

FÍSICA DE SEMICONDUCTORES EN LA ENSEÑANZA BÁSICA DE LA ELECTRÓNICA: PRIMEROS PASOS DE UN PROCESO DE TRANSPOSICIÓN DIDÁCTICA

GARCÍA-CARMONA, ANTONIO y CRIADO, ANA M.

Departamento de Didáctica de las Ciencias. Universidad de Sevilla

garcia-carmona@us.es

acriado@us.es

Resumen. El artículo plantea, como innovación didáctica, la introducción de nociones de física de semiconductores (FS) en Educación Secundaria Obligatoria (ESO). Se pretende así que los alumnos de la etapa adquieran un conocimiento básico del fundamento físico de los dispositivos electrónicos. Bajo la hipótesis general de que es posible integrar nociones de FS en clases de física y química de la ESO (14-16 años), se establecen una serie de hipótesis específicas, que guían dicha integración. Éstas implican la necesidad de conocer las ideas y obstáculos de aprendizaje más frecuentes de alumnos de la etapa, en relación con el tópico, a fin de identificar la demanda de aprendizaje. A continuación, se propone una transposición didáctica del tópico para el nivel de ESO, en la que se establecen: los contenidos del actual currículo, que sirven de «puente» entre lo que el alumno ya sabe con lo que va a aprender; y el tratamiento didáctico de los contenidos propuestos, junto con los objetivos de aprendizaje.

Palabras clave. Educación secundaria, electrónica, física de semiconductores, obstáculos de aprendizaje, transposición didáctica.

Semiconductor Physics in basic Electronics teaching: First steps of a didactic transposition process

Summary. This article proposes, as an educational innovation, the introduction of notions of semiconductor physics in the Compulsory Secondary Education, so that students at this stage may acquire a basic knowledge of the physical foundations of electronics. Under the general hypothesis that it is possible to integrate some of these basic notions on the topic into the physics and chemistry class, a series of specific hypotheses that guide the integration are established. These imply the need to knowing the students' most frequent ideas and learning obstacles regarding the topic, in order to identify the learning demand. Then, a didactic transposition of the semiconductor physics to the said educational stage is proposed, indicating (a) the contents of physics and chemistry curriculum that serve as bridge between the knowledge that the students already have and what they are going to learn, and (b) the didactic treatment of the new contents along with the learning objects.

Keywords. Didactic transposition, electronics, learning obstacles, Secondary Education, semiconductor physics.

1. INTRODUCCIÓN

En España, la enseñanza básica de la electrónica se inicia en el último curso de Educación Secundaria Obligatoria (ESO), dentro de la materia de Tecnología. Sus contenidos suelen ser introducidos desde una perspectiva funcional basada en el análisis de dispositivos y sistemas electrónicos, a modo de cajas negras, de modo que, por lo general, no se llega a abordar la física que hay detrás del comportamiento de los materiales que componen tales dispositivos (Rosado y García-Carmona, 2004).

Sin embargo, la electrónica no habría alcanzado los altos niveles de desarrollo, hoy conocidos, de no ser por los importantes avances logrados en la física de los principales materiales empleados en la fabricación de componentes electrónicos: los semiconductores (Jenkins, 2005). Tal hecho fue reconocido en 2000 con el premio Nobel de Física. Méndez (2000, p. 66) escribe, al respecto:

«Los hallazgos [...] demostrados en muchas familias de semiconductores, son el fundamento de los dispositivos

electrónicos que gobiernan, hoy día, el funcionamiento de la telefonía móvil, las calculadoras, las videoconsolas, los televisores, los ordenadores, los relojes digitales y un largo etcétera. De modo que con esto se ha marcado un antes y un después en el desarrollo de la Humanidad, dando lugar a una nueva era de las comunicaciones.»

Por tanto, existen razones didácticas y epistemológicas que sugieren la posibilidad de plantearse la introducción de nociones de física de semiconductores (FS) en la enseñanza de la electrónica en la ESO (Rosado y García-Carmona, 2005a). Si bien, dado que el currículo oficial no obliga a ello, lo ideal es que tal propósito surja de la inquietud profesional de cada profesor, teniendo en cuenta, además, las posibilidades reales de su contexto docente. En nuestro caso, el primero de los autores imparte tanto física y química como tecnología en la etapa, y después de algunos años enseñando electrónica, siente la necesidad de complementarla con la introducción de algunas nociones de FS en clase de física y química.

A partir del actual currículo de física y química de la ESO, y con un planteamiento didáctico y metodológico apropiado, es posible integrar algunas nociones básicas de FS en esta etapa. Con esta hipótesis general, y como innovación didáctica, nos planteamos emprender una primera introducción al tema.

