

EXPERIENCIA EN LA UTILIZACION DEL PROGRAMA PC1D EN LA ENSEÑANZA DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRONICOS

Antonio Martí y José María Ruiz

Instituto de Energía Solar – Departamento de Electrónica Física
ETSIT de la Universidad Politécnica de Madrid
Avd. de la Complutense 20 – 28040 Madrid

Tel.: 915441060, FAX 915446341, email: amarti@etsit.upm.es

RESUMEN

En este trabajo se describe el programa PC1D, desarrollado en la Universidad de Nueva Gales del Sur y orientado hacia la modelización en una dimensión del funcionamiento interno de los dispositivos electrónicos. Describimos también nuestra experiencia en su utilización como herramienta docente en nuestra Universidad. PC1D no necesita de grandes recursos para su empleo, es barato, potente, amigable, robusto, rápido, una excelente herramienta de investigación y, bajo ciertas limitaciones, puede distribuirse a los alumnos para que trabajen de forma personal.

1. INTRODUCCION

El contexto docente en el que se enmarca este trabajo es el de la enseñanza del funcionamiento interno de los dispositivos electrónicos. Esta docencia se realiza dentro de la asignatura “Dispositivos Electrónicos” que se imparte en el quinto curso de las enseñanzas que conducen a la obtención del título de Ingeniero de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, Plan de Estudios 1964M2.

Desde nuestro punto de vista, PC1D [1] cubre una laguna importante en el desarrollo de la asignatura como es la de que los alumnos puedan visualizar, a escala, magnitudes importantes para la comprensión del funcionamiento de los *dispositivos* como son la concentración de portadores, el potencial interno, la posición de los pseudoniveles de Fermi, los diagramas de bandas, las características corriente-tensión, etc. Un valor añadido a este respecto es que, al proporcionar el programa resultados *exactos*, el alumno puede contrastar el valor de las aproximaciones analíticas que habitualmente se enseñan en clase.

2. DESCRIPCION DEL PROGRAMA PC1D

PC1D, en la versión 5.0, ha sido realizado por la Universidad de Nueva Gales del Sur con la que Ud. deberá ponerse en contacto [2] si desea una copia del programa. Su precio es de 100 US\$, se distribuye en un disquete y da derecho a actualización permanente y a realizar un número ilimitado de copias siempre que vayan a utilizarse en el contexto del grupo de trabajo que ha solicitado la copia original. Funciona bajo Windows 95 y, a pesar de su potencia, consume una cantidad mínima de recursos (puede funcionar en un equipo 486 equipado con una disquetera para discos de 1.44 Mb). Una versión anterior, la 3.0, fue desarrollada en los Laboratorios Sandia [3], funciona bajo DOS, y "solicitada con la adecuada cortesía", es gratuita y también puede distribuirse en el ámbito local de trabajo. Esta última versión, aunque menos atractiva y menos optimizada que la versión de Windows 95, puede cumplir con los mismos objetivos docentes.

PC1D resuelve numéricamente las ecuaciones básicas de un semiconductor [4] (la ecuación de Poisson, la ecuación de continuidad de electrones y la ecuación de continuidad de huecos) para obtener la distribución de potencial electrostático, de electrones y de huecos en el dispositivo. A partir de estas magnitudes el programa puede calcular y presentar gráficamente otras magnitudes derivadas como el campo eléctrico, la distribución de corriente eléctrica de electrones y huecos, la posición de los pseudoniveles de Fermi, etc. El espectro de dispositivos que se pueden simular es muy amplio: diodos, transistores, heterouniones... sobre los que se pueden especificar, por ejemplo, distintos perfiles de impurezas, de condiciones de contorno y de operación, además de modificar los parámetros del material con el que está fabricado el dispositivo. PC1D admite también la posibilidad de iluminar externamente los dispositivos por lo que se pueden simular células solares y fotodetectores. De hecho, PC1D se desarrolló inicialmente para el estudio y la mejora de la eficiencia de las células solares. Es un programa reconocido internacionalmente también como herramienta de investigación.

