

TRANSPORTE AMBIPOLAR EN SEMICONDUCTORES: DESARROLLO Y UTILIZACIÓN DE UN SIMULADOR DEL EXPERIMENTO DE HAYNES Y SHOCKLEY

JORDI SUÑE

*Departament d'Enginyeria Electrònica. Universitat Autònoma de Barcelona
08193-Bellaterra. España.*

En este trabajo se presenta una herramienta de simulación en un entorno de tipo visual cuyo objetivo es el análisis del experimento de Haynes y Shockley para la mejor comprensión del transporte ambipolar en semiconductores. Se trata de una herramienta concebida como instrumento docente, que se desarrolló durante un proyecto final de carrera de Ingeniería Informática. Además de explicar las características principales del simulador y sus distintos modos de funcionamiento, presentaremos nuestra experiencia de uso durante dos cursos académicos con alumnos de cuarto curso de Física.

1. Introducción

En esta comunicación se presenta una experiencia relacionada con la enseñanza de los conceptos fundamentales del transporte electrónico en dispositivos semiconductores. Con el objetivo de transmitir a los alumnos los conceptos básicos del transporte ambipolar en semiconductores, se ha desarrollado una herramienta software que permite simular el experimento clásico de Haynes y Shockley para la medida de la movilidad. Este simulador fue desarrollado en entorno windows por un alumno de Ingeniería Informática como proyecto final de carrera [1] y ha sido utilizado durante dos cursos en las prácticas de la asignatura Electrónica Física. En nuestra comunicación, no sólo explicaremos las características generales del simulador y discutiremos las distintas posibilidades que nos ofrece, sino que también expondremos las conclusiones obtenidas a partir de su utilización por alumnos de último año de Licenciatura.

Recordemos brevemente, para empezar, en qué consiste el experimento clásico de Haynes y Shockley. Es un experimento que permite la medida de la movilidad de los portadores minoritarios en un semiconductor. Para ello, se polariza un muestra mediante una batería de barrido para crear un campo eléctrico longitudinal que será el que arrastre a los portadores minoritarios. Dos contactos de tipo rectificador separados una distancia x_0 se utilizan para inyectar y recoger posteriormente un pulso de portadores minoritarios. La medida mediante un osciloscopio del tiempo de vuelo de los portadores permite calcular la movilidad.

2. Características del simulador y modos de utilización

Presentamos una herramienta software para simular y visualizar el experimento de Haynes y Shockley. Se trata de una herramienta concebida como ayuda para la docencia y hemos pretendido hacer un diseño ergonómico que conjuntara una gran flexibilidad con una extrema facilidad de uso. Desde buen principio, nuestra idea ha sido conseguir que el alumno usuario pudiera familiarizarse rápidamente con el programa de simulación, que tuviera la percepción

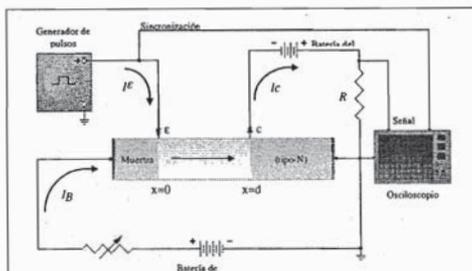


Fig. 1: Esquema del experimento de Haynes y Shockley tal como aparece en el simulador.

de estar involucrado en una tarea de carácter lúdico, y evitar en lo posible cualquier problema de adaptación. Para conseguirlo, se han utilizado las ventajas que ofrecen los entornos de tipo visual. En las figuras 1-4 se muestran algunos ejemplos del entorno de simulación: esquema del experimento, osciloscopio, entrada de datos del semiconductor y gráfica de análisis.