Al no encontrar en la literatura científica ningún trabajo dedicado a la enseñanza-aprendizaje de FS en secundaria, realizamos un amplio estudio piloto (Rosado y García-Carmona, 2005b; García-Carmona, 2006a, 2007; García-Carmona y Criado, 2009) orientado a valorar la viabilidad (logros, obstáculos de aprendizaje, etc.) de integrar el tópico en clase de física y química de la ESO (14-16 años). Los resultados de este estudio constituyen, precisamente, el punto de arranque de una propuesta de enseñanza más fundamentada de primera introducción al tema en la etapa.

Por tanto, los objetivos de este trabajo son: a) describir las principales ideas y obstáculos de aprendizaje de alumnos de ESO, en relación con el tópico; b) determinar la demanda de aprendizaje, al respecto, de acuerdo con las edades de los alumnos y el marco curricular de física y química para la etapa; y c) proponer un modo de integrar nociones de FS en dicho currículo, mediante un proceso de *transposición didáctica* donde se establezcan: 1) los contenidos de partida, que sirvan de «puente» entre lo que el alumno ya sabe con lo que va a aprender, 2) el tratamiento didáctico de los contenidos y 3) los objetivos de aprendizaje. Todo ello se plantea en el marco de unas hipótesis didácticas específicas, establecidas como punto de partida en el diseño y desarrollo de la propuesta de enseñanza.

2. HIPÓTESIS DE PARTIDA

La literatura actual, respecto al diseño de propuestas didácticas, mantiene vigente ideas que ya surgieron en la década de los ochenta. Por ejemplo, Lijnse (2000) establece como elemento prioritario la motivación de los

alumnos y darles buenas razones sobre el interés del tópico que se propone estudiar. Asimismo, argumenta que el profesor debe tener en cuenta la relación entre el tópico que se va a enseñar y el conocimiento previo y/o cotidiano de los alumnos sobre el mismo. Esto servirá de orientación en el momento de seleccionar los contenidos y objetivos de aprendizaje. También considera que es fundamental tener presentes los resultados de investigaciones didácticas previas referidas al tópico que se va a enseñar, con especial atención a aquellas desarrolladas en contextos educativos similares.

Leach y Scott (2002) basan el diseño de sus propuestas didácticas en el concepto de *demanda de aprendizaje*, que surge de una necesidad de adquirir nuevos conocimientos para explicar mejor ciertos fenómenos. Para ello, primero analizan las ideas habituales de los alumnos sobre el tópico en cuestión, y luego, comparando dichas ideas con el contenido científico escolar que se va a enseñar, establecen los objetivos de aprendizaje.

Recapitulando las ideas anteriores, Buty, Tiberghien y Le Maréchal (2004) proponen tres hipótesis clave para la construcción de propuestas didácticas: *hipótesis sobre el conocimiento*, *hipótesis sobre el aprendizaje* e *hipótesis didáctica*. En cada una de ellas tienen en cuenta aspectos epistemológicos, psicológicos y didácticos, dando mayor importancia a unos u otros según el caso.

En relación con la *hipótesis sobre el conocimiento*, parten del concepto de *transposición didáctica* definido por Chevallard (1997). El concepto hace referencia al proceso mediante el cual se pasa del conocimiento científico a la ciencia que va a ser enseñada en la escuela. Generalmente, esta última viene establecida por ley en el currículo oficial. Sin embargo, dicho currículo sólo es una referencia para el profesor, ya que es él quien debe reorganizar el conocimiento propuesto y descomponerlo mediante tareas específicas para su enseñanza en el aula. Por esta razón, consideran fundamental conocer los resultados de la investigación didáctica relativa a la enseñanza del tópico en cuestión. Además, dentro de la hipótesis sobre el conocimiento, distinguen dos hipótesis complementarias:

– *Hipótesis sobre modelización*. Sugiere que las teorías y modelos se introduzcan con un nivel de profundización coherente con la edad y/o desarrollo cognitivo de los alumnos. Igualmente, las tareas deben ser diseñadas de modo que los alumnos puedan acceder al conocimiento, confrontando el suyo previo con el establecido por el ámbito científico.

– *Hipótesis sobre los registros semióticos*. En la enseñanza de las ciencias suelen emplearse diferentes registros semióticos: lenguaje cotidiano, lenguaje algebraico, gráficos, esquemas, etc. Por tanto, se debe descomponer el conocimiento científico en los diferentes registros semióticos, así como probar y decidir cuáles son los más adecuados para el nivel educativo y/o grupo clase en cuestión, para lo cual se debe procurar anticipar las posibles dificultades de los alumnos en relación con cada uno de ellos.

