido propio del acoplo inductivo siendo imposible determinar los valores de τ_{eff} . Con la introducción del lock-in se obtienen valores fiables hasta 10^{11} cm^{-3} mejorando en dos órdenes de magnitud el rango de medida disponible.

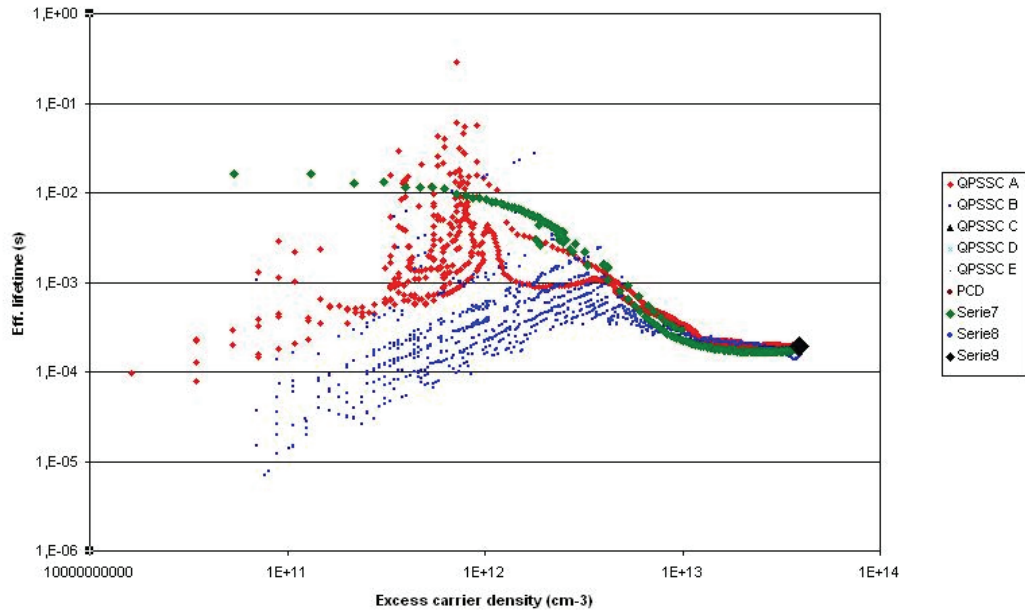


Fig. 4.6 Gráfica de ejemplo de medidas de $\tau_{eff}(\Delta n_{av})$ con con lock-in.

4.2. Diseño del software. Vista para medidas con lock-in

Al igual que la primera vista, ésta, ha sido desarrollada, también, con el entorno de programación Visual Basic 6.0.

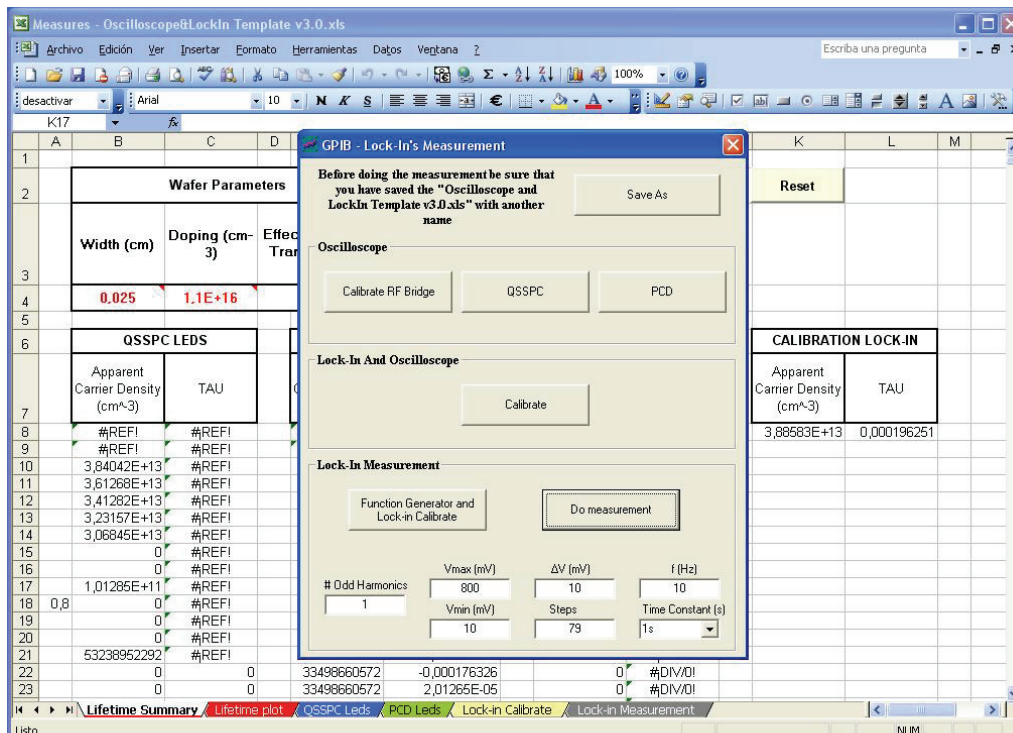


Fig. 4.7 Vista del programa y su plantilla

4.2.1. Funcionamiento

Una vez se ejecuta el programa aparece la vista principal y se abre una plantilla de Excel. La vista está formada por 7 botones, una lista desplegable y 6 cuadros de texto. El contenido de los cuadros de texto puede ser modificado por el usuario y los cuadros de texto de ΔV (mV) y Steps están relacionados de tal forma que al modificarse uno el otro se recalcula automáticamente.

