

Sistema de medición del tiempo de vida de portadores minoritarios en celdas solares

ARTURO MORALES ACEVEDO Y GASPAR CASADOS CRUZ

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN

Apartado postal 14-740, 07000 México, D.F., México

Recibido el 3 de diciembre de 1993; aceptado el 3 de marzo de 1994

RESUMEN. Se presenta el desarrollo de un sistema computarizado para la medición del tiempo de vida de los portadores en la base de celdas solares de silicio. El sistema permite utilizar dos técnicas relacionadas para dicha medición: el decaimiento del voltaje de circuito abierto y el decaimiento del voltaje superficial. El equipo está basado en tarjetas de circuitos electrónicos que realizan la función de osciloscopio y de generador de pulsos compatibles con microcomputadoras IBM-PC, además de un circuito de acondicionamiento y sincronía. El sistema es controlado por un programa en lenguaje "C" que permite la utilización óptima del instrumento así construido, además de hacer el análisis de datos mediante técnicas de regresión. Al final, se ilustra su uso con una medición típica realizada en celdas de silicio fabricadas en nuestros laboratorios.

ABSTRACT. We show the development of a computer based system for measuring the minority carrier lifetime in the base of silicon solar cells. The system allows using two different techniques for such kind of measurements: The open circuit voltage decay (OCVD) and the surface voltage decay (SVD). The equipment is based on internal cards for IBM-PC or compatible computers that work as an oscilloscope and as a function generator, in addition to a synchronization and signal conditioning circuit. The system is fully controlled by a "C" language program that optimizes the used of the instrument built in this way, and makes the analysis of the measurement data by curve fitting techniques. We show typical results obtained with silicon solar cells made in our laboratories.

PACS: 72.20.Jv; 72.40.+w

1. INTRODUCCIÓN

El tiempo de vida media de los portadores minoritarios en la base de una celda solar es uno de los parámetros más importantes (al igual que en diodos y transistores de potencia), ya que determinan tanto la corriente de iluminación como el voltaje de circuito abierto de la misma. Por esto se requiere mantenerlo en valores relativamente altos, aun después de realizar los procesos de fabricación de las celdas solares. En gran medida éste es uno de los problemas fundamentales de los tecnólogos y fabricantes, quienes tienen que monitorearlo constantemente para evitar su degradación, sea como consecuencia de esfuerzos térmicos inapropiados, de la introducción de impurezas metálicas, de la formación de precipitados de oxígeno o de otros problemas relacionados con los procesos usualmente utilizados en la realización de las celdas solares.

Por lo tanto, es importante medir el tiempo de vida de los portadores minoritarios, sobre todo en celdas solares terminadas, para determinar la calidad de los procesos, ya que cualquier cambio de este parámetro durante la fabricación de las celdas indicaría algún problema relacionado con los procesos de difusión o de los recocidos metálicos en un ambiente industrial.

Para medir el tiempo de vida media en dispositivos terminados se han usado diversas técnicas, pero entre las más usuales se encuentra la de observar el decaimiento del voltaje en la unión (OCVD) al aplicar pulsos luminosos o eléctricos en el dispositivo [1,2]. A pesar de que se han sugerido otros métodos de medición no estacionarios, este último ha dado resultados confiables y se sigue utilizando ampliamente [3] con pequeñas modificaciones.

Consecuentemente, hemos decidido utilizar un sistema computarizado que nos permita determinar fácil y rápidamente el tiempo de vida en diodos y en celdas solares de unión. Para ello fue necesario resolver diversos problemas, además de la integración de los componentes en el instrumento en sí. Por ejemplo, el costo de un sistema computarizado para este propósito, puede ser relativamente alto si se utilizan instrumentos basados en el *bus IEEE*, pues aunque éstos son bastante flexibles y cumplen con la condición de poderse controlar por medio de una computadora, generalmente se exceden en sus capacidades, ya que incluyen microprocesadores y memoria propios. Por ello, decidimos utilizar tarjetas especializadas que cumplen con algunas funciones como la de generador de señales o la de osciloscopio, pero usando el microprocesador, la memoria y la pantalla de la microcomputadora misma, reduciéndose así el costo del instrumento. Sin embargo, esto trae consigo otro tipo de problemas, entre los cuales podemos citar que el tiempo de respuesta de la tarjeta de osciloscopio que encontramos en el mercado era relativamente grande y, por lo tanto, no se podía observar directamente el decaimiento del voltaje en la celda al desconectar la polarización a través de la celda.

