
ESQUEMAS CONCEPTUALES DE ESTUDIANTES DE SECUNDARIA SOBRE EL COMPORTAMIENTO FÍSICO DE SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS⁺*

Luis Rosado

Departamento de Inteligencia Artificial
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
Madrid – España

Antonio García-Carmona
Colegio Luisa de Marillac
Sevilla – España

Resumen

En este trabajo, exponemos la necesidad de emprender investigaciones didácticas orientadas a integrar las nociones básicas de Física de Semiconductores en el curriculum de Física y Química de Secundaria. Ello tiene como objetivo servir de complemento y apoyo al estudio de la Electrónica en el Área de Tecnología. En este sentido, presentamos los resultados de un estudio realizado con estudiantes de Secundaria (14-15 años), acerca de sus concepciones y dificultades de aprendizaje sobre el comportamiento eléctrico de semiconductores extrínsecos.

Palabras-clave: *Dificultades de aprendizaje, Física de semiconductores, electrónica, semiconductor extrínseco, educación secundaria.*

Abstract

In this paper, we expose the didactic need to undertake investigations oriented to integrate the basic notions of Physics of Semiconductor in the High School Physics and Chemistry curriculum. The objective of this approach is to serve as complement and support to study of the

⁺ High School students' conceptual schemes on the physical behavior of extrinsic semiconductors

^{*} *Recebido: fevereiro de 2005.
Aceito: agosto de 2005.*

Electronics in the Technology Area. In this sense, we present the results of an investigation carried out with High School students (14-15 years), about their conceptions and learning difficulties on the electrical behaviour of extrinsic semiconductors.

Keywords: *Learning difficulties, Physical of semiconductors, electronics, extrinsic semiconductor, High School.*

I. Introducción y planteamiento del problema

El eminente desarrollo de la Electrónica en los últimos años, y su incidencia en los diferentes ámbitos de la sociedad (JOLLY, 1998), han planteado la necesidad de proporcionar a los jóvenes de hoy una formación básica en esta disciplina (ROSADO, 1995). Actualmente, el estudio de la Electrónica Básica se inicia en la etapa 14-16 años, dentro del curriculum de Tecnología. Su tratamiento didáctico está basado en la ‘aproximación por bloques’ de sistemas electrónicos básicos, sin que se incida en los aspectos científicos que explican su comportamiento. Sin embargo, desde el punto de vista epistemológico, una formación básica y adecuada en Electrónica también debe venir dada por el estudio del comportamiento físico de los materiales empleados en la fabricación de componentes electrónicos (SUMMER, 1985), que no son otros que los materiales semiconductores (ROBLES et al, 1993; PIERRET, 1994; ALCALDE, 1999).

Como consecuencia de esto, y aprovechando el carácter abierto y flexible del curriculum de Física y Química de la Educación Secundaria Obligatoria (ESO), hemos emprendido un proyecto didáctico cuyo propósito es integrar las nociones básicas de Física de Semiconductores en esta etapa, como apoyo y complemento al estudio de la Electrónica en el Área de Tecnología. Para ello, hemos elaborado diversos materiales didácticos (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2002a, 2002b, 2003), donde adaptamos esos contenidos al nivel cognitivo del alumnado de esta etapa educativa.

Si bien, para progresar en el proceso de enseñanza/aprendizaje de la Física de Semiconductores en la ESO, es preciso revisar continuamente los contenidos y tratar de descubrir las ideas y modos de razonamientos de los estudiantes (VIENNOT, 1995). En un trabajo precedente (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2004) analizamos las ideas y esquemas de razonamiento de estudiantes de 3º de ESO (14-15 años) sobre el comportamiento físico de los semiconductores intrínsecos (puros). Los niveles cognitivos alcanzados por los estudiantes, y las dificultades detectadas –tanto cuantitativa como cualitativamente– eran similares a las que se obtienen para otros contenidos de Física y Química de esta etapa educativa.

Con objeto de continuar profundizando en nuestra línea de investigación, nos planteamos indagar cuáles son las ideas y dificultades de aprendizaje de los estudiantes de 14-15 años sobre el comportamiento eléctrico de semiconductores

dopados (extrínsecos). En concreto, nos planteamos un problema de investigación que desglosamos en los siguientes interrogantes:

¿Cuál es el estatus cognitivo alcanzado por los estudiantes, sobre el comportamiento eléctrico de los semiconductores extrínsecos, en un marco de aprendizaje constructivista?

¿Cuáles son las principales dificultades de aprendizaje detectadas en los estudiantes sobre la temática?

¿Existe cierta estabilidad de los resultados obtenidos en dos situaciones educativas diferentes, aunque similares?

La finalidad del presente estudio consistió, por tanto, en buscar respuestas a estos interrogantes. Para ello, nos planteamos los siguientes *objetivos de investigación*:

- Conocer el nivel de conocimiento alcanzado por los estudiantes, después del proceso de enseñanza/aprendizaje desarrollado en el aula.
- Describir y analizar las principales dificultades de aprendizaje detectadas en los estudiantes.
- Comprobar si existen diferencias significativas en el aprendizaje de dos grupos de 3º de ESO (14-15 años), pertenecientes a dos años académicos diferentes.

II. Fundamento teórico

A la hora de plantear la enseñanza de la Física de Semiconductores en Secundaria, es necesario atender a la estructura cognitiva inicial del alumnado (RIVAS, 1997), así como a las características del marco curricular en el que se va a integrar (ROSADO, 1995). Todo ello, con idea de enlazar lo que el alumnado conoce con la nueva información, a fin de que sea posible el cambio conceptual requerido en la educación científica (POZO; GÓMEZ CRESPO, 1998). En este sentido, el *constructivismo* se presenta como el paradigma idóneo para abordar su enseñanza/aprendizaje (MARÍN, 2003).

Desde la perspectiva del constructivismo, la enseñanza de la Física de Semiconductores en Secundaria se debe planificar de manera que los contenidos propuestos conecten adecuadamente con los ya incluidos en el curriculum de Física y Química para esta etapa educativa. Concretamente, su introducción debe ser coordinada con los actuales contenidos de *Electricidad y Estructura de la Materia*, con idea de situar al alumnado en disposición de afrontar un nuevo aprendizaje, partiendo de los contenidos existentes en su estructura mental (CAMPANARIO, 2004). Esto requiere de una adaptación especial de los contenidos a la estructura psicológica y cognitiva del alumnado de este nivel (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2002a, 2002c, 2003). Hay que tener presente que los conceptos que se manejan en Física de Semiconductores no se manifiestan en el entorno macroscópico y cotidiano de los adolescentes; además, su

estudio requiere de una capacidad de abstracción que no suele estar suficientemente desarrollada a estas edades (García-Carmona, 2004).

Puesto que la Física de Semiconductores es un tema novedoso para el alumnado de este nivel educativo, previamente es necesario conocer sus ideas y concepciones en temas afines; esto es, sobre Estructura de la Materia (DE POSADA, 1993, 1999; GARCÍA-CARMONA, 2002, 2004; DE LA FUENTE et al, 2003) y *Electricidad* (RUIZ; ROSADO; OLIVA, 1991; FURIÓ; GUIASOLA, 1994; CRIADO; CAÑAL, 2003), que tienen una relación directa con los contenidos que proponemos. Este debe ser el punto de partida que permita construir las nociones básicas sobre la estructura y comportamiento eléctrico de los semiconductores intrínsecos (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2003), de un modo racional y progresivo.

Las concepciones alternativas más frecuentes del alumnado de 14-15 años, sobre el comportamiento de los semiconductores intrínsecos (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2004), se resumen en el cuadro 1. El conocimiento de estas concepciones se establece como base para emprender el estudio de los *semiconductores extrínsecos*, que se justifica como consecuencia de la necesidad de mejorar las aplicaciones tecnológicas de estos materiales en Electrónica (PIERRET, 1994; ALCALDE, 1999).

Cuadro 1 - Ideas alternativas del alumnado de 14-15 años sobre el comportamiento físico de los semiconductores intrínsecos (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2004).