Estos elementos están agrupados por zonas. La primera zona, en la parte superior, es donde se encuentra el botón *Save As*. La segunda zona, “*Oscilloscope*”, contiene los botones que intervienen en la medida que se realiza con el osciloscopio: *Calibrate RF Bridge*, *QSSPC* y *PCD*. En la tercera zona, “*Lock-In And Oscilloscope*” se encuentra el botón *Calibrate* que permite encontrar los parámetros, de calibración del lock-in, necesarios para poder realizar las medidas correctamente y la última zona, “*Lock-In Measurement*”, en la parte inferior, contiene los botones: *Function Generator and Lock-In Calibrate* y *Do Measurement*, la lista desplegable y los 5 cuadros de texto.

4.2.1.1. Botón *Save As*

Como ocurría con la vista para las medidas con la primera aproximación, este botón permite guardar el libro de Excel con otro nombre. Debe guardarse siempre antes de realizar ninguna medida.

4.2.1.2. Botón *Calibrate RF Bridge*

Al clicar este botón, primeramente, el programa desactiva la salida del generador de funciones para permitir calibrar correctamente el puente de RF en el osciloscopio. A continuación se ejecuta una rutina predefinida con la que el osciloscopio se ajusta a los parámetros necesarios para la calibración del puente RF.

4.2.1.3. Botón *QSSPC*

Presionando este botón primeramente se selecciona la hoja “*QSSPC Leds*” del libro de Excel. Seguidamente se inicia una rutina de calibración del generador de funciones y por último se realiza la rutina de medida *QSSPC* del osciloscopio.

4.2.1.4. Botón *PCD*

Este botón realiza prácticamente las mismas operaciones que el anterior, a diferencia de que la hoja seleccionada en el libro de Excel es “*PCD Leds*” y que la rutina de medida es la correspondiente a la medida *PCD*.

4.2.1.5. *Botón Calibrate*

Al clicar sobre este botón se ejecutan las rutinas generales de calibración del generador de funciones, del lock-in y del osciloscopio. Seguidamente el programa selecciona la hoja “Lock-In Calibrate” del libro de Excel, justo antes de comenzar con la adquisición de datos del osciloscopio. Cuando ésta finaliza se realiza la adquisición de los datos del lock-in.

4.2.1.6. *Botón Function Generator and Lock-In Calibrate*

Este botón está relacionado directamente con uno de los cuadros de texto, concretamente con el cuadro de texto que contiene la frecuencia deseada, y con la lista desplegable que contiene los tiempos de integración válidos para el lock-in.

Entonces, al clicar sobre este botón el programa calibra el generador de funciones teniendo en cuenta la frecuencia introducida por el usuario y calibra el lock-in con el tiempo de integración deseado.

4.2.1.7. *Botón Do Measurement*

Si se presiona este botón el programa selecciona la hoja “Lock-in Measurement” de la hoja de Excel y ejecuta la rutina de medida del lock-in.

4.2.2. **Plantilla utilizada**

La plantilla empleada es un libro de Excel llamado *Oscilloscope And Lock-in Template v3.0.xls*. Este libro está formado por 6 hojas: *Lifetime Summary*, *Lifetime Plot*, *QSSPC LEDES*, *PCD Leds*, *Lock-In Calibrate* y *Lock-In Measurement*. Se ha intentado mantener una cierta semejanza con la plantilla de la primera aproximación para facilitar su entendimiento así como su utilización al usuario.

4.2.2.1. *Lifetime Summary*

Como ocurría para el otro escenario, en esta hoja se encuentran las constantes necesarias (tales como el ancho de la oblea de silicio o el Coeficiente de Auger) para realizar los cálculos una vez obtenidos los datos de las medidas. Estas constantes pueden ser modificadas por el usuario y en caso de que eso ocurra se verán modificadas también en el resto de hojas del libro en dónde intervengan.

Como su propio nombre indica, esta hoja, es un recopilatorio del libro de Excel, ya que contiene los datos de *Apparent Carrier Density* y *TAU* de las medidas

QSSPC Leds, PCD Leds y lock-in, así como también el valor que se obtiene del lock-in al clicar sobre el botón *calibrate*.

Existe también un botón de *Reset* que vacía las celdas de *Time*, *Conductivity* y *Light Intensity* de las hojas de medida así como los valores de *Apparent Carrier Density* y *TAU* de cada una de las medidas que se recogen en la hoja *Lifetime Summary*.

4.2.2.2. *Lifetime Plot*

Como ocurría en la plantilla del programa para el osciloscopio, el gráfico contenido en esta hoja muestra los datos recopilados en la hoja *Lifetime Summary*.

Dicho gráfico muestra la *Efficiency Lifetime* en función del *Excess Carrier Density*.

4.2.2.3. *QSSPC Leds*

Hoja igual que la hoja de QSSPC de la plantilla *Oscilloscope Template v3.0.xls* comentada anteriormente a excepción de que se han introducido dos factores de calibración propios del lock-in. Éstos valores se obtienen en la hoja *Lock-In calibrate* de la plantilla.

4.2.2.4. *PCD Leds*

Al igual que ocurre con la hoja de QSSPC, la hoja de la medida PCD es exactamente igual a la de la plantilla explicada con anterioridad y sólo difiere de ésta en que se han añadido dos factores de calibración del lock-in.

4.2.2.5. *Lock-In Calibrate*

Se podría decir que esta es la hoja con mayor importancia de la plantilla, ya que es aquí donde se obtienen los dos factores de calibración para el lock-in, uno para el nivel de inyección y otro para la generación.