Para ilustrar su funcionamiento y potencia hemos elegido la simulación del funcionamiento de un diodo de silicio, de 100 μm de espesor (50 μm el ánodo y 50 μm el cátodo), con un dopaje en el lado n de 10^{17} cm^{-3} y un dopaje en el lado p de $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, polarizado en directa con una tensión de 0,3 V. El ánodo, que está situado a la derecha de la unión, está caracterizado por una velocidad de recombinación superficial de 10^7 cm^{-3} y el cátodo, situado a la izquierda, por una velocidad de recombinación superficial nula. Después de hacer funcionar el programa, de entre los muchos parámetros que nos permite representar, hemos elegido para ilustrar aquí a modo de ejemplo, el diagrama de bandas del dispositivo, la distribución de carga, el campo eléctrico y la densidad de corriente eléctrica de electrones y huecos (figura 1). Las ilustraciones que se representan están obtenidas directamente del programa PC1D, con los colores cambiados artificialmente por nosotros para mejorar su presentación en blanco y negro en esta publicación y con algunos rótulos añadidos en castellano para facilitar su interpretación.

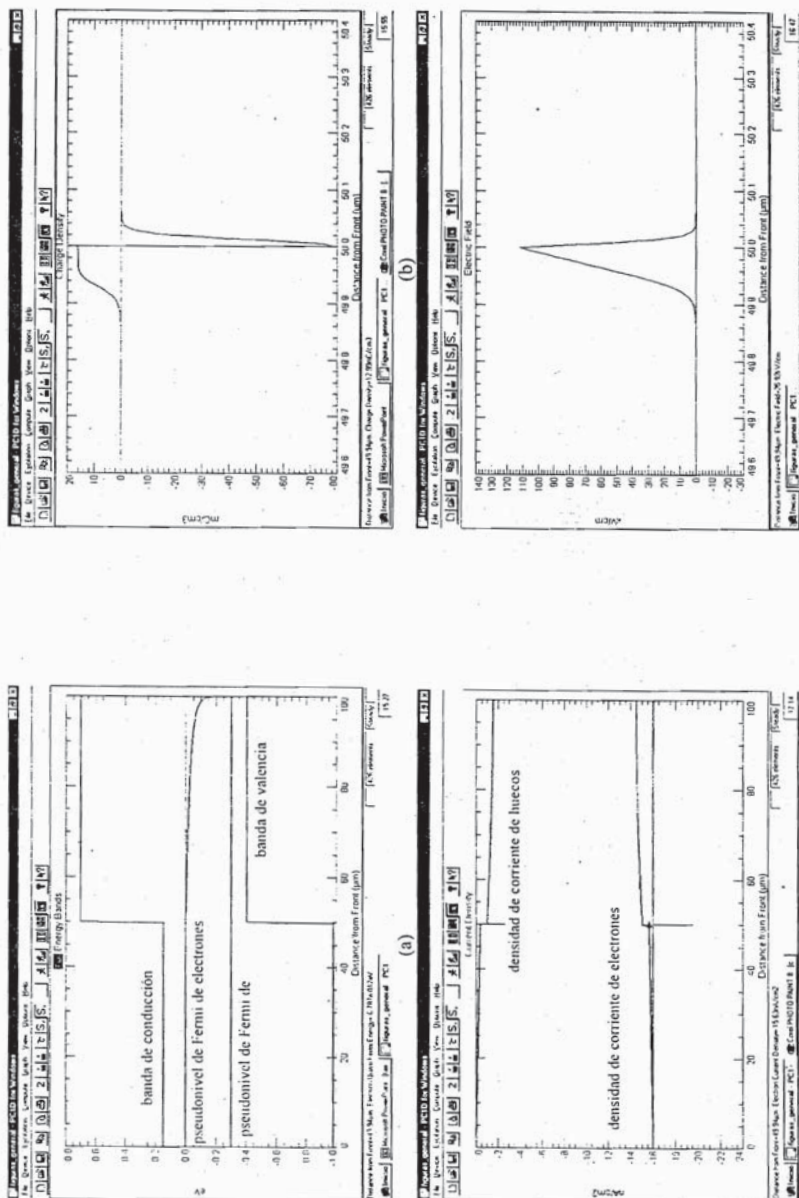


Figura 1. Ejemplos de distintas salidas gráficas del programa PC1D que ilustran, en relación a una unión *p-n* asimétrica polarizada en directa con +0,3 V, (a) su diagrama de bandas, (b) la densidad de carga en la vecindad de la zona de carga de espacio, (c) las corrientes de electrones y huecos y (d) el campo eléctrico.