- Asumen que el comportamiento eléctrico intermedio de los semiconductores, a temperatura ambiente, viene dado por una especie de dualidad conductor-aislante de los semiconductores.
- Creen que el comportamiento de un semiconductor es el mismo que el de un material conductor a altas temperaturas, es decir, mal conductor.
- Se observa en el alumnado una incapacidad de interpretar una gráfica de relación entre parámetros físicos, como es el caso de la resistividad de un semiconductor frente a la temperatura; lo que confirma las dificultades de tipo matemático en el aprendizaje de la Física a estas edades (14-15 años).
- Confunden la relación causa-efecto entre la temperatura y la resistividad de un semiconductor; se piensa que los cambios de temperatura del mismo vienen determinados por los cambios de la resistividad.
- No asumen que un *hueco* (una vacante de la red) tiene carga positiva, ya que se trata de una ‘carga ficticia’. O sea, no conciben que esa propiedad surge como consecuencia del *modelo del enlace covalente*, empleado para explicar el comportamiento de un semiconductor.

- Piensan que un *hueco* existe aun cuando se produce el proceso de recombinación, como si fuese una especie de ‘funda’ del electrón ligado a la red.
- Piensan que el proceso de recombinación consiste en una atracción electrostática de cargas de signos opuestos (huecos y electrones libres).
- Asumen que la carga del *hueco* viene determinada por la ausencia o no de un electrón; es decir, en la generación el hueco adquiere carga positiva, y en la recombinación, carga negativa (la propia del electrón).

II.1 Enseñanza de nociones básicas sobre semiconductores extrínsecos en Educación Secundaria Obligatoria (ESO)

En la enseñanza de la Física de Semiconductores se precisa un *modelo explicativo* (CONCARI, 2001) que permita la comprensión de los conceptos básicos de la temática. Existen dos modelos bien diferenciados al respecto (ROSADO, 1987, 1995): *modelo del enlace covalente* y *modelo de bandas de energía*; si bien, teniendo en cuenta el nivel cognitivo del alumnado de 14-15 años, y los contenidos sobre la estructura de la materia, establecidos para el nivel de ESO, conviene utilizar el **modelo bidimensional del enlace covalente** (Fig. 1). Se trata de un modelo clásico bastante simplificado de la estructura interna de un semiconductor intrínseco (de Silicio o Germanio); sin embargo, su empleo permite hacer una primera introducción al estudio de estos materiales en la enseñanza básica (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2002a). Ello, además, está en consonancia con lo indicado en el currículum oficial de Física y Química de la ESO (CEJA, 2004), donde se aconseja el estudio interno de la materia desde una perspectiva clásica; es decir, mediante el uso de modelos atómicos pre-cuánticos como el de Rutherford (GARCÍA-CARMONA, 2002; DE LA FUENTE et al, 2003). El modelo de bandas de energía plantearía dificultades importantes a los alumnos de los niveles básicos (14-15 años), ya que éste se fundamenta en la teoría cuántica y su planteamiento en el aula requiere, al menos, del conocimiento del modelo atómico de Bohr (SOLBES; VILCHES, 1991). Y el estudio de la Física Cuántica se inicia a partir de la etapa de Bachillerato (16-18 años).

Un **semiconductor extrínseco** se obtiene mediante el *dopado con impurezas* (átomos) de un semiconductor puro (intrínseco), habitualmente de Silicio (Si) o de Germanio (Ge), los cuales poseen cuatro electrones en su última capa (capa de valencia). Las impurezas introducidas no deben producir alteraciones importantes en la estructura inicial del semiconductor puro; por este motivo se introducen átomos pentavalentes o trivalentes, cuyos tamaños son similares a los del semiconductor intrínseco (ROSADO, 1987; PIERRET, 1994). Con el propósito de que los estudiantes

se familiaricen con las impurezas, se les pide que encuentren los elementos pertenecientes a los grupos III y V del Sistema Periódico. A partir de estos, se les indicará que las impurezas requeridas para aumentar la concentración de electrones – **impurezas donadoras**– suelen ser átomos de fósforo (P), arsénico (As) y antimonio (Sb) (átomos pentavalentes), entre los cuales el más común es el fósforo (P). Mientras que para aumentar la concentración de huecos – **impurezas aceptoras**– se añaden átomos de boro (B), galio (Ga), indio (In) o aluminio (Al) (átomos trivalentes), siendo el más habitual es el boro (B).

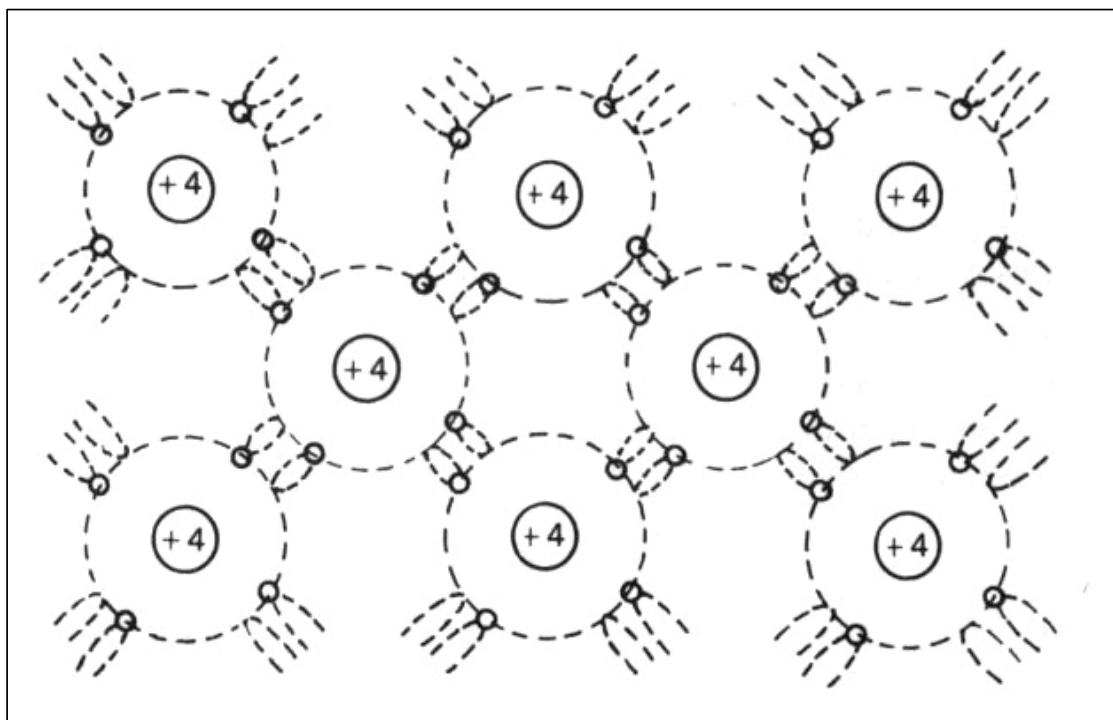


Fig. 1 - Modelo bidimensional de la estructura covalente de un material semiconductor intrínseco de Silicio/Germanio.

En la obtención de un **semiconductor extrínseco tipo n**, los estudiantes deben comprender que, por ejemplo, un átomo de antimonio, cuyo tamaño es similar al del germanio, encajará sin dificultad en la estructura covalente del germanio, compartiendo un par de electrones con cada uno de los cuatro átomos de germanio más próximos (ALCALDE, 1999). Puesto que el antimonio es un átomo pentavalente, uno de sus electrones de valencia quedará desapareado (Fig. 2), ya que los cuatro enlaces están completos. En consecuencia, el electrón que ‘sobra’ no influye en el enlace covalente, de modo que la energía necesaria para liberarlo es mucho menor que la requerida para romper un enlace covalente. Esto explica que ese electrón, incluso a temperatura ambiente, posea la energía suficiente para convertirse en un electrón de conducción (ROBLES et al, 1993). Se consigue, así, tener un electrón de conducción sin su

correspondiente hueco; de modo que la corriente debida a los electrones será mayor que la debida a los huecos.