En lo que sigue, se muestra el método de desarrollo del sistema de medición tratando de lograr bajos costos, tanto en los materiales utilizados como en el tiempo requerido para su realización, sin que hubiese por ello una reducción en la confiabilidad de las mediciones hechas con el instrumento. De tal forma que hemos logrado un sistema rápido y fácil de usar, como mostraremos mediante resultados típicos obtenidos con el mismo.

2. DESARROLLO DEL SISTEMA

En condiciones ideales, cuando se retira la inyección de portadores a través de una unión n^+p se observará un transitorio en el voltaje a través de la misma, de acuerdo a la ley de la unión [4]

$$V(t) = AV_T \log \left[\frac{n(t)}{n_0} \right], \quad (1)$$

donde $n(t)$ es la concentración de portadores minoritarios en la base de la celda al tiempo t , y n_0 es la concentración de portadores en equilibrio. V_T es el potencial térmico (kT/q) y A es el factor de idealidad, el cual puede ser diferente de uno, como consecuencia de

efectos de corrientes distribuidas en celdas de área grande, o bien bajo altos niveles de inyección.

Como consecuencia de la recombinación en la base, la concentración de portadores decaerá exponencialmente [5],

$$n(t) = [n(0) - n_0] \exp\left(\frac{-t}{\tau_n}\right) + n_0, \quad (2)$$

por lo que para tiempos no muy grandes ($t \sim \tau_n$) el decaimiento del voltaje tendrá aproximadamente la forma

$$V(t) \approx V(0) - AV_T \left(\frac{t}{\tau_n}\right), \quad (3)$$

donde τ_n es el tiempo de vida de los portadores en la base, porque la recombinación en el emisor ocurre en tiempos muy pequeños comparada con la recombinación en la base. La Ec. (3) establece la relación básica que utilizaremos para determinar el tiempo de vida.

Cabe hacer notar que el tiempo de vida medido por este medio es en realidad un tiempo de vida efectivo que dependerá de la estructura del dispositivo, ya que la recombinación superficial y en los contactos también afectará el decaimiento del voltaje. Sin embargo, en la mayoría de los casos es más adecuado contar con el valor de este parámetro efectivo, y no el real, pues aquél será el que determine la recombinación total en el dispositivo y, por lo tanto, el que limite la eficiencia en una celda solar.

Otra cuestión importante es que la capacitancia asociada con la región de carga espacial, así como la recombinación en la misma, causan un comportamiento diferente al descrito por la Ec. (3). Esto ocurrirá cuando los valores de corriente y voltaje sean pequeños; por lo que no podrá medirse el tiempo de vida en celdas de área grande, ya que éstas podrían no alcanzar voltajes de unión mayores de 0.4 V, como se requiere para que dichos fenómenos no impidan nuestra medición.

Para evitar los problemas relacionados con la capacitancia y con las corrientes de recombinación en la región de carga del espacio, se ha sugerido medir transitorios de voltaje entre dos contactos superficiales puesto que, de acuerdo a Vishnoi *et al.* [6], el decaimiento del voltaje superficial tiene la siguiente dependencia con el tiempo:

$$V_{\text{sup}} = V_0 \exp(-t/\tau_n), \quad (4)$$

donde V_0 depende de factores geométricos, tales como el ancho y la separación entre los contactos.

En ambos casos, la medición se reduce a observar el decaimiento del voltaje de circuito abierto o del voltaje superficial y en ajustar la curva a una recta o a una exponencial de acuerdo a las Ecs. (3) o (4), respectivamente. En lo que sigue describiremos el sistema y nos referiremos sólo a mediciones de circuito abierto, ya que la medición del voltaje superficial requiere de la preparación de muestras especiales con contactos superficiales. Sin embargo, nuestro sistema contempla ambos tipos de medición porque, en principio,

DISPOSICION DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

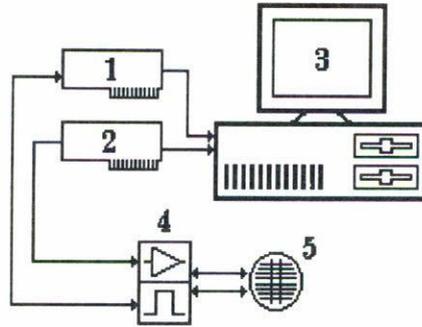


FIGURA 1. Diagrama de bloques y distribución de los componentes que conforman el sistema de medición de tiempo de vida de los portadores de carga en celdas o uniones de silicio. (1) Tarjeta de osciloscopio digital. (2) Tarjeta de generador de señales. (3) Computadora personal. (4) Circuito de sincronía y de acondicionamiento de señal. (5) Celda o diodo bajo medición.

este método sería más confiable y no requiere de la determinación adicional del factor de idealidad como se necesita en el caso del voltaje de circuito abierto.