La estructura de la hoja es muy similar a las otras hojas de medidas. Primeramente tiene las constantes y debajo de éstas aparecen, por columnas los diferentes cálculos necesarios para poder obtener la *Apparent Carrier Density* y el coeficiente *TAU*. Difiere de las demás hojas de cálculo en que primeramente tiene los datos capturados del osciloscopio y debajo, en la fila 2514, aparecen los datos capturados del lock-in. También porque es la única hoja de medida que incorpora un gráfico de la *Efficiency Lifetime* en función de la *Excess Carrier Density*. Aquí el gráfico permite ajustar de forma bastante útil

los factores de calibración del lock-in que serán necesarios para posteriores cálculos en otras hojas.

4.2.2.6. *Lock-In Measurement*

Se trata de una hoja de medida como cualquier otra explicada hasta el momento. Aparecen las constantes necesarias, los factores de calibración del lock-in, los datos capturados del lock-in mediante el programa y los cálculos necesarios para poder obtener la *Apparent Carrier Density* y el coeficiente *TAU*.

4.3. **Desarrollo del software. Vista para medidas con lock-in**

En el capítulo 2.2. se especificó la arquitectura general por capas. A continuación se presenta la implementación de la misma en clases.

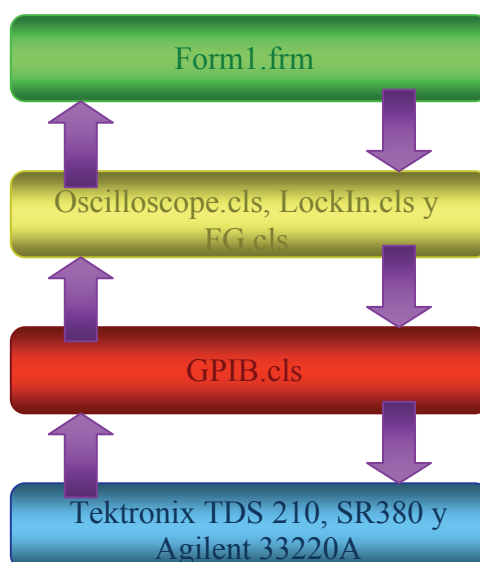


Fig. 4.8 Arquitectura del software

Las clases *Oscilloscope.cls* y *GPIB.cls* tienen el mismo nombre que en la versión *primera aproximación* ya que están basadas en ellas, es decir, contienen las mismas funciones más otras que se han implementado específicamente para esta *segunda aproximación*.

4.3.1. **Form.frm**

Como ocurría con la vista de la primera aproximación, este módulo se encarga de la relación directa con el usuario, captando los eventos de teclado y ratón que produce el mismo. A parte, es el encargado de, por un lado, cargar la

plantilla de Excel, mencionada anteriormente, y de actualizar los datos en ella para poder obtener los resultados de las medidas.

Es quien se encarga de recalculer los valores de los cuadros de texto de ΔV y *Steps* cuando el usuario introduce uno u otro valor.

4.3.2. Oscilloscope.cls

Esta clase sigue conteniendo las funciones necesarias para la calibración y obtención de datos del osciloscopio y está implementada a partir de la clase del mismo nombre de la vista para la primera aproximación, de ahí que aquí se encuentren las funciones ya mencionadas en el apartado 3.3.2. A parte contiene las nuevas funciones: *Calibrate_osc ()*, *QSSPC_Leds ()*, *PCD_Leds()* y *measure_osc ()*.

Sus propios nombres indican qué hace cada función. Siendo sólo relevante comentar *Calibrate_osc ()*, ya que es aquí donde se configuran los parámetros generales de calibración para este escenario (escala temporal 10ms/Div, CH1 2mV/Div, CH2 50mV/Div, trigger normal y fuente de trigger CH2) y *measure_osc ()*. Ésta última obtiene los datos del osciloscopio llamando a la función *Get_Channels ()*, explicada con anterioridad.

4.3.3. LockIn.cls

Es una clase que implementa las funciones relacionadas directamente con el amplificador de lock-in. Contiene la función de calibración del equipo, *Calibrate_LI ()* y otras funciones necesarias para obtener los datos del amplificador remotamente.

A destacar:

- La rutina que permite ajustar correctamente la escala de sensibilidad, *Sensitivity_LI ()*. Para ello comprueba si el valor que debe mostrarse por el display está fuera de escala y si es así modifica la escala hasta que el valor está dentro de la escala.
- La función *harmonic ()* que permite obtener el valor de la suma de los n armónicos impares (donde n es el valor introducido por el usuario en el cuadro de texto para tal fin).

4.3.4. FG.cls

Esta clase contiene las funciones necesarias para la calibración del generador de funciones, tanto la calibración general como la calibración específica para cada tipo de medida.

Tabla 4.1. Parámetros de calibración para el generador de funciones

Tipo de medida	Parámetros de calibración
QSSPC	Zout infinita, función triangular, 1,6Vpp, 0V offset
PCD	Zout infinita, función cuadrada, 1,6Vpp, 0V offset
Calibración General	Zout infinita, función cuadrada, 1,6Vpp, 0V offset

4.3.5. GPIB.cls

Esta clase es la encargada de la comunicación entre el PC, el osciloscopio, el generador de funciones y el lock-in. Por ello, contiene las funciones necesarias para: enviar, *Send ()*, recibir, *Receive ()*, conectar *Connect ()* y desconectar, *Disconnect ()*.