En cambio, un **semiconductor extrínseco tipo p** se consigue con la introducción de un átomo trivalente (Fig. 3). En este caso, el átomo extraño no posee el número suficiente de electrones de valencia para completar los cuatro enlaces covalentes; con lo cual, queda una vacante (hueco) en uno de los enlaces. El hueco puede ser ocupado por un electrón ligado de un enlace vecino, de modo que el hueco se mueve por el semiconductor, tal y como lo hacen los huecos producidos por generación de pares electrón- hueco (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2004). De esta forma, se consigue aumentar la corriente debida a huecos respecto a la de electrones.

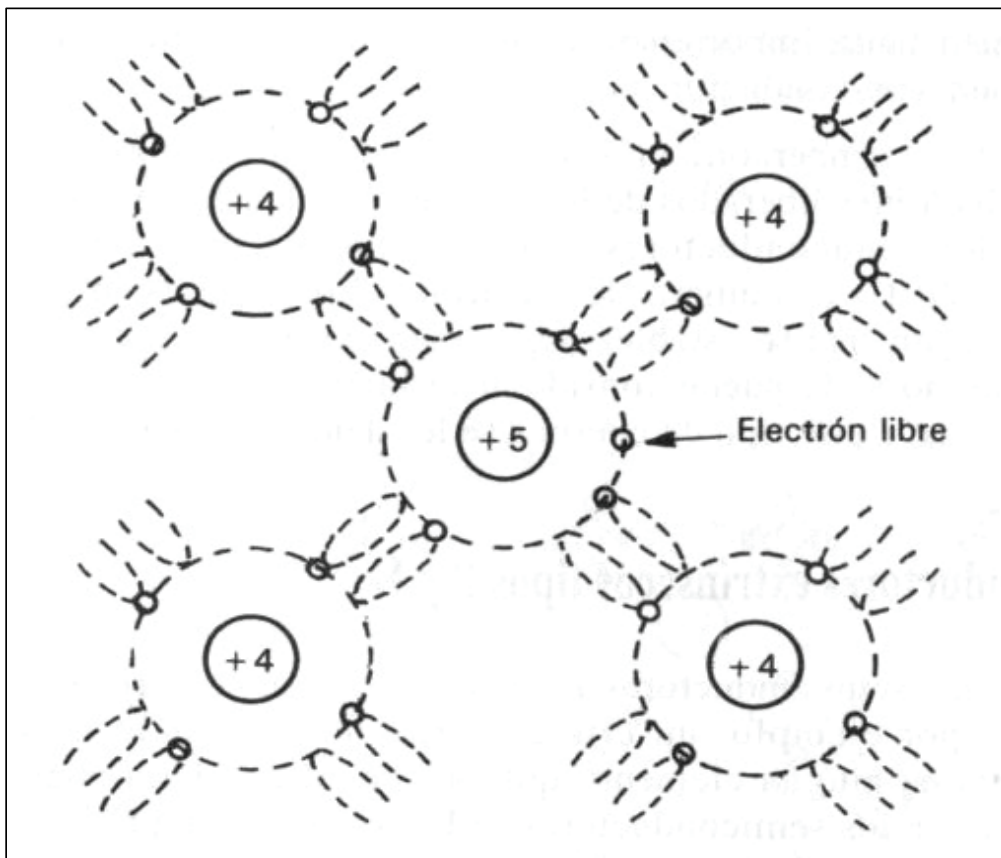


Fig. 2 - Generación de un electrón libre mediante la introducción de una impureza donadora.

En ocasiones, el hecho de que en los semiconductores extrínsecos exista distinto número de electrones libres y de huecos, puede inducir a los estudiantes a pensar que no son eléctricamente neutros (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2002a). Las impurezas que se insertan en un semiconductor, ya sean donadoras o aceptoras, son átomos – por tanto, neutros – que aportan el mismo número de electrones y de protones al semiconductor; de ahí que, aunque el átomo insertado quede ionizado al ocupar el

lugar de un átomo de silicio o germanio, el semiconductor en su conjunto sigue siendo neutro (PIERRET, 1994). Asimismo, se ha de matizar que estos iones – positivos si proceden de una impureza donadora, o negativos de una impureza aceptora –, no contribuyen a la conducción eléctrica, ya que ocupan posiciones fijas en la estructura cristalina y no pueden moverse (ALCALDE, 1999); en caso contrario, supondría una ruptura del material (ROBLES et al, 1993).

Debemos indicar, también, que a diferencia de los semiconductores intrínsecos, donde las corrientes debidas a huecos y a electrones son de igual magnitud (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2003), en los semiconductores extrínsecos estas corrientes son diferentes debido a las impurezas. Puesto que un semiconductor tipo n se obtiene mediante el dopado de impurezas donadoras, se tiene un mayor número de electrones libres que huecos; con lo cual, los portadores de carga mayoritarios son los electrones y los huecos los minoritarios. Y en los semiconductores tipo p ocurre justo lo contrario; es decir, los portadores mayoritarios son los huecos y los electrones los minoritarios.

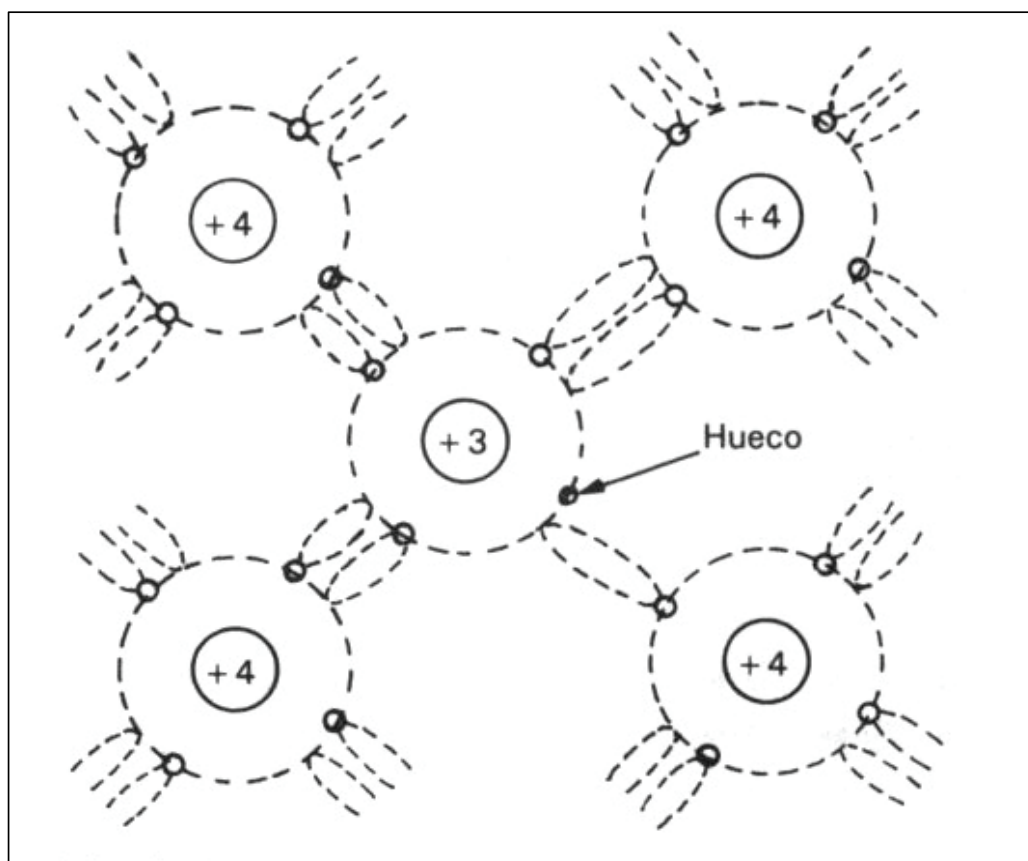


Fig. 3 - Generación de un hueco mediante la introducción de una impureza aceptora.