El diagrama de bloques del sistema de medición se muestra en la Fig. 1. Las tarjetas de instrumentación son marca Keithley METRABYTE. En el caso de la tarjeta de osciloscopio se usó la PCIP-SCOPE [7] que tiene doble canal y ancho de banda de 10 MHz, con disparo interno y externo, impedancia de entrada de 1 Megaohm, exactitud de 1% (8 bits de resolución). La tarjeta de generación de señales fue la PCIP-SST [8] que genera ondas cuadradas, triangulares y senoidales con frecuencia en el intervalo de 1 Hz hasta 5 MHz (exactitud de $\pm 3\%$), 20 Vpp (sin exceder +10 V o -10 V, y resolución de 4.8 mV) e impedancia de salida de 50 Ohms.

El circuito mostrado en la Fig. 2 se diseñó para cumplir con dos funciones principales. La primera fue la de evitar efectos de carga que pueden causar errores en la medición, para lo cual se introdujeron amplificadores de aislamiento con ganancia unitaria (*buffers*), y la segunda fue la de lograr sincronía entre el inicio de la medición y la conmutación de la corriente en el diodo.

El problema de sincronía ocurre porque el voltaje de la celda empieza a decaer en cuanto la polarización es eliminada; pero en osciloscopios digitales se requiere de cierto tiempo para iniciar la conversión A/D, que en nuestro caso es hasta de 150 ns. Es decir, el disparo de inicio de conversión en el osciloscopio debe ocurrir antes de que se elimine la polarización estacionaria en la celda para que podamos "ver" todo el decaimiento del voltaje.

Esto se logró mediante un multivibrador (*Flip-Flop*) monoestable que a su vez es disparado con el flanco de subida de la onda cuadrada aplicada a la celda para establecer el estado estacionario. El pulso generado por el multivibrador puede ajustarse para que