3. EXPERIENCIA DOCENTE

La asignatura en la que se ha enmarcado la utilización del programa, *Dispositivos Electrónicos*, se imparte en quinto curso de la ETSIT de la Universidad Politécnica de Madrid. El número de alumnos que ha asistido a clase ha sido, durante el último trienio en el que se ha venido utilizando el programa, de entre 10 y 20. Se trata, pues, de un grupo pequeño lo que facilita la utilización del programa en un aula informática. La asignatura tiene carácter cuatrimestral y se evalúa mediante la realización de un examen escrito cuya calificación, opcionalmente, se puede mejorar mediante la realización de un trabajo que puede involucrar la utilización del PC1D. El contenido de la asignatura trata de los fundamentos físicos y de los principios de funcionamiento de los dispositivos semiconductores. En primer lugar se desarrolla con cierta amplitud la teoría de la unión *pn* [5] y de la estructura MOS [6,7] y esta teoría sirve de base para el estudio de los fenómenos físicos que resultan útiles o que limitan el funcionamiento de dichos dispositivos. A continuación se estudian dos grandes grupos de dispositivos: los bipolares (diodos de unión *pn*, transistor bipolar [8]) y los unipolares (contactos metal-semiconductor, transistores de efecto de campo) [9,10]. Se completa el programa de la asignatura con el estudio de los conceptos básicos relacionados con las heteroestructuras.

El programa PC1D se distribuye a los alumnos los primeros días de clase. Hay un deseo implícito por nuestra parte en que la fascinación que los alumnos sienten por este tipo de programas incida también positivamente en su motivación por estudiar la asignatura. Si los alumnos optan por la versión 5.0, para cumplir con los acuerdos de la licencia de uso, deberán devolver la copia del programa al terminar el curso. Transcurrido un mes aproximadamente, cuando ya se ha impartido un cierto contenido básico de la asignatura, se realizan dos sesiones de trabajo (cuatro horas) en un aula informática durante las cuales el alumno, guiado por el profesor, debe resolver una serie de ejercicios. El objetivo es que, al final de las sesiones, el alumno sea capaz de utilizar el programa PC1D para ayudarse en el estudio ilustrando por su cuenta los conceptos que vayan apareciendo en el transcurso de la asignatura.

Una de las dificultades asociadas a la utilización de programas informáticos como complemento a una asignatura es que, al menos en nuestro caso, debemos renunciar a la posibilidad de examinar al alumno sobre sus contenidos en igualdad de condiciones ya que, por ejemplo, no todos los alumnos disponen de ordenador personal propio. No obstante, para fomentar en parte la utilización del programa, es por lo que a los alumnos se les ofrece la posibilidad de realizar un trabajo con el que mejorar la nota de su examen final.

4. VALORACION DE LA UTILIZACION DEL PROGRAMA

Con el fin de obtener una idea de la valoración por parte de los alumnos sobre el programa y su utilización en el contexto de la asignatura se realizó una encuesta cuyas preguntas se recogen en la tabla I y cuyos resultados se muestran gráficamente en la figura 2. Por supuesto, desde un punto de vista sociológico debe ponerse cuidado en la interpretación de los resultados ya que, como se ha mencionado, el número de alumnos que asiste a clase es pequeño (también lo es el número de matriculados) y, por lo tanto, también el número de alumnos que ha participado en la encuesta (13 alumnos).

Tabla I. Preguntas que constituyen la encuesta realizada a los alumnos sobre la utilización del programa PC1D y cuyos resultados se muestran en la figura 2.

P1. ¿Le ha ayudado esta clase a comprender mejor los conceptos de la asignatura?
P2. ¿Cree Ud. que esta clase es necesaria para comprender el manejo del PC1D?
P3. ¿Utiliza Ud. el PC1D en su casa para estudiar la asignatura?
P4. ¿Le ha servido en algún momento el PC1D para comprender mejor la asignatura?
P5. ¿Cree Ud. necesaria otra clase en el Aula Informática?
P6. ¿Piensa Ud. que este tipo de clases, al no ser su contenido susceptible de ser examinado, permiten ir más despacio en el temario y, en consecuencia, que le benefician al ser la carga lectiva menor?
P7. ¿Piensa Ud. "piratear" el programa, es decir, mantener una copia una vez que el programa de la asignatura haya terminado?
P8. El hecho de que se le haya dado un programa de este tipo al comienzo del curso...¿ha hecho que Ud. se encuentre más motivado para el estudio de la asignatura?
P9. Cree Ud. que si no tuviese que estudiar para preparar el examen de la asignatura, ¿utilizaría más el PC1D en su casa?
P10. Cómo cree Ud. que aprende o aprendería más, ¿con el esfuerzo de preparar el examen (señale SI) o si se le liberase del examen y se le propusiese algún trabajo relacionado con el PC1D (señale NO)?
P11. ¿Cursa Ud. esta especialidad por vocación?
P12. ¿Qué preferiría que se le enseñase en la asignatura: una descripción detallada del funcionamiento de los dispositivos electrónicos más importantes (señale SI) o una descripción enciclopedista de los dispositivos existentes con sus aplicaciones correspondientes (señale NO)?