Finalmente, y a título de información, se introducirá el diodo de unión pn como el dispositivo electrónico semiconductor más elemental (NEUDEK, 1993). En nuestra opinión, una mayor profundización en el estudio del comportamiento físico del diodo de unión pn, merece ser tratado con posterioridad (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2002c), una vez que los estudiantes afiancen los conceptos elementales de la Física de Semiconductores.

III. Metodología de trabajo

Con esta investigación pretendíamos obtener información significativa acerca de las ideas y dificultades de aprendizaje, de estudiantes de 14-15 años, sobre nociones básicas del comportamiento eléctrico de los semiconductores extrínsecos. Puesto que era la primera vez que realizábamos una investigación didáctica sobre el tema y, además, no teníamos evidencias de la existencia de otras investigaciones precedentes, repetimos la experiencia durante dos cursos académicos consecutivos (2002/03 y 2003/2004). La intención era poder contrastar resultados y verificar si estos aportaban, realmente, un patrón de concepciones y dificultades en el aprendizaje de la Física Básica de Semiconductores Extrínsecos, en el nivel educativo mencionado.

El estudio se realizó en el marco de una Investigación-acción práctica (LATORRE, 2003), de modo que no se pretendió buscar la representatividad de la muestra, sino un escenario natural de la práctica docente (ELLIOTT, 2000). Por tanto, se hizo un muestreo accidental (GARCÍA FERRANDO, 2003), donde los estudiantes investigados eran aquellos que estaban disponibles en el momento de la investigación. Ésta se llevó a cabo en un centro de Educación Secundaria de Sevilla, con estudiantes que cursaban la asignatura de Física y Química de 3º de ESO (14-15 años). Durante el curso 2002/03, la investigación se realizó con 33 estudiantes, y en el curso siguiente (2003/04) con 27 estudiantes. En total, intervinieron 60 estudiantes de 3º de ESO en el presente estudio.

Los estudiantes fueron instruidos de acuerdo con el marco conceptual y didáctico descrito anteriormente. Para ello, diseñamos una propuesta didáctica (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2002a, 2002c) – que por razones de espacio no incluimos aquí –, cuya aplicación en el aula se desarrolló en unas 8 sesiones de clase, además del tiempo dedicado por los estudiantes en casa. Las actividades se realizaron, mayoritariamente, en grupos reducidos de alumnos (3 ó 4 componentes), con objeto de realizar, con posterioridad, una puesta en común en clase. Esta estrategia metodológica la justificamos por el hecho de que la interacción entre individuos de un nivel cognitivo similar favorece al proceso de aprendizaje (MEMBIELA, 2002; CORDERO et al, 2002). De modo que, en todo momento, se facilitó a los estudiantes la participación tanto dentro de los grupos como ante el conjunto de la clase.

El seguimiento y la valoración del proceso de enseñanza/aprendizaje se hicieron a través del diario del profesor (PORLÁN; MARTÍN, 1993) y de los cuadernos

de clase de los estudiantes. A partir de la información recogida, se analizaron las dificultades de aprendizaje y el progreso de los mismos durante el proceso de instrucción. Todo esto nos permitió elaborar una prueba objetiva de evaluación (cuestionario), cuyos tópicos se recogen en el cuadro 2.

Como aspecto importante, hemos de señalar que en la investigación se trató de mantener constantes (con igual influencia para ambos grupos) algunos factores (variables intervinientes o “extrañas”) que pudieran influir de manera diferenciada en los resultados de cada grupo. Para ello, ambos fueron instruidos por el mismo profesor (uno de los autores de este trabajo), con la misma propuesta didáctica, durante el mismo número de sesiones y en la misma época del año (2º trimestre de curso). Además, los dos grupos contaban con la misma formación previa. Por tanto, la investigación se delimitó a estudiar el nivel de conocimiento o comprensión (variable dependiente) demostrado por los estudiantes en las actividades del cuestionario (variables independientes).

Asimismo, con el fin de llevar a cabo una triangulación de la información, y complementar la información obtenida con el cuestionario (véase el anexo), se realizaron entrevistas personales a los alumnos. La idea era profundizar en sus modos de razonamiento respecto al comportamiento físico de los semiconductores extrínsecos, una vez concluido el proceso de enseñanza/aprendizaje.

En la investigación se combinan las metodologías cualitativa y cuantitativa. Por una parte, se realiza un estudio cuantitativo con el fin de comparar los resultados del aprendizaje alcanzado por cada grupo de estudiantes investigado. Por otra, se hace un estudio cualitativo para describir, analizar y, finalmente, categorizar las concepciones y razonamientos de estudiantes de 14-15 años, sobre nociones básicas del comportamiento de los semiconductores extrínsecos.

Cuadro 2. Contenidos conceptuales implícitos en la prueba de evaluación (cuestionario).

<i>Cuestión</i>	Noción científica implicada
1	Concepto de semiconductor extrínseco.
2	Generación de un electrón libre en un semiconductor mediante dopado.
3	Concepto de semiconductor extrínseco tipo <i>p</i> .
4	Balance de portadores de carga en un semiconductor extrínseco tipo <i>n</i> .
5	Estado eléctrico de un semiconductor extrínseco.

IV. Resultados

IV.1 Contraste del estatus cognitivo alcanzado en los grupos de estudiantes investigados

Con idea de comprobar si existían diferencias significativas en los resultados de ambos grupos, obtenidos con el cuestionario, empleamos métodos estadísticos de contraste. En primer lugar, sometimos los datos a una prueba de normalización mediante el estadístico Kolmogorov-Smirnov. Para un nivel de confianza del 5% ($p < 0,05$), obtuvimos que los datos no estaban normalizados, de modo que no existían garantías de poder aplicar pruebas de tipo paramétrico (GARCÍA FERRANDO, 2003). En consecuencia, recurrimos a la prueba de contraste no paramétrica U de Mann-Whitney. Los resultados de esta prueba (tabla 1) indican que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) en los niveles de aprendizaje alcanzados por los estudiantes de cada grupo. Esto da idea de la fiabilidad (PADILLA, 2002) del instrumento (cuestionario) empleado en la investigación, al obtenerse una estabilidad de los resultados en dos ocasiones distintas (BEST, 1982). Por tanto, es posible afirmar que los dos grupos investigados forman parte de la misma muestra; es decir, existe un patrón consistente acerca de las concepciones y razonamientos de los estudiantes de 14-15 años sobre la temática estudiada. En el epígrafe siguiente describimos estas concepciones, así como las dificultades de aprendizaje más significativas de los estudiantes.

Tabla 1 - Contraste del estatus cognitivo alcanzado, en cada pregunta del cuestionario, por los grupos investigados.

	Cuestión 1	Cuestión 2	Cuestión 3	Cuestión 4	Cuestión 5
U de Mann-Whitney	382,500	404,000	419,500	444,000	426,500
W de Wilcoxon	943,500	782,000	797,500	822,000	804,500
Z	-1,009	-0,651	-0,404	-0,024	-0,325
Significación asintótica (bilateral)	0,313*	0,515*	0,686*	0,981*	0,745*

* Diferencias no significativas ($p > 0,05$).

IV.2 Descripción y análisis de las concepciones y dificultades de aprendizaje observadas mediante el cuestionario

Con el propósito de describir y analizar el grado de conocimiento alcanzado por los estudiantes en el cuestionario, sobre algunos aspectos del comportamiento eléctrico de los semiconductores extrínsecos, establecimos cuatro categorías o niveles de respuesta:

- **Nivel I:** Respuesta en blanco.
- **Nivel II:** Respuesta errónea o confusa en el sentido de que no comprende o no aplica adecuadamente los conceptos manejados.
- **Nivel III:** Respuesta correcta —en el caso de respuestas de opción múltiple—, pero no se justifica adecuadamente, o bien se hace de manera incompleta o imprecisa.
- **Nivel IV:** Respuesta correcta y justificada adecuadamente.