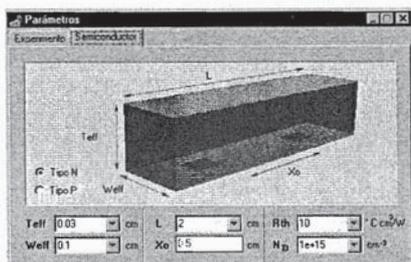


Fig. 2: Entrada de datos. Tiene dos hojas. Una dedicada a los datos del semiconductor (dopa ge, longitud de la muestra, etc.) y otra a los del experimento (tensión de barrido, resistencia de lectura).



Fig. 3: Pantalla del osciloscopio virtual. Mediante los botones pueden ajustarse las escalas temporal y vertical.

El simulador se ha planteado para ser utilizado en dos modos diferentes:

a) *Simulación del experimento como sustitución de la realización efectiva del mismo en el laboratorio.* Aquí el alumno realizará un experimento tal como haría en el laboratorio real pero controlando y recibiendo datos en instrumentos virtuales. En este modo de simulación sólo deberán utilizarse los módulos de entrada de datos para definir los parámetros de la muestra de semiconductor y ajustar los parámetros del experimento para obtener una señal medible en el osciloscopio. El alumno podrá ver sobre la pantalla del osciloscopio un pulso animado que emula lo que obtendría en un experimento real.

b) *Análisis detallado de la fiabilidad de las medidas de movilidad.* Se trata de un módulo de análisis pensado como ayuda al diseño del experimento. Este modo de funcionamiento es muy interesante porque permite una comprensión detallada de las limitaciones que tiene el experimento. En este sentido, nos hemos centrado en los errores introducidos por la difusión y recombinación de los portadores y por el calentamiento de la muestra por la corriente de barrido. En el experimento de Haynes y Shockley se asume que el tiempo de vuelo entre

ambas puntas puede obtenerse directamente de la posición temporal del máximo del pulso en el osciloscopio. Esta hipótesis implica una cierta aproximación, ya que supone que el perfil del pulso a tiempo fijo es idéntico al perfil a posición fija. Cuanto mayores sean los efectos de difusión, mayores serán los errores cometidos por este concepto. Hay que señalar que estos errores pueden reducirse mediante un aumento del campo eléctrico de barrido, es decir, haciendo que la corriente de arrastre domine claramente sobre la corriente de difusión. No obstante, al aumentar el campo eléctrico, aumenta también la corriente de mayoritarios en el semiconductor y por consiguiente se calienta la muestra por efecto Joule. De esta forma, como la movilidad es muy sensible a la temperatura, el valor que obtengamos de este parámetro se verá afectado considerablemente. Tanto es así, que los experimentos reales deben realizarse mediante polarización impulsada para evitar el calentamiento. En el simulador se ha introducido este efecto mediante un único parámetro, la resistencia térmica de la muestra. Se trata de un simple modelo lineal que es análogo a los que se utilizan para el diseño térmico de sistemas electrónicos. Esencialmente, se impone que la potencia disipada por la corriente de mayoritarios debe ser evacuada a través de la resistencia térmica, dando

lugar de este modo a un incremento lineal de la diferencia de temperaturas entre el ambiente y la muestra. El módulo de análisis del simulador permite visualizar estos errores en función del campo eléctrico, con lo que es posible realizar un trabajo de optimización de los parámetros del experimento. Asimismo, puede comprobarse gráficamente si se está trabajando en condiciones de baja inyección, tal como se supone en la propia definición de transporte ambipolar.

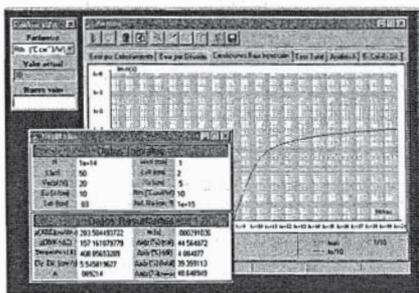


Fig. 4: Zona de trabajo del simulador en la que se muestran tres ventanas diferentes. Una de ellas corresponde al análisis de las condiciones de baja inyección, y otra a la presentación de resultados de un experimento.