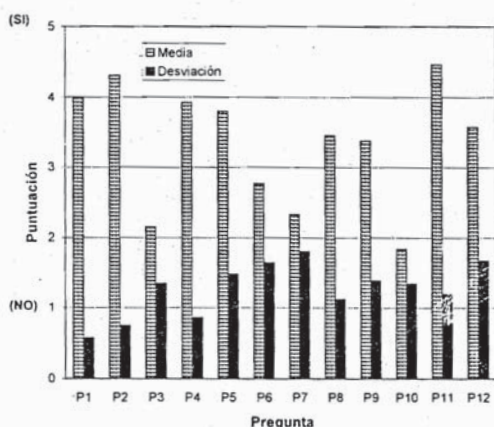


Figura 2. Resumen de los resultados de una encuesta realizada a los alumnos que utilizan el PC1D con preguntas relativas a la utilización del mismo y a la asignatura en la que se enmarca.

Nuestra interpretación de las respuestas dadas por los alumnos, relacionadas con la utilización del programa, es la siguiente:

- El hecho de *regalar* a los alumnos una herramienta de este tipo, tiene cierta incidencia a la hora de mejorar la motivación del alumno de cara a la asignatura aunque debemos confesar que es menor de la esperada personalmente en un principio (pregunta P8).

- Globalmente pensamos que cuatro horas es un tiempo suficiente para que el alumno de esta asignatura aprecie el potencial del programa e incluso aprenda a utilizarlo con soltura (preguntas P1, P2 y P4).
- A pesar de reconocer la utilidad del programa, la mayoría de los estudiantes admite aprender más con las clases de tipo convencional (tiza y pizarra) sobre las que después se les va a examinar (pregunta P10). En el momento de realizar la encuesta, la mayoría de los alumnos reconoce haber utilizado poco el programa de forma individual (pregunta P3). Tenemos la impresión de que los alumnos pueden temer hacer un uso mayor del PC1D porque puede quitarles tiempo para estudiar la asignatura.

4. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. P.A.Basore las facilidades dadas para utilizar el programa PC1D, a la Unión Europea por su financiación parcial de este trabajo mediante el proyecto ASPIRE (JOR-CT95-0048) y al Ministerio de Educación y Cultura por las Acciones Integradas HB9723 y HI9761.

5. REFERENCIAS

- [1] D.A.Clugston y P.A.Basore, "PC1D Version 5: 32-Bit Solar Cell Modeling on Personal Computers", *Proc. 26th Photovoltaic Specialist Conference*, pp. 207-210, 1997.
- [2] La dirección del Departamento que distribuye el programa PC1D es: Centre for Photovoltaic Devices and Systems, UNSW, Sydney 2052, Australia. Vía email se puede contactar en pc1d@unsw.edu.au y vía internet en <http://www.pv.unsw.edu.au>.
- [3] Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185-0752, USA.
- [4] R.F.Pierret, "Fundamentos de Semiconductores", Ed. Addison Wesley Iberoam., 1994.
- [5] G.W.Neudeck, "El diodo PN de Unión", Ed. Addison Wesley Iberoam., 1993.
- [6] R.F.Pierret, "Dispositivos de Efecto de Campo", Ed. Addison Wesley Iberoam., 1994.
- [7] D.K.Schroder, "Advanced MOS Devices", Ed. Addison Wesley, 1987.
- [8] G.W.Neudeck, "El Transistor Bipolar de Unión", Ed. Addison Wesley Iberoam., 1994.
- [9] S.M.Sze, "Physics of the Semiconductor Devices", Ed. John Wiley & Sons, 1981.
- [10] R.S.Muller y T. I.Camins, "Device Electronics for Integrated Circuits", John Wiley & Sons, 1977.