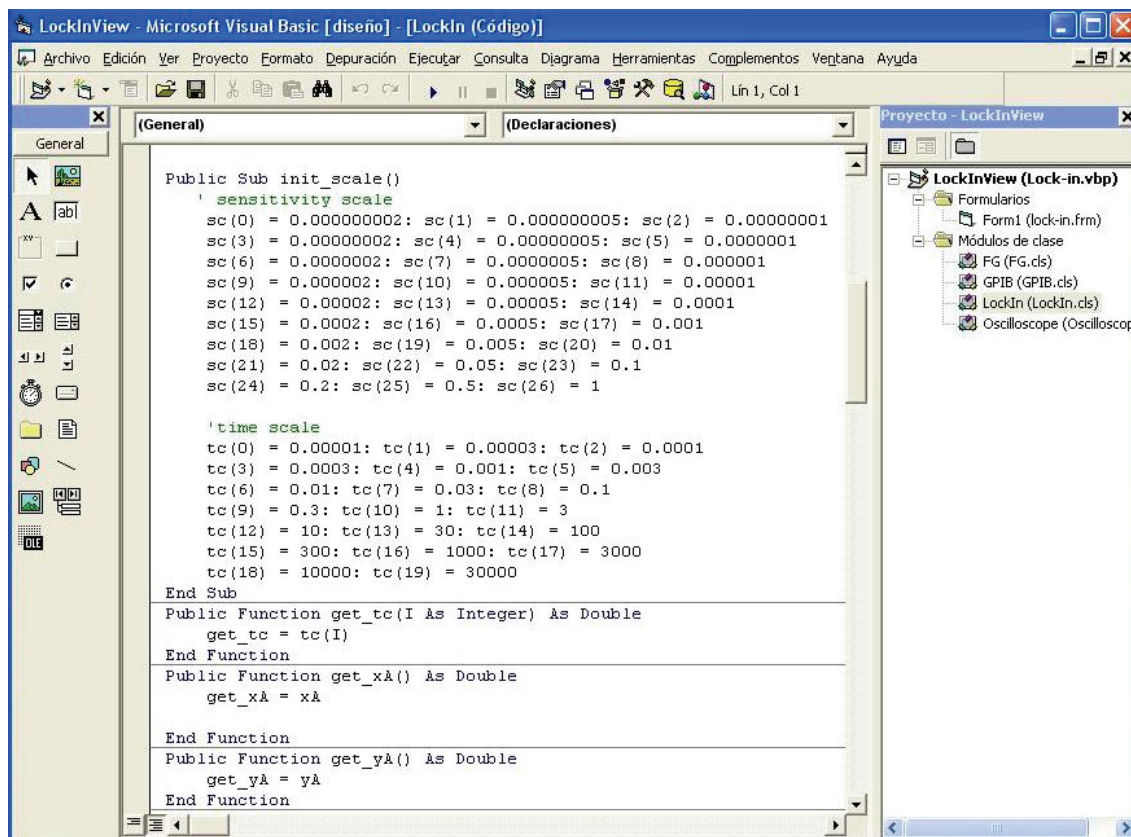


Fig. 4.9 Detalle de las clases y el código en VB 6.0

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.

Los objetivos marcados para este TFC fueron, básicamente, mejorar el método de medida que se utilizaba hasta el momento. Esto incluía el desarrollo de un software específico que permitiera la automatización del proceso de medida, así como una calibración adecuada de los equipos a fin de poder obtener un rango disponible de medida mayor.

El software que se utilizaba permitía realizar medidas con el escenario de la primera aproximación pero no permitía tener agrupados todos los resultados de las diferentes medidas. Por ello, las nuevas plantillas incluyen todos los datos de las diferentes medidas en un solo libro de Excel, facilitando así la gestión e interpretación de los resultados.

Al introducir el amplificador de lock-in se creó un nuevo escenario de medida que permitía obtener medidas menos ruidosas, con unos niveles de inyección más bajos y un rango mayor disponible de medida.

Se puede decir entonces, que los objetivos propuestos inicialmente se han cumplido. El software desarrollado facilita las medidas, ya que ha semiautomatizado el proceso y ha disminuido su duración. Por otro lado, la introducción del lock-in en el escenario de medida ha repercutido notablemente en los resultados de las medidas, siendo éstas más claras y aumentando el rango de medida disponible 2 órdenes de magnitud.

De todas formas, este trabajo deja abierto, para próximas mejoras, el diseño y estudio de un nuevo escenario para las medidas, a fin de poder disminuir todavía más los niveles de inyección y llegar a obtener medidas en rangos más bajos.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Portocarrero Ancasi, Vanessa. Trabajo Final de Carrera “*Mejora de un instrumento de medida del tiempo de vida de los portadores en el silicio cristalino.*”
- [2] H. Nagel, C. Berger, A.G. Aberle, “Generalized analysis of steady-state and quasi-transient measurements of carrier lifetimes in semiconductors.” *J. Appl. Phys.* 86 (1999), p. 6218.
- [3] R. Sinton, A. Cuevas, “Contactless determination of current-voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data”, *Appl. Phys. Lett.* 69, 2510 (1996)
- [4] D.T. Stevenson, R. J. Keyes, “Measurement of short carrier lifetimes in germanium and silicon”, *J. Appl. Phys.* 26, 190 (1955)
- [5] Martín García I., Tesis Doctoral “*Silicon Surface passivation by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposited amorphous silicon carbide films*”
- [6] Sinton WCT 100, “User’s guide”. www.sintonconsulting.com
- [7] Vidal de Llobaterra Perret, Jordi. Máster Tesis. “*Automatització d’un equip de mesura de la resposta espectral.*”
- [8] Tektronix, TDS 200 Series Digital Real Time: “*Oscilloscope Programmer Manual*”.
- [9] Tektronix, TDS 200 Series Digital Real Time: “*Oscilloscope User Manual*”.
- [10] Agilent, 33220A 20MHz Function/Arbitrary Waveform Generator: “*User’s Guide.*”
- [11] Stanford Research Systems, DSP Lock-In Amplifier Model SR830: “*Manual.*”
- [12] <http://standards.ieee.org/>
- [13] www.sintonconsulting.com
- [14] <http://www.xltoday.net/>
- [15] <http://www.teknetelectronics.com>
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Commands_for_Programmable_Instrumentation
- [17] <http://www2.tek.com>