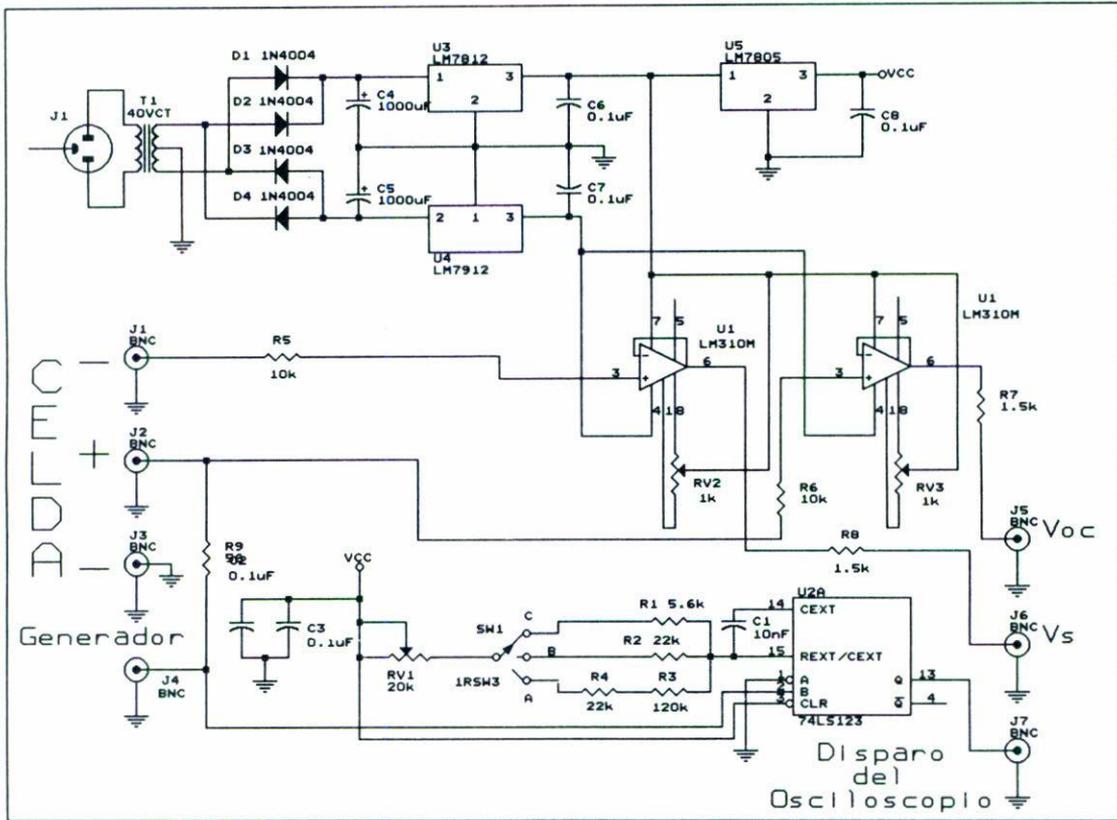


FIGURA 2. Diagrama eléctrico del circuito de sincronía y de acondicionamiento de señal.

tenga un ancho menor que la onda del generador mismo. Así, el inicio de conversión en el osciloscopio podrá ocurrir antes de que el voltaje en la celda empiece su decaimiento. El circuito cuenta con una resistencia variable (RV1) que permite el ajuste mencionado. Nótese que el ancho de los pulsos debe ser tal que se alcance un estado estacionario antes de que se induzca el decaimiento de voltaje en la celda. El intervalo que hemos seleccionado está entre 0.1 ms y 1 ms para celdas típicas. Esto también se ajusta mediante la selección de un resistor en serie con RV1 en el circuito de sincronía, y mediante la selección simultánea (a través del programa de control) de dicho tiempo en el generador.

El área máxima de las celdas a medir no debe exceder de 5 cm² porque, de otra manera, se corre el riesgo de que no se alcance la polarización suficiente en el diodo, como para evitar los problemas asociados con la capacitancia y la corriente de recombinación en la región de carga espacial. Puesto que el disparo del osciloscopio requirió de una resistencia del orden de 18 ohms en serie con el generador (cuya resistencia interna es de 50 ohms), y la amplitud máxima de la polarización fue de 10 volts, la corriente máxima esperada a través del diodo es del orden de 140 mA, por lo que celdas de mayor área podrían no alcanzar voltajes arriba de 0.4 V; lo cual podría evitar ver la parte lineal del decaimiento de voltaje. Esto es válido en diodos o celdas típicos de silicio; en general, entre menor sea

el área del dispositivo a medir será mejor porque podrá observarse un mayor intervalo del decaimiento de voltaje.

El *hardware* se controló mediante un programa en lenguaje "C", el cual además se realizó pensando en que fuera de fácil interacción para el usuario. Así, por ejemplo, presenta un menú al inicio, incluyendo la posibilidad de solicitar ayuda para recordar los controles del osciloscopio y del generador de funciones. La rutina fundamental es la que controla la medición a realizar, para lo cual aparece, en el monitor de la computadora, la pantalla del osciloscopio con la forma de onda medida.

Para poder observar el decaimiento es necesario hacer los ajustes necesarios, tanto en el osciloscopio como en el generador de funciones y en el circuito de disparo. Para ello el programa permite que con las teclas de cursor se puedan cambiar los intervalos de operación de ambos instrumentos, mientras que el circuito se ajusta manualmente hasta que se logre observar la forma de onda esperada. Una vez que se tiene la forma de onda, con las mismas teclas de cursor (conjuntamente con las teclas Ctrl y Alt) se pueden mover dos cursores sobre la pantalla para seleccionar el intervalo en que el decaimiento del voltaje es lineal. La imagen de la onda y los cursores se mantienen sobre la pantalla hasta que se oprima la tecla Esc regresando al menú principal.