Puesto que la prueba estadística de contraste indicó que los dos grupos investigados formaban parte de una misma muestra, analizamos los niveles y dificultades de aprendizaje de los estudiantes de un modo global, es decir, considerando a todos los estudiantes investigados como parte de una sola muestra (N=60). En la tabla 2 se recogen los niveles cognitivos alcanzados por los estudiantes en cada pregunta del cuestionario. A la vista de estos resultados, y desde una perspectiva global, se observa que, en la mayoría de las cuestiones, el alumnado investigado alcanzó un nivel cognitivo medio-alto sobre la temática de estudio planteada.

Tabla 2 - Estadística descriptiva de los niveles de conocimiento alcanzados por los estudiantes en las cuestiones de la prueba.

	Nivel mínimo	Nivel máximo	Media	Desviación estándar
Cuestión 1	1	4	3,18	0,854
Cuestión 2	1	4	2,90	1,160
Cuestión 3	1	4	2,90	0,986
Cuestión 4	1	4	3,15	0,860
Cuestión 5	1	4	2,38	0,922
(N = 60)				

En lo que sigue describimos las ideas y esquemas de razonamiento más significativos de los estudiantes en los diferentes tópicos analizados. Para ello, haremos alusión a algunas de las respuestas de los estudiantes mediante la transcripción literal de las mismas.

IV.2.1 Concepto de semiconductor extrínseco

El concepto de semiconductor extrínseco fue analizado a través de la cuestión 1. Un 5% de los estudiantes dejó su respuesta en blanco (nivel I), mientras que el 13,3% respondió incorrectamente (nivel II). Entre las concepciones erróneas del nivel II, destacamos la idea de que un semiconductor extrínseco es una variante de semiconductor intrínseco:

Nivel II: *Un semiconductor extrínseco es una variante de semiconductor intrínseco, porque son intrínsecos que han sido dopados al introducirle impurezas* (Estudiantes del curso 2002/03).

Nivel II: *Un semiconductor extrínseco es una variante de semiconductor intrínseco, porque es un intrínseco que está dopado con impurezas* (Estudiantes del curso 2003/04).

El nivel III fue alcanzado por el 40% de los estudiantes. En este nivel, aun cuando el alumnado escoge la opción correcta, se dan explicaciones incompletas, o bien respuestas con algunas imprecisiones conceptuales. Así, se concibe el concepto de dopado de un semiconductor como el fin perseguido y no como un proceso; esto es, se cree que una impureza donadora es un electrón y una aceptora un hueco:

Nivel III: *Un semiconductor extrínseco tiene distinto número de electrones y huecos porque si se dopa con huecos (semiconductor extrínseco tipo p) o con electrones (semiconductor tipo n), variará el número de electrones respecto al de huecos* (Estudiante del curso 2002/03).

Nivel III: *Un semiconductor extrínseco tiene distinto número de electrones y huecos, porque cuando a un semiconductor intrínseco se le añade un electrón se convierte en extrínseco, ya que no tiene el mismo número de electrones que de huecos* (Estudiante del curso 2003/04).

Otros estudiantes, cuando hacen referencia al dopado, no especifican las características de los átomos que se deben insertar en el semiconductor:

Nivel III: *Un semiconductor extrínseco tiene distinto número de electrones y huecos, porque para que sea extrínseco se le han añadido átomos de otro elemento [...]* (Estudiante del curso 2002/03).

También se observa que algunos estudiantes piensan que un semiconductor extrínseco es un material antagónico a uno intrínseco:

Nivel III: *Un semiconductor extrínseco tiene distinto número de electrones y huecos porque es lo contrario del intrínseco, y en un semiconductor intrínseco hay siempre el mismo número de electrones y de huecos* (Estudiante del curso 2003/04).

Finalmente, el nivel de conocimiento más alto (nivel IV) fue obtenido por el 41,7%. Como ejemplo de respuestas de este nivel citamos el siguiente:

Nivel IV: *Un semiconductor extrínseco tiene distinto número de electrones y huecos. Se origina al añadirle al semiconductor intrínseco impurezas, ya sean de 3 ó 5 electrones de valencia; proceso denominado dopado. Cuando se le añaden impurezas de 3 electrones se originan huecos (semiconductor extrínseco tipo p), y cuando se dopan con átomos de 5 electrones de valencia, se originan electrones libres (semiconductor extrínseco tipo n)* (Estudiante del curso 2003/04).

IV.2.2 Generación de un electrón libre en un semiconductor mediante dopado

Las concepciones acerca del fenómeno de dopado con impurezas donadoras, fue investigado a través de la cuestión 2. Como resultado, obtuvimos que el 18,3% de los estudiantes no contesta a la cuestión (nivel I), y el 16,7% emite respuestas incorrectas (nivel II). Entre las ideas erróneas de los estudiantes observamos que los estudiantes, además de no distinguir entre impureza donadora y aceptora, no comprende en qué consiste el proceso de dopado; creen que cuando se genera un hueco mediante dopado, se consigue un electrón libre automáticamente, porque entienden – erróneamente – que se ha producido la generación de un par electrón-hueco:

Nivel II: *Al meterle impurezas donadoras se generan huecos, que producirán también electrones libres. Se generan como en un semiconductor intrínseco* (Estudiante del curso 2003/04).

Otra idea errónea detectada es la creencia de que el proceso de dopado consiste en subir la temperatura del semiconductor, con objeto de liberar electrones y bajar su resistividad; tal y como ocurre en los semiconductores intrínsecos (ROSADO; GARCÍA-CARMONA, 2003):

Nivel II: *[...] porque sube la temperatura y así baja su resistividad [...]* (Estudiante del curso 2003/04).

Algunos estudiantes explican el proceso de dopado mediante un esquema erróneo de la red covalente de un semiconductor (Fig.4); esto es, piensan que se trata de una sustancia covalente molecular y, por tanto, no utilizan el esquema del modelo bidimensional del enlace covalente de los semiconductores (Fig.1):

Nivel II: *Para generar un electrón libre en un semiconductor, hay que añadirle un átomo con 5 electrones de valencia, y resulta lo de la figura [Fig.4]* (Estudiante del curso 2002/03).

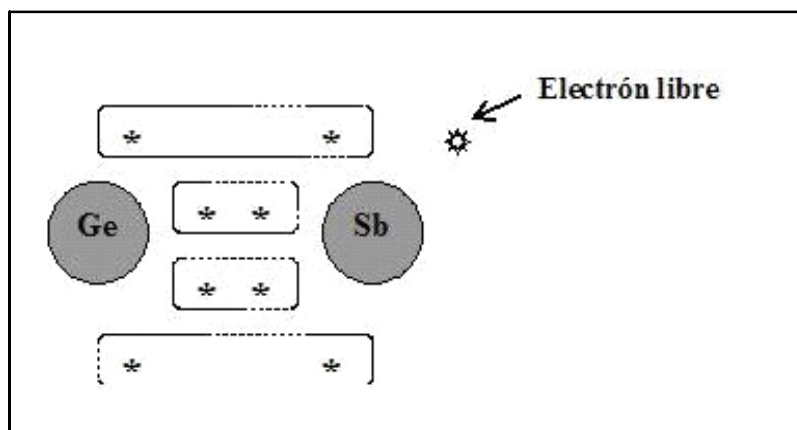


Fig. 4 - Esquema que indica un estudiante sobre el proceso de dopado en un semiconductor mediante una impureza donadora.

También en el nivel II de la cuestión 2, vuelve a detectarse la idea errónea de que el proceso de dopado con impurezas donadoras consiste en introducir directamente electrones. Además, se piensa que los huecos son una especie de defectos de la red cristalina del semiconductor, que deben ser corregidos:

Nivel II: *El dopado de un semiconductor consiste en meter electrones libres para rellenar huecos que hay en un semiconductor* (Estudiante del curso 2003/04).

El nivel III fue alcanzado por un 21,7% de los estudiantes, y viene caracterizado porque se justifica la respuesta de manera incompleta o poco precisa; por ejemplo, no se indica qué características deben tener las impurezas donadoras:

Nivel III: *Pues si a un semiconductor intrínseco le añades átomos de otro material, con un mayor número de electrones de valencia que los átomos del semiconductor intrínseco, se generaría un electrón libre* (Estudiante del curso 2002/03).