- [18] http://es.wikipedia.org/wiki/Arquitectura_de_tres_niveles
- [19] http://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_modular
- [20] www.tektronix.com
- [21] http://na.tm.agilent.com/pna/help/PNAWebHelp/Programming/Learning_about_GPIB/GP-IB_Fundamentals.htm#soft
- [22] <http://en.wikipedia.org/wiki/ASCII>
- [23] <http://www.programatium.com/>
- [24] <http://www.canalvisualbasic.net/>
- [25] <http://www.microsoft.com/>

ANEXO A. PRIMERA VERSIÓN DEL SOFTWARE PARA PRIMERA APROXIMACIÓN.

En el presente anexo se hará una breve explicación de la primera versión realizada del software para la primera aproximación.

A.1. *Especificaciones puerto COM*

La conexión del puerto RS232 se realiza mediante un conector DB-9 (véase Fig. A.1).

Las principales características de este tipo de puerto son:

- Alcance: Aprox. 15 metros
- Velocidad de comunicación: 20 Kb/s
- Tipo de comunicación: simplex, half dúplex o full dúplex



Fig. A.1 Conector RS232

A.2. *Especificación del software*

Este software se encuentra implementado directamente en la hoja de Excel, en el editor propio de Visual Basic, que se utiliza de plantilla para guardar los datos de las medidas.

Sólo existe una clase, que tiene por nombre RS232, y todas las funciones que utiliza el programa se encuentran ahí implementadas.

A grandes rasgos, las funciones implementadas son:

Get_channels() ya se explicó con anterioridad en el software desarrollado, ya que es exactamente la misma función. Básicamente se encarga de obtener los datos de la señal del osciloscopio.

Calibrar_osc() como ocurría para los otros programas desarrollados, tanto para la primera aproximación como para la segunda, esta función se encarga de ajustar el osciloscopio a los parámetros necesarios.

La función *QSSPC()* es la encargada de preparar el osciloscopio adecuadamente para este tipo de medida y de recoger los datos de la misma. Con la función *PCD ()* el funcionamiento de la rutina es el mismo, sólo que ahora los parámetros de calibración del osciloscopio son diferentes por tratarse de un tipo de medida diferente.

Para mayor información, véase Capítulo 3.

Las funciones *Ssetup()* y *Rsetup()* guardan y restauran, respectivamente, la configuración del osciloscopio de un instante determinado. Sólo es posible guardar una configuración, y ésta se sobrescribirá cada vez. Así como sólo es posible restaurar una configuración.

A.3. Plantilla utilizada

La plantilla que se utilizó para la primera aproximación no es más que la plantilla utilizada para este desarrollo (véase figura A.2), con la excepción que los botones fueron eliminados de las hojas de Excel.

Wafer Parameters		Analysis Parameters			Instrument Parameters				
Width (cm)	Doping (cm-3)	Effective Optical Transmission	Dark conductance signal (V)	Dark light intensity signal (V)	Auger Coef. (Don't change)	Light bias (suns)	Ref cell conversion factor (V/sun)	Calibration (S/V)	
0,025	1.1E+16	0.60	1,0452E-01	-1,4E-03	1,66E-30	0	65,5E-5	anul-lat	
Cálculo Δn									
Time(s)	Conductivity CHI (V)	Light Intensity CHII (V)	Excess Conductivity (V)	Excess light Intensity (V)	Smoothed Excess Conductivity (V)	Smoothed Excess light Intensity (V)	Approx n	n 1st	App De
-0,00064	8096	,00	,70508387	,00136774	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	
-0,001	,08	-0,0016	-,02451613	-,00023226	#,REF!	#,REF!	0	0,0E+00	
-0,000996	,08	-0,0016	-,02451613	-,00023226	,05164839	-,00010323	0	0,0E+00	
-0,000992	,12	-0,0016	,01548387	-,00023226	,04952106	-,00006376	2,66954E+14	2,9E+14	2
-0,000988	,12	-0,0016	,01548387	-,00023226	,04763011	-,00002867	2,56761E+14	2,8E+14	2
-0,000984	,08	-0,0008	-,02451613	,00056774	,0459382	,00000272	0	0,0E+00	
-0,00098	,12	-0,0008	,01548387	,00056774	,04441548	-,00000903	2,39431E+14	2,6E+14	2
-0,000976	,12	-0,0016	,01548387	-,00023226	,04303779	-,00001966	2,32005E+14	2,5E+14	2
-0,000972	,12	-0,0016	,01548387	-,00023226	,03689339	,00003441	1,98882E+14	2,1E+14	2
-0,000968	,08	-0,0016	-,02451613	-,00023226	,03410205	,00005865	0	0,0E+00	
-0,000964	,12	-0,0016	,01548387	-,00023226	,03155344	,00008079	1,70096E+14	1,8E+14	1
-0,00096	,12	-0,0016	,01548387	-,00023226	,03088387	,00006774	1,66486E+14	1,8E+14	1
-0,000956	,08	-0,0016	-,02451613	-,00023226	,02866787	,00008774	0	0,0E+00	
-0,000952	,12	-0,0016	,01548387	-,00023226	-,00051613	,00002374	-2,78231E+12	-3,0E+12	-2
-0,000948	,12	-0,0016	,01548387	-,00023226	,00108387	,00002374	5,84284E+12	6,3E+12	E
-0,000944	,12	-0,0008	,01548387	,00056774	,00268387	,00005574	1,4468E+13	1,6E+13	1
-0,00094	,12	-0,0008	,01548387	,00056774	,00108387	,00005574	5,84284E+12	6,3E+12	E
-0,000936	,12	-0,0008	,01548387	,00056774	-,00051613	,00005574	-2,78231E+12	-3,0E+12	-2
-0,000932	,12	-0,0016	,01548387	-,00023226	-,00051613	,00002374	-2,78231E+12	-3,0E+12	-2