3. Experiencia docente de utilización del simulador.

Con el simulador ya disponible, propusimos un trabajo a varios grupos de dos alumnos durante los cursos académicos 97/98 y 98/99. El objetivo general del trabajo propuesto fue: *Diseñar un experimento para medir la movilidad de los portadores minoritarios en un semiconductor mediante el experimento de Haynes y Shockley, y sin un conocimiento exacto del tiempo de recombinación de los minoritarios.* En este trabajo, no se pretendía medir la movilidad de un semiconductor cualquiera, sino escoger y diseñar la estructura de test que permitiera realizar un experimento de Haynes y Shockley con garantías de éxito. Los alumnos deberían seleccionar los parámetros del semiconductor (dimensiones, dopaje, etc.) y también diseñar el montaje experimental con los instrumentos disponibles en el laboratorio de Electrónica General. Se pedía además de manera explícita el estudiar los posibles errores introducidos por la difusión y la recombinación de los portadores, los efectos de calentamiento debidos a la batería de barrido, y la influencia del dopaje. Se les pedía determinar y justificar en qué condiciones es posible un diseño "robusto" y establecer algún

criterio para evaluar la fiabilidad de los datos experimentales de movilidad a partir de los resultados de un experimento real.

Los detalles del experimento deberfan extraerlos tanto de libros básicos de dispositivos como de la referencias originales [2-4]. Se les suministró además la bibliografía relevante con los modelos de movilidad implementados en el simulador [5] y también algún trabajo reciente relacionado con los tiempos de recombinación de los portadores [6].

La valoración de la experiencia es áltamente satisfactoria. Los alumnos dedican bastante tiempo al trabajo con un talante creativo e interesado. Los resultados que obtienen son razonables en cuanto al trabajo en sí mismo y muy positivos en cuanto a su comprensión integral del transporte ambipolar. En el primer curso de aplicación nos dimos cuenta de dos pequeños problemas didácticos que intentamos solucionar en el curso siguiente. El primer problema fue el abuso que hicieron los estudiantes de las posibilidades de simular y obtener en poco tiempo grandes cantidades de datos. El segundo curso, la utilización del simulador se planteó como una herramienta adicional y no en sustitución del tratamiento convencional del problema ("con lápiz y papel"), pidiendo explícitamente un tratamiento analfítico aproximado del experimento y su posterior comprobación mediante el simulador. En segundo lugar, nos encontramos con memorias excesivamente extensas. Este punto nos preocupó por dos motivos, por el excesivo tiempo de realización, que conlleva problemas de interferencias con otras asignaturas, y por la falta de un esfuerzo de síntesis. El segundo curso optamos por imponer un límite máximo de quince páginas. Los resultados obtenidos durante este segundo curso fueron altamente satisfactorios y continuamos repitiendo la experiencia.

4. Conclusiones

Se ha presentado una herramienta de simulación ergonómica que permite profundizar en los conceptos del transporte ambipolar mediante el estudio en profundidad del experimento clásico de Haynes y Shockley. La experiencia de utilización del simulador con alumnos de la asignatura Electrónica Física de varios cursos ha sido muy satisfactoria. La utilización de entornos virtuales de este tipo puede suplir en cierta medida las carencias endémicas de material que sufren los laboratorios docentes.

Referencias

- [1] D. Alvarez Ortíz, Proyecto Final de Carrera de Ingeniería Informática. UAB 1997.
- [2] J.R. Haynes y W. Shockley Phys. Rev. **25**, 835-843 (1951).
- [3] J.P. McKelvey, J. Appl. Phys. **27**, 341-343 (1956).
- [4] Transistor Teachers Summer School, Phys. Rev. **88**, 1368-1369 (1952).
- [5] N. D. Arora, J. R. Hauser y D. J. Roulston, IEEE Trans. Elect. Dev. **29**, 292-295 (1982).
- [6] D.N. Schröder, IEEE Trans. Elect. Dev. **44**, 160-170 (1997).