El nivel IV fue conseguido por el 43,3% de los estudiantes, que justificaron correctamente sus respuestas. Un ejemplo de éstas es la que sigue:

Nivel IV: *Cuando dopamos a un sólido covalente de germanio, por ejemplo, con átomos de antimonio, creamos más electrones que huecos. Esto sucede porque el antimonio tiene 5 electrones de valencia y sólo puede compartir 4 con los átomos de germanio que lo rodean; por eso le sobra uno, que pasará a ser electrón libre* [La estudiante añade el esquema de la Fig. 2] (Estudiante del curso 2002/03).

IV.2.3 Concepto de semiconductor extrínseco tipo p

A través de la cuestión 3 nos propusimos averiguar si los estudiantes comprendían cómo se obtiene un semiconductor extrínseco tipo p y por qué se denomina así. El 10% de los estudiantes dejó su respuesta en blanco (nivel I), mientras que un 23,3% contestó de manera equivocada (nivel II).

Una de las concepciones erróneas del nivel II consiste en creer que las impurezas son una especie de sumideros de cargas en el semiconductor:

Nivel II: *Porque las [impurezas] aceptoras son las que 'aceptan' ese tipo de partículas [huecos], que son positivas [...]* (Estudiante del curso 2002/03; no cursiva añadida).

Otra idea alternativa de los alumnos consiste en concebir las impurezas aceptoras como sustancias que, al ser introducidas en el semiconductor, 'se llevan' a los electrones libres y, por tanto, lo dejan cargado positivamente:

Nivel II: *Porque la impureza acepta a los electrones libres, entonces el semiconductor queda positivo* (Estudiante del curso 2003/04).

También, entre las respuestas de este nivel, encontramos que no se concibe a los huecos como partículas ficticias (producto de un modelo científico-didáctico explicativo) portadoras de carga positiva. Se piensa que los huecos participan en la neutralidad eléctrica de los semiconductores, como si fuesen cargas físicas (reales); de modo que se cree que los semiconductores tipo p son materiales cargados positivamente:

Nivel II: *[...] Porque estará cargado positivamente al tener más huecos que electrones. Los semiconductores tipo p son semiconductores de carga positiva, y las impurezas aceptoras son las que originan huecos dentro del semiconductor* (Estudiante del curso 2003/04).

El nivel III es alcanzado por un 33,3% de los estudiantes, que eligen la opción correcta pero la justifican de forma incompleta o introducen algunos errores argumentales. Así, al igual que con el dopado de impurezas donadoras, algunos estudiantes piensan que las impurezas aceptoras son, directamente, huecos y no átomos trivalentes:

Nivel III: *Porque las impurezas aceptoras son huecos y estos tienen carga positiva, entonces al darle impurezas aceptoras hay más positivas [...]* (Estudiante del curso 2002/03).

También, entre las respuestas del nivel III, se argumenta que un semiconductor extrínseco tipo p viene caracterizado por una mayor 'capacidad de acogida' de huecos que de electrones:

Nivel III: *Porque un semiconductor dopado tipo p, se le considera que tiene mayor número de huecos que de electrones, lo cual quiere decir que acepta más huecos que electrones* (Estudiante del curso 2002/03).

Por último, el nivel más alto de conocimiento (nivel IV) es logrado por un 33,3% del alumnado. Como ejemplo de respuesta de este nivel exponemos el siguiente:

Nivel IV: [...] *Porque las impurezas aceptoras tienen 3 electrones de valencia; entonces, al tener los átomos del semiconductor un electrón de valencia más, al enlazarse los átomos del semiconductor con las impurezas, quedan huecos. Entonces tiene más huecos que electrones libres, y, por eso, se llama semiconductor extrínseco tipo p (de 'positivo')* (Estudiante del curso 2003/04).

IV.2.4 Balance de portadores de carga en un semiconductor extrínseco tipo n

La cuestión 4 se planteó con objeto de analizar las ideas del alumnado acerca de los portadores de carga en un semiconductor extrínseco tipo n. Los niveles más bajos fueron expresados por un 6,7% para el nivel I, y un 10% para el nivel II. Las respuestas incorrectas observadas en el nivel II eran carentes de significado con vistas a realizar un análisis de concepciones y razonamientos erróneos; por ello no ofrecemos ningún ejemplo.

El nivel III fue alcanzado por un 45% del alumnado. Aun cuando eligen la opción correcta, no justifican adecuadamente su respuesta y cometen algunos errores o imprecisiones. Así, observamos la creencia de que un semiconductor tipo n está cargado negativamente:

Nivel III: *Porque un semiconductor tipo n, tiene mayor número de electrones, que están cargados negativamente, y menos huecos, que son positivos. Por tanto, [el semiconductor] queda con carga negativa* (Estudiante del curso 2002/03; no cursiva añadida).

Asimismo, surge de nuevo la idea de que las impurezas donadoras son electrones:

Nivel III: *Un semiconductor tipo n es negativo, ya que el semiconductor está dopado con electrones, por ello, los electrones libres son los portadores mayoritarios* (Estudiante del curso 2002/03).

Finalmente, el 38,3% justificó correctamente su respuesta, de manera similar a la siguiente:

Nivel IV: *Los semiconductores de tipo n se forman al dopar un semiconductor intrínseco con impurezas donadoras (5 electrones de valencia). Éstas originan un electrón libre y, por ello, al tener más electrones libres que huecos, se le dice tipo n (negativo). Como tiene más electrones que huecos, se dice que estos (los*

electrones) son los portadores mayoritarios y lo huecos los minoritarios (Estudiante del curso 2003/04).

IV.2.5 Estado eléctrico de un semiconductor extrínseco

Con la cuestión 5 pretendimos comprobar qué concepciones tenían los estudiantes sobre el estado eléctrico de un semiconductor dopado con impurezas (extrínseco); fue la cuestión donde se obtuvo mayor porcentaje de respuestas erróneas. Así, el nivel I (alumnos que dejan su respuesta en blanco) se situó en el 10%, mientras que un 61,7% contestó de manera incorrecta (nivel II). La concepción errónea más significativa, tal como se había detectado en cuestiones anteriores, consiste en considerar que un semiconductor extrínseco no es eléctricamente neutro. Los estudiantes analizan la neutralidad en términos de un balance entre el número de electrones libres y huecos:

Nivel II: *No, porque si a un semiconductor intrínseco le introducimos dos impurezas donadoras, se generarían dos electrones libres, por lo tanto habría mayor número de electrones que de huecos; por esto no podría seguir siendo eléctricamente neutro (Estudiante del curso 2003/04).*

Asimismo, se justifica la no neutralidad eléctrica de un semiconductor extrínseco porque se identifican las impurezas donadoras con electrones libres:

Nivel II: *No, ya que cambiaría su configuración y pasaría a ser negativo, porque las impurezas donadoras son electrones (Estudiante del curso 2002/03).*

El nivel III fue alcanzado por un 8,3% de los estudiantes. Este nivel no se encuentra ideas alternativas sino, más bien, respuestas incompletas o imprecisas:

Nivel III: *Sí seguirá siendo neutro; tendría más electrones libres, pero no estará cargado eléctricamente (Estudiante del curso 2002/03).*

El nivel de conocimiento más alto (nivel IV) fue declarado por un 20% de estudiantes, que emitieron respuestas correctas similares a la que sigue:

Nivel IV: *Sí, porque aunque al dopar el semiconductor, se tenga más electrones libres que huecos, como en este caso, el número de electrones y de protones sigue siendo el mismo; y eso es lo que de verdad importa para la neutralidad. Los átomos (impurezas) que se introducen son de por sí neutros, entonces el semiconductor seguirá siendo neutro (Estudiante del curso 2003/04).*

IV.3 Entrevistas personales

Con el fin de complementar la información obtenida mediante el cuestionario, se entrevistó a 22 alumnos, escogidos al azar, de ambos cursos escolares (2002/03 y 2003/04). En las entrevistas se plantearon diversas cuestiones relativas al

comportamiento de los semiconductores extrínsecos. Éstas se hicieron dos semanas después de haber concluido el proceso de enseñanza/aprendizaje. Se empleó el método de entrevista dirigida (PADILLA, 2002), con el fin de extraer la máxima información de las ideas (correctas y erróneas) adquiridas por los alumnos en el proceso de aprendizaje.