Fig. A.2 Plantilla utilizada para la primera versión del software para la primera aproximación

Tal y como se puede ver en la Fig. A.2 la plantilla tiene 14 hojas, al igual que la plantilla utilizada para la primera aproximación, concretamente las hojas son: *Lifetime Summary*, *Lifetime Plot*, *QSSPC A*, *QSSPC B*, *QSSPC C*, *QSSPC D*, *QSSPC E*, *PCD*, *Oscilloscope Signal A*, *Oscilloscope Signal B*, *Oscilloscope Signal C*, *Oscilloscope Signal D*, *Oscilloscope Signal E* y *Oscilloscope Signal PCD*.

Para más información sobre qué contiene cada hoja véase capítulo 3.2.2.

A.3.1 Botones

Como se ha comentado anteriormente, la única diferencia reside en que la plantilla que inicialmente se diseñó contaba con botones en algunas hojas del libro de Excel (véase Fig. A.2). Estos botones aparecen en todas las hojas referentes a medidas *QSSPC* o *PCD*. La hoja *Lifetime Summary* cuenta con un botón de *Reset* como en las dos plantillas explicadas durante los capítulos 3 y 4.

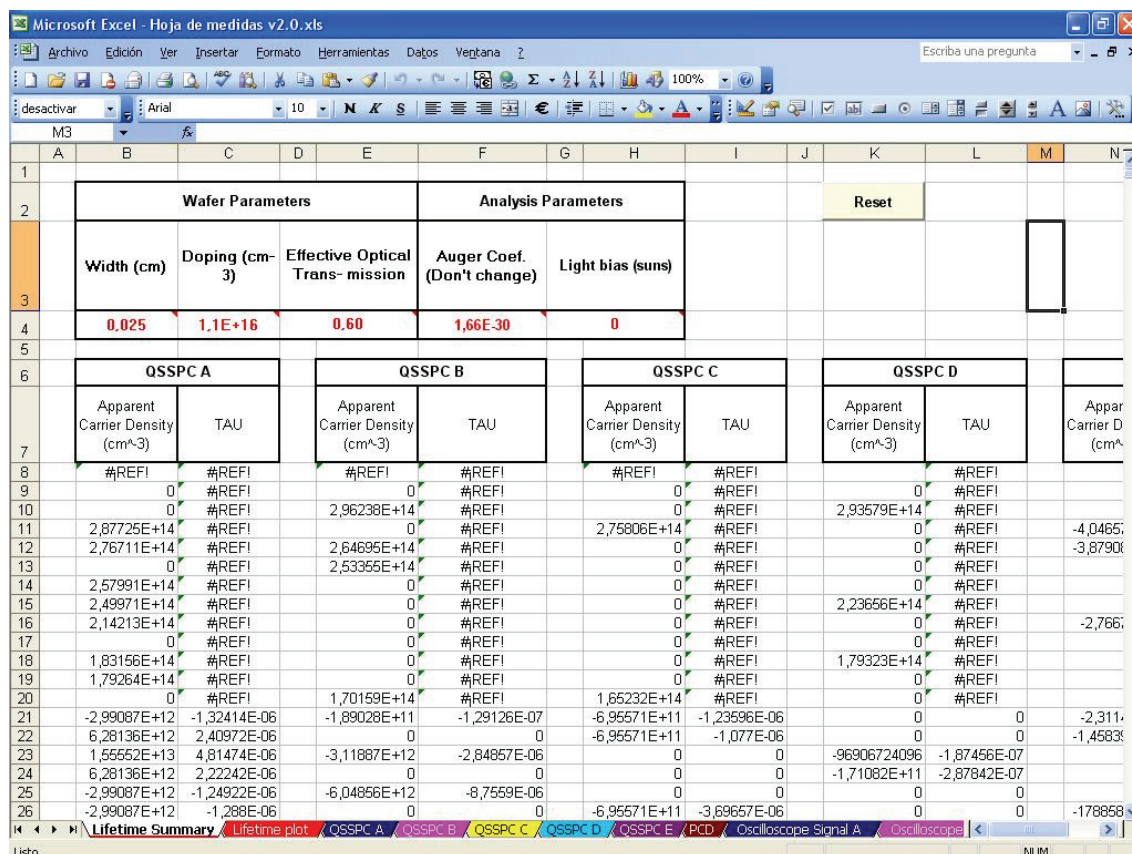


Fig. A.3 Hoja *Lifetime Summary* de la plantilla

Los botones que aparecen en las hojas de medida *QSSPC* y *PCD*,

- **Calibración.** Este botón primero abre la conexión con el osciloscopio, seguidamente lanza la rutina de calibración del osciloscopio y cierra la conexión.
- **Medida QSSPC o Medida PCD.** Al pulsar este botón se abre la comunicación con el osciloscopio, se lanza la medida, de tipo QSSPC o PCD, dependiendo del botón que se clique y por último se cierra la conexión.
- **Save Setup.** Apretando este botón primero se establece la conexión con el osciloscopio, después se guarda la configuración que tiene el instrumento en ese momento y por último se desconecta.
- **Restore Setup.** Si se clicca sobre el botón se abre la conexión con el osciloscopio, se restaura la configuración que tiene guardada en memoria el instrumento y luego se cierra la conexión.