El programa permite dos opciones de ajuste de datos como se mencionó antes, dependiendo del tipo de medición que se esté realizando, sea de voltaje de circuito abierto o de voltaje superficial. En ambos casos el ajuste se hace mediante la técnica de mínimos cuadrados en el intervalo seleccionado por el usuario. Se calcula además el factor de correlación (R^2), para determinar qué tan bueno ha sido el ajuste. Los resultados son presentados simultáneamente con la gráfica de las curvas medida y ajustada. En caso de que no sea suficientemente bueno, se podrá repetir la medición hasta lograr el mejor ajuste posible. Esto reduce parcialmente algunos errores que podrían cometerse con sistemas basados en instrumentos analógicos. De esta manera podrá tenerse un valor confiable del tiempo de vida media. A continuación se muestra la medición realizada sobre una celda típica fabricada en nuestros laboratorios.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Se realizaron mediciones sobre diodos y celdas solares de silicio, pudiéndose, en todos los casos, obtener valores esperados de acuerdo a los parámetros de los substratos utilizados en su fabricación. Como ejemplo, ilustraremos el proceso de medición que se realizó en una celda solar de área relativamente grande (3 a 4 cm²).

Mediante mediciones de corriente en función del voltaje bajo iluminación, se determinó que la celda tenía un factor de idealidad $A = 2$, y luego la celda se sometió al proceso de medición del tiempo de vida, a partir del decaimiento del voltaje de circuito abierto. En la Fig. 3 se muestra la forma de onda obtenida, con los cursores colocados en la parte lineal de la curva. En la Fig. 4 se ilustra el resultado del ajuste, conjuntamente con el valor obtenido para la pendiente de la recta. Tomando en cuenta que la temperatura de medición fue la ambiente, se determinó que el tiempo de vida era de 2.8 microsegundos, aproximadamente. En realidad, para obtener este valor se hicieron diez mediciones similares y se promedió el valor correspondiente.

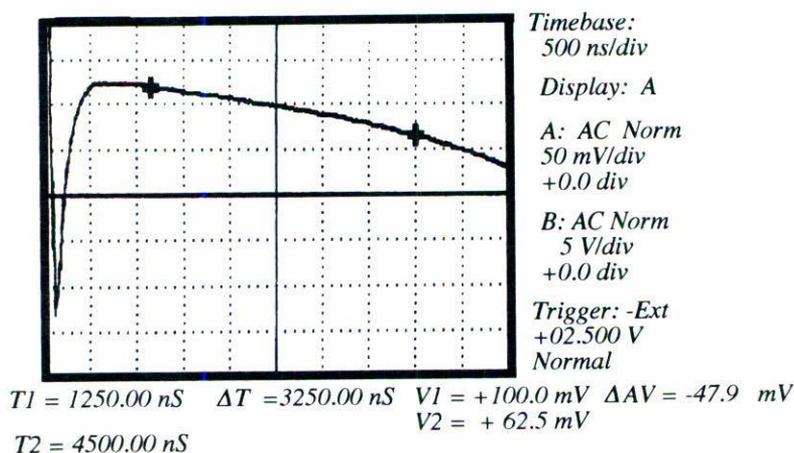
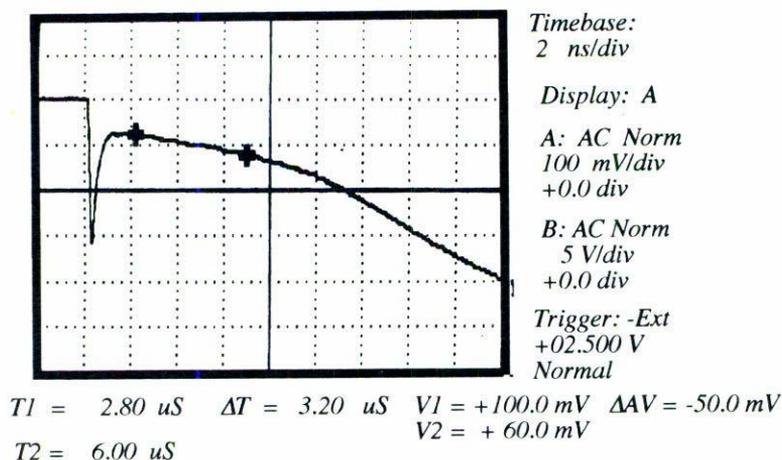


FIGURA 3. Forma de onda típica (OCVD) en la pantalla del monitor. (a) Aquí se ha seleccionado la región lineal. (b) La misma forma de onda que en (a), pero con una escala de tiempo apropiada para lograr mayor resolución.

Este resultado es compatible con los parámetros de la base (resistividad y tipo) utilizada en la celda, aunque muestra cierto grado de degradación como consecuencia de los procesos seguidos para su fabricación. La información obtenida de esta forma será importante para poder mejorar y monitorear nuestros procesos en el futuro.