Por razones de espacio, a continuación sólo se describen los argumentos y explicaciones habituales de los alumnos entrevistados, en relación con el proceso de dopado de un semiconductor.

Al igual que con el cuestionario, en las entrevistas se detecta la idea errónea de que el dopado consiste en introducir electrones al semiconductor:

Entrevista A (curso 2002/03)

[...]

Profesor: ¿En qué consiste el proceso de dopado de un semiconductor?
¿Con qué fin se realiza?

Israel: Es... cuando a un semiconductor intrínseco se le incorpora impurezas; es decir, que ya no es puro.

Profesor: ¿Y qué son esas impurezas?

Israel: Esas impurezas... esas impurezas... pues son electrones de otros átomos.

Otros alumnos incurren en la concepción errónea de considerar que el proceso de dopado se realiza con el fin de electrizar al semiconductor. Ello se pone de manifiesto en el siguiente ejemplo:

Entrevista B (curso 2002/03)

[...]

Profesor: ¿En qué consiste el proceso de dopado de un semiconductor?

Patricia: Pues... pues que en un semiconductor intrínseco se introduzcan impurezas.

Profesor: ¿Y estas impurezas qué son?

Patricia: Son átomos que en su última capa tienen tres o cinco electrones.

Profesor: ¿Con qué fin se dopa un semiconductor?

Patricia: Pues para que tenga carga eléctrica.

Las respuestas consideradas como correctas, en relación con el proceso de dopado, fueron expresadas del modo siguiente:

Entrevista D (curso 2002/03)

[...]

Profesor: ¿En qué consiste el proceso de dopado de un semiconductor?
¿Con qué fin se realiza?

Elena: Pues... tú tienes en un material semiconductor intrínseco el mismo número de electrones y de huecos, y como tú no puedes conseguir más huecos que electrones, porque si no lo que estás haciendo es cargarlo [eléctricamente] y tú lo quieres neutro, pero con distinto número de electrones que de huecos, entonces lo que hay que hacer es doparlo, introducirle impurezas, que son elementos que tengan tres ó cinco electrones de valencia. [No cursiva añadida]

Profesor: ¿Qué tipo de impurezas hay que introducir a un semiconductor puro (intrínseco) para obtener un semiconductor extrínseco tipo p?

Elena: Pues los que tengan tres electrones de valencia como el boro. Porque... el enlace covalente se hace con... Verás, tú tienes el átomo de germanio, que tiene cuatro electrones de valencia, y tienes que unirlo con cuatro átomos de germanio para que comparta uno con cada uno y en total tenga ocho. Pero si tú metes uno con tres electrones de valencia, tiene tres átomos suyos y cuatro que comparte, como tiene que haber uno en cada par de enlace, pues en uno de los cuatro enlaces falta un electrón, y esa es la vacante [hueco]. [No cursiva añadida]

Profesor: Entonces, ¿en un semiconductor extrínseco tipo p qué corriente predomina, la de electrones o la de huecos?.

Elena: La de huecos.

Profesor: ¿Y por qué se denomina tipo p?

Elena: Por lo de positivo.

Entrevista E (curso 2003/04)

[...]

Profesor: ¿En qué consiste el proceso de dopado de un semiconductor?
¿Con qué fin se realiza?

Isra: El proceso de dopado consiste en meter impurezas, o átomos donadores o aceptores, al semiconductor. Y así conseguimos tener más huecos que electrones libres o más electrones libres que huecos.

Profesor: ¿Qué tipo de impurezas hay que introducir a un semiconductor puro (intrínseco) para obtener un semiconductor extrínseco tipo p?

Isra: Pues habría que meter átomos que tengan de valencia tres, trivalentes como el aluminio, para que cuando se forme el enlace, quede un hueco por falta de otro electrón para el enlace. Así se diría que hay más portadores positivos (huecos) y por eso lo consideramos como p.

Profesor: ¿Es un semiconductor tipo p neutro?

Isra: Sí, porque si lo dopamos... por ejemplo, ese átomo que tiene tres electrones de valencia, también tiene los mismos protones que electrones; si no, no sería un átomo.

Profesor: En definitiva, ¿influye en la neutralidad eléctrica de un semiconductor que haya distinto número de electrones libres y de huecos?

Isra: No, no.

Con las entrevistas personales se observaron, prácticamente, las mismas ideas y argumentaciones erróneas detectadas en el cuestionario; lo cual apoya más aún la existencia de un marco consistente de concepciones alternativas, sobre el comportamiento físico de los semiconductores extrínsecos, en estudiantes de 14-15 años.

V. Conclusiones y perspectivas

A la vista de los resultados obtenidos, estamos en condiciones de afirmar que existe un patrón de concepciones y razonamientos de estudiantes de 14-15 años sobre el comportamiento eléctrico de semiconductores extrínsecos. Hemos confirmado, también, que el alumnado investigado ha logrado, desde una perspectiva global, un nivel cognitivo medio-alto, y que las dificultades de aprendizaje observadas son similares a las de otros contenidos de Física y Química, propuestos para la misma etapa educativa. En consecuencia, se pone de manifiesto la viabilidad de emprender la enseñanza de nociones básicas de Física de Semiconductores en la ESO, como apoyo fundamental en el aprendizaje de la Electrónica Básica en el Área de Tecnología.

A modo de conclusión, detallamos, a continuación, las concepciones erróneas más relevantes, que hemos detectado en los estudiantes sobre el comportamiento físico de los semiconductores extrínsecos:

Algunos estudiantes conciben a un semiconductor extrínseco como una variante de semiconductor intrínseco, o bien como un material antagónico al intrínseco.

En cuanto a la estructura de los semiconductores, los estudiantes consideran que, por el hecho de ser sustancias covalentes, tienen la estructura cristalina de una sustancia covalente molecular; quizá sea una idea motivada porque es la estructura covalente con la que más familiarizados están en el nivel de ESO.

Se observa que entienden el concepto de dopado de un semiconductor como el fin perseguido y no como un proceso. Así, creen que una impureza donadora es un electrón y una aceptora un hueco. Por tanto, no entienden que las impurezas son átomos (por definición, eléctricamente neutros).

Asimismo, piensan que los huecos participan en la neutralidad eléctrica de los semiconductores, como si fuesen cargas físicas (reales). Esta idea, unida a la citada anteriormente, hace a los estudiantes pensar que un semiconductor extrínseco no es eléctricamente neutro porque existe un desequilibrio entre el número de electrones libres y de huecos; de forma que creen que los semiconductores tipo p son materiales cargados positivamente, y los tipo n, negativamente.

También observamos que algunos estudiantes consideran que el proceso de dopado es equivalente al proceso de generación de pares electrón-hueco; es decir, un proceso que consiste en subir la temperatura del semiconductor con objeto de liberar electrones y bajar así su resistividad. En este orden de ideas, cierto sector de estudiantes

piensa que los semiconductores extrínsecos tipo p son aquellos que tienen mayor capacidad de atraer huecos, mientras que los tipo n, de atraer a los electrones.

Otra idea que observamos es la de creer que las impurezas son una especie de ‘sumideros de carga’ en el semiconductor. Esto es, piensan que los huecos son una especie de defectos de la red cristalina y, como consecuencia de ello, el proceso de dopado consiste en corregir esos defectos ‘tapándolos con electrones’.