Como ocurre para los dos programas comentados en los capítulos 3 y 4, el usuario es informado mediante mensajes por pantalla de lo que va ocurriendo y de lo que debe ir realizando a fin de poder llevar a cabo las medidas.

A continuación se incluyen algunas capturas de pantalla de este programa.

Time(s)	Conductivity CHI (V)	Light Intensity CHI (V)	Ex Cond	Excess Intensity (V)	Smoothed Excess light Intensity (V)	Approx n	n 1st	App De		
11	-0,0064	0,8096	0,00	0,728	0,00000000	0	0	0,0E+00		
12	-0,0064	0,7584	0,00	-0,00407742	-0,00000000	0	0	0,0E+00		
13	-0,00636	0,8848	-0,000416	0,0856258	-0,00049652	0,05098226	-0,00004445	2,74831E+14	3,0E+14	2
14	-0,00632	0,7584	0,00	-0,00407742	-0,00008052	0,4848698	-0,0000221	0	0,0E+00	
15	-0,00628	0,8848	0,00	0,0856258	-0,00008052	0,4556674	-0,00002535	2,45637E+14	2,6E+14	2
16	-0,00624	0,8848	0,00	0,0856258	-0,00008052	0,4361915	-0,00002825	2,35139E+14	2,5E+14	2
17	-0,0062	0,7584	0,00	-0,00407742	-0,00008052	0,4123432	-0,00005166	0	0,0E+00	
18	-0,00616	0,7584	0,00	-0,00407742	-0,00008052	0,3967953	-0,00007285	0	0,0E+00	
19	-0,00612	0,7584	-0,000416	-0,00407742	-0,00049652	0,3567877	-0,00006071	0	0,0E+00	
20	-0,00608	0,7584	0,00	-0,00407742	-0,00008052	0,3387167	-0,00006161	0	0,0E+00	
21	-0,00604	0,7584	0,00	-0,00407742	-0,00008052	0,3222171	-0,00008052	0	0,0E+00	
22	-0,006	0,7584	0,000416	-0,00407742	0,0033548	0,3070925	-0,00008052	0	0,0E+00	
23	-0,00596	0,8848	0,00	0,0856258	-0,00008052	0,2931778	-0,00008052	1,58044E+14	1,7E+14	1
24	-0,00592	0,8848	0,000832	0,0856258	0,0075148	-0,00003262	-0,00006388	-1,75842E+11	-1,9E+11	-
25	-0,00588	0,7584	0,00	-0,00407742	-0,00008052	-0,00003262	-0,00008052	0	0,0E+00	
26	-0,00584	0,8848	0,000416	0,0856258	0,0033548	-0,00053822	-0,00006388	-2,90139E+12	-3,1E+12	-
27	-0,0058	0,7584	0,00	-0,00407742	-0,00008052	-0,00053822	-0,00006388	0	0,0E+00	

Fig. A.4 Mensaje por pantalla del botón *Calibración*. Informa de que el osciloscopio está preparado y se debe calibrar el puente de RF

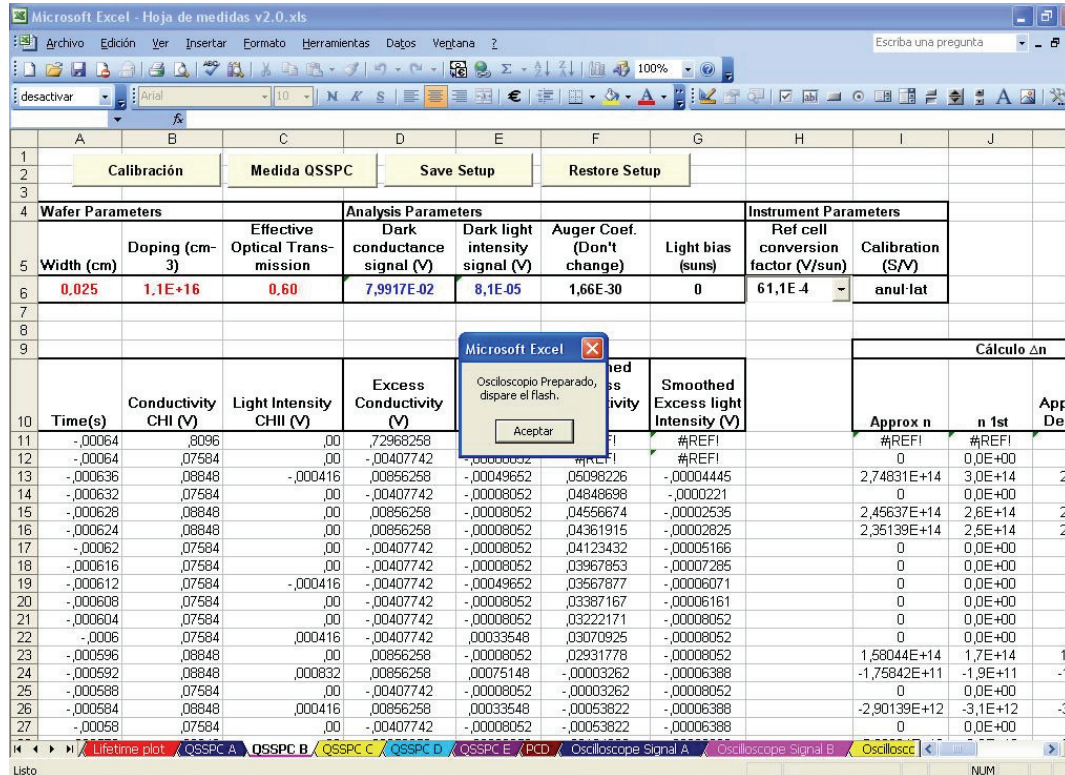


Fig. A.5 Mensaje por pantalla del botón *Medida QSSPC* o *Medida PCD*. Informa de que el osciloscopio está preparado y se debe disparar el flash.