Respecto al posible error en la medición es necesario observar que, en un ambiente de producción, lo importante es monitorear el orden de magnitud del tiempo de vida (más que el valor absoluto), lo cual podemos determinar confiablemente con este método. Si

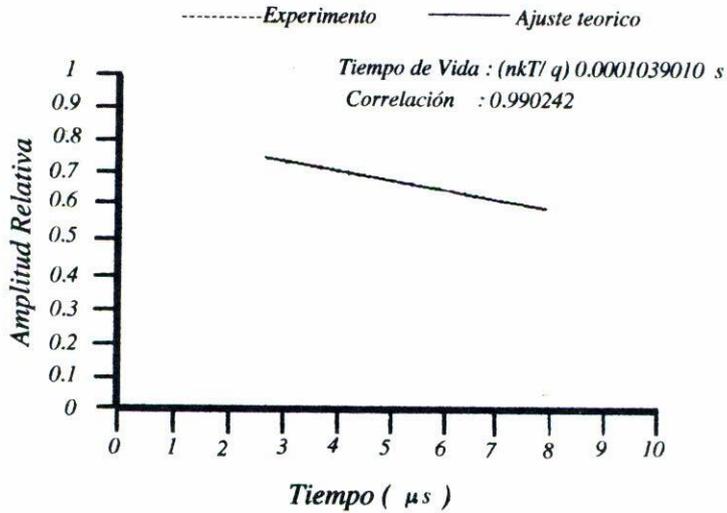


FIGURA 4. Pantalla que muestra el resultado de la medición. Se muestran tanto los puntos experimentales como la curva ajustada, incluyendo el factor de correlación. Se indica además el valor del tiempo de vida, excepto por un múltiplo (AV_T) que depende de la temperatura y del factor de idealidad del diodo.

se requiriera medir el tiempo de vida en forma absoluta y exacta, se tendría que tener el cuidado de asegurar que el transporte de carga está limitado por difusión en la base, en el intervalo de corriente que fluye durante el intervalo de decaimiento, y reducir al máximo posibles efectos de los parámetros distribuidos sobre el factor de idealidad. Alternativamente, para hacer mediciones más confiables en un laboratorio de investigación, se podrá utilizar el método de decaimiento del voltaje superficial aunque con tarjetas que permitan lograr una mayor resolución (convertidores analógico/digital y digital/analógico de 16 bits). En nuestro caso, los resultados obtenidos son bastante satisfactorios.

4. CONCLUSIONES

Se ha mostrado un sistema computarizado que de manera eficiente y rápida permite medir el tiempo de vida media en la base de celdas solares de unión. El sistema evita tener que medir formas de onda de manera imprecisa a través de osciloscopios analógicos. Todos los instrumentos son digitales e integrados en uno solo a través de un programa de computadora en lenguaje "C", que permite no sólo obtener la curva de decaimiento del voltaje superficial o de circuito abierto, sino también hacer el análisis de los datos para ajustar las curvas por mínimos cuadrados, reduciéndose así algunos errores aleatorios en las mediciones realizadas. El instrumento ha mostrado ser muy sencillo en su uso cotidiano, tal y como se deseaba.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido parcialmente financiado mediante el apoyo recibido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del proyecto 211085-5-1167A.

REFERENCIAS

1. S.R. Lederhandler and L.J. Giacoletto, *Proc. IRE* **43** (1955) 477.
2. S.R. Dhariwal and N.K. Vasu, *Solid State Electron.* **24** (1981) 915.
3. S.R. Dhariwal and R.C. Sharma, *Solid State Electron.* **36** (1993) 421.
4. J.P. McKelvey, *Solid State and Semiconductor Physics*, New York, Harper & Row (1966).
5. J.E. Mahan and D.L. Barnes, *Solid State Electron.* **24** (1981) 989.
6. A. Vishnoi, R. Gopal, r. Dwivedi, and S.K. Srivastava, *Solid State Electron.* **32** (1989) 17.
7. *User Guide for the PCIP-SCOPE Programmable Oscilloscope*, Taunton, MA: Keithley Metrabyte Corporation (1991).
8. *User Guide for the PCIP-SST Function Generator*, Taunton, MA; Keithley Metrabyte Corporation (1988).