Para finalizar, hemos de decir que los resultados de esta modesta investigación no son más que el inicio de un campo de investigación didáctica aún poco explorado en Física; no en vano, se trata de un estudio pionero en la Didáctica de las Ciencias Experimentales. Si bien, creemos que es un referente importante con vistas a emprender nuevas investigaciones, que profundicen en los aspectos aquí expuestos, y arrojen luz a la problemática planteada. Y es que la consolidación progresiva de la enseñanza de la Física de Semiconductores, en la Educación Básica, ha de venir dada por una revisión permanente de los logros y las dificultades de aprendizaje de los alumnos. En futuros trabajos nos proponemos investigar los niveles y dificultades de aprendizaje de los alumnos, de enseñanza básica, en torno al comportamiento físico de la unión pn semiconductor, y otras aplicaciones de los materiales semiconductores.

Referencias

ALCALDE, P. **Principios fundamentales de Electrónica**. 3. ed. Madrid: Paraninfo, 1999.

BEST, D. W. **¿Cómo investigar en educación?** Madrid: Morata, 1982.

CONCARI, S. B. Las teorías y modelos en la explicación científica: implicaciones para la enseñanza de las Ciencias. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 1, p. 85-94, 2001.

CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA (CEJA). Curriculum de Física y Química de la ESO. Sevilla: Dirección General de Promoción y Evaluación Educativa, 2004.

CORDERO, S. et al. ¿Y si trabajan en grupo...? Interacciones entre alumnos, procesos sociales y cognitivos en clases universitarias de Física. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 20, n. 3, p. 427-441, 2002.

CRIADO, A.; CAÑAL, P. Investigación de algunos indicadores del estatus cognitivo de las concepciones sobre el estado eléctrico. **Enseñanza de las Ciencias**, n. extra, p. 29-41, 2003.

DE LA FUENTE, M. A. et al. Estructura atómica: análisis y estudio de las ideas de los estudiantes (13-14 años). **Enseñanza de las Ciencias**, v. 21, n. 1, p. 123-134, 2003.

DE POSADA, J. M. Concepciones de los alumnos de 15-18 años sobre la estructura interna de la materia en el estado sólido. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 11, n. 1, p. 12-19, 1993.

DE POSADA, J. M. Concepciones de los alumnos sobre el enlace químico antes, durante y después de la enseñanza formal. Problemas de aprendizaje. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 17, n. 2, p. 227-245, 1999.

ELLIOTT, J. **La investigación-acción en educación**. 4. ed. Madrid: Morata, 2000.

FURIÓ, C.; GUIASOLA, J. Dificultades en el aprendizaje significativo de algunos conceptos de electrostática. **Investigación en la Escuela**, v. 23, p. 103-114, 1994.

GARCÍA-CARMONA, A. Los modelos atómicos en la Física y Química de la Educación Secundaria Obligatoria. Revista Española de Física, v. 16, n. 3, p. 37-39, 2002.

GARCÍA-CARMONA, A. Introducción a la configuración electrónica de los átomos en los niveles básicos de enseñanza. **Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales**, v. 40, p. 25-34, 2004.

GARCÍA FERRANDO, M. **Socioestadística: introducción a la estadística en sociología**. 3. ed. Madrid: Alianza Editorial, 2003.

JOLLY, W. P. **Electrónica**. 6. ed. Madrid: Pirámide, 1998.

LATORRE, A. **La Investigación-acción. Conocer y cambiar la práctica educativa**. Barcelona: Graó, 2003.

MARÍN, N. Visión constructivista dinámica para la enseñanza de las Ciencias. **Enseñanza de las Ciencias**, n. extra, p. 43-55, 2003.

MEMBIELA, P. Investigación-acción en el desarrollo de proyectos curriculares innovadores de Ciencias. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 20, n.3, p. 443-450, 2002.

NEUDECK, G. W. **El diodo pn de unión**. 2. ed. USA: Addison-Wesley Iberoamericana, 1993.

PADILLA, M. A. **Técnicas e instrumentos para el diagnóstico y la evaluación educativa**. Sevilla: CCS, 2002.

PIERRET, R. F. **Fundamentos de semiconductores** 2. ed. USA: Addison-Wesley Iberoamericana, 1994.

PORLÁN, R.; MARTÍN, J. **El diario del profesor. Un recurso para la investigación en el aula**. Sevilla: Díada, 1993.

POZO, J. I.; GÓMEZ CRESPO, M. A. **Aprender y enseñar Ciencia**. Madrid: Morata, 1998.

RIVAS, F. **El proceso de Enseñanza/Aprendizaje en la situación educativa**. Barcelona: Ariel, 1997.

ROBLES, M. et al. **Física Básica de Semiconductores**. Madrid: Paraninfo, 1993.

ROSADO, L. **Electrónica Física y Microelectrónica**. Madrid: Paraninfo, 1987.

ROSADO, L. **Microelectrónica para Profesores de Ciencias y Tecnología**. Madrid: UNED, 1995.

ROSADO, L.; GARCÍA-CARMONA, A. Programa-guía sobre Física de Semiconductores en la Electrónica de la Educación Secundaria Obligatoria (ESO). In: ROSADO, L. et al. (Eds.) **Didáctica de la Física y sus Nuevas Tendencias**. Madrid: UNED, 2002. p. 775-846.

ROSADO, L.; GARCÍA-CARMONA, A. Enfoque Ciencia-Tecnología-Sociedad en el estudio de la Física de Semiconductores en la ESO. Propuesta de un módulo didáctico. In: ROSADO, L. et al. (Eds.) **Didáctica de la Física y sus Nuevas Tendencias**. Madrid: UNED, 2002. p. 737-774.

ROSADO, L.; GARCÍA-CARMONA, A. Diseño de un módulo didáctico sobre el Diodo de unión pn en la Electrónica de la ESO. In: ROSADO, L. et al. (Eds.) **Didáctica de la Física y sus Nuevas Tendencias**. Madrid: UNED, 2002. p. 847-892.

ROSADO, L.; GARCÍA-CARMONA, A. Una propuesta de enseñanza/aprendizaje sobre la conducción eléctrica en semiconductores intrínsecos para la Educación Secundaria. In: ROSADO, L. et al. (Eds.) **Didáctica de la Física y sus Nuevas Tendencias**. Madrid: UNED, 2003.

ROSADO, L.; GARCÍA-CARMONA, A. Concepciones y dificultades de aprendizaje de estudiantes de Secundaria sobre el comportamiento eléctrico de los semiconductores y otros materiales. In: ENCUENTROS DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, XXI, 2004, San Sebastián, España. **Atas...** p. 273-280.

RUIZ, A.; ROSADO, L.; OLIVA, J. M. Investigación de las ideas de los alumnos de enseñanza secundaria sobre la corriente eléctrica. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 9, n. 2, p. 155-162, 1991.

SOLBES, J.; VILCHES, A. Análisis de la introducción de la teoría de enlaces y bandas. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 9, n. 1, p. 53-58, 1991.

SUMMER, M. K. Electronics 11-18: a coordinated programme for the School Physics Curriculum. **Physics Education**, v. 20, n. 2, p. 55-61, 1985.

VIENNOT, L. The Contents of Physics. Essential Elements, Common Views. Thinking physics for teaching. In: BERNARDINI; TARSITANI; VICENTI (Eds.) Nueva Cork: Plenum Press, 1995.

Anexo: Cuestionario sobre el comportamiento de semiconductores extrínsecos

1) Un semiconductor extrínseco:

- a) Tiene distinto número de electrones y huecos.
- b) Todos los átomos que lo componen son de un mismo elemento.
- c) Es una variante de semiconductor intrínseco.

Explicación:

2) Explica cómo se genera un electrón libre en un semiconductor, a partir del dopado con una impureza donadora.

Explicación:

3) ¿Cómo se obtiene un semiconductor extrínseco tipo p?

Explicación:

4) En un semiconductor extrínseco tipo n:

- a) Los huecos son los portadores minoritarios.
- b) Los electrones libres son los portadores mayoritarios.
- c) No existen portadores mayoritarios ni minoritarios.
- d) Los electrones libres son los portadores minoritarios.

Explicación:

5) Si a un semiconductor puro (intrínseco) le introducimos dos impurezas donadoras, ¿seguirá siendo eléctricamente neutro?. Razona tu respuesta.