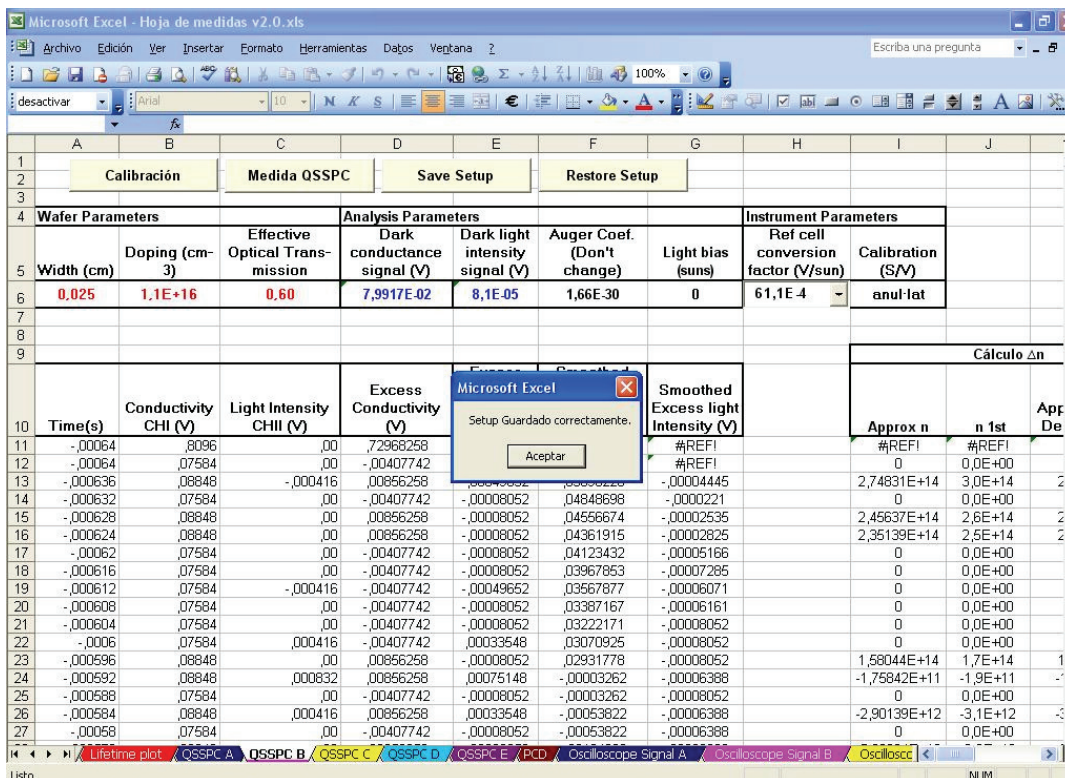


Fig. A.6 Mensaje por pantalla del botón *Save Setup*. Informa de que la configuración del osciloscopio se ha guardado con éxito.

Wafer Parameters		Analysis Parameters			Instrument Parameters			
Width (cm)	Doping (cm ⁻³)	Effective Optical Transmission	Dark conductance signal (V)	Dark light intensity signal (V)	Auger Coef. (Don't change)	Light bias (suns)	Ref cell conversion factor (V/sun)	Calibration (S/V)
0,025	1.1E+16	0.60	7,9917E-02	8,1E-05	1,66E-30	0	61,1E-4	anul-lat

Time(s)	Conductivity CHI (V)	Light Intensity CHII (V)	Excess Conductivity (V)	Smoothed Excess light Intensity (V)	Approx n	n 1st	App De
-0,00064	,8096	,00	,72968258	#REF!	#REF!	#REF!	
-0,00064	,07584	,00	-,00407742	#REF!	0	0,0E+00	
-0,000636	,08848	-,000416	,00856258	-,00004445	2,74831E+14	3,0E+14	2
-0,000632	,07584	,00	-,00407742	-,0000221	0	0,0E+00	
-0,000628	,08848	,00	,00856258	-,00002535	2,45637E+14	2,6E+14	2
-0,000624	,08848	,00	,00856258	-,00002825	2,35139E+14	2,5E+14	2
-0,00062	,07584	,00	-,00407742	-,00005166	0	0,0E+00	
-0,000616	,07584	,00	-,00407742	-,00007285	0	0,0E+00	
-0,000612	,07584	-,000416	-,00407742	-,00006071	0	0,0E+00	
-0,000608	,07584	,00	-,00407742	-,00006161	0	0,0E+00	
-0,000604	,07584	,00	-,00407742	-,00008052	0	0,0E+00	
-0,0006	,07584	,000416	-,00407742	-,00008052	0	0,0E+00	
-0,000596	,08848	,00	,00856258	-,00008052	1,58044E+14	1,7E+14	1
-0,000592	,08848	,000832	,00856258	-,00006388	-1,75842E+11	-1,9E+11	-1
-0,000588	,07584	,00	-,00407742	-,00008052	0	0,0E+00	
-0,000584	,08848	,000416	,00856258	-,00006388	-2,90139E+12	-3,1E+12	-3
-0,00058	,07584	,00	-,00407742	-,00006388	0	0,0E+00	

Fig. A.7 Mensaje por pantalla del botón *Restore Setup*. Informa de que la configuración del osciloscopio se ha restaurado correctamente.

Se decidió trabajar con el puerto GPIB debido a problemas con la velocidad de transferencia entre los equipos al utilizar el puerto COM.