Con respecto a la *hipótesis sobre el aprendizaje*, Buty y otros (2004) consideran que el diseño de una secuencia debe tomar como base la idea vigostkiana sobre *la zona de desarrollo próximo* del alumno. Es decir, la secuencia debe partir del conocimiento previo de los alumnos sobre el tópico y considerar qué posibilidades tienen de adquirir el nuevo conocimiento (aceptado científicamente), de acuerdo con su desarrollo cognitivo y con la ayuda del profesor. Para ello, los autores argumentan que la secuencia debe cubrir la «distancia» entre ese conocimiento previo y el conocimiento científico que va a ser enseñado. En este propósito será importante establecer las ideas y/o conceptos clave («nociones fundadoras»), a partir de los cuales se va a desarrollar la nueva trama conceptual.

Finalmente, cuando estos autores hablan de la *hipótesis didáctica*, se refieren a los factores y circunstancias que influyen en la implementación de una propuesta de enseñanza en el aula. Destacan, entre otros aspectos, que la implementación de la propuesta será más satisfactoria en la medida en que los alumnos se impliquen activamente en su estudio; lo cual, lógicamente, exige el empleo de estrategias didácticas motivadoras. En la actualidad, la estrategia didáctica que parece más efectiva, entre otras cosas porque estimula la participación del alumnado, es la que plantea el aprendizaje como una actividad investigadora (Cañal, 2007; Rocard et al., 2007), orientada por el profesor conforme a las características (cognitivas, contextuales, etc.) de su alumnado.

Con todo, nuestra propuesta de enseñanza de nociones de FS en la ESO parte de las siguientes hipótesis:

1. Los alumnos a priori pueden activar ideas inadecuadas sobre FS, más aún si no han estudiado el tópico con anterioridad.
2. Al no encontrar en la literatura estudios precedentes relativos al aprendizaje de FS en secundaria, es conveniente realizar una investigación piloto, que proporcione datos y conclusiones acerca de la viabilidad de su enseñanza en dicha etapa. Esos resultados serán el punto de arranque para la elaboración de una propuesta didáctica fundamentada sobre el tópico para la ESO.
3. La *transposición didáctica* de la FS al nivel de ESO debe hacerse de manera que los conceptos del tópico conecten adecuadamente con los ya incluidos en el currículo de física y química de la etapa; concretamente, con los dedicados al estudio de la materia y la electricidad; con lo cual, aquellos conceptos de FS que no puedan ser construidos directamente a partir de tales contenidos serán excluidos de los objetivos de aprendizaje. Ello plantea la necesidad de establecer los conceptos clave de electricidad y materia, que constituirán los pilares esenciales para el nuevo aprendizaje. Asimismo, los modelos y registros semióticos que se introduzcan deben estar en sintonía con las características de los alumnos de la etapa.
4. Para motivar a los alumnos al estudio de nociones de FS, antes debemos darles buenas razones sobre la

importancia de los materiales semiconductores en el desarrollo de la electrónica. Además, las tareas que se propongan deben ser lo más sugerentes posible, con el fin de atraer la atención del alumno hacia su estudio. Un buen modo de lograrlo es mediante el diseño de una secuencia de enseñanza que impulse el aprendizaje por investigación.

5. La introducción de FS requiere reestructurar la programación de la asignatura, sin menoscabo del resto de contenidos, y dentro del horario lectivo disponible. Esto se puede hacer seleccionando sólo aquellos contenidos sobre materia y electricidad que sean imprescindibles para el aprendizaje del nuevo tópico. Hay que tener en cuenta el carácter abierto del currículo, y que el profesor es quien debe concretar los objetivos de aprendizaje que estime más oportuno conforme a su contexto. Ante esta situación, no obstante, cabe la posibilidad de que los contenidos no seleccionados sobre materia y electricidad, en esta ocasión, sean tratados en otro momento.¹

6. Para que la enseñanza de la FS sea lo más efectiva posible, es necesario que exista una adecuada coordinación entre los profesores de física y química y de tecnología. Ambos deben delimitar lo que va a ser enseñado sobre semiconductores en cada una de las materias y, a la vez, establecer una conexión directa entre los contenidos de cada una.

3. OBSTÁCULOS DE APRENDIZAJE DE ALUMNOS DE ESO SOBRE FS E IDENTIFICACIÓN DE LA DEMANDA DE APRENDIZAJE

Como ya hemos dicho, al comienzo del proyecto realizamos un estudio piloto², mediante una secuencia de enseñanza experimental (García-Carmona y Criado, 2009), a fin de obtener unos primeros datos sobre la comprensión y obstáculos de aprendizaje de alumnos de ESO, en relación con el tema. Su conocimiento nos permitió determinar la demanda de aprendizaje, que serviría de guía para el diseño de una propuesta didáctica más fundamentada. En lo que sigue describimos brevemente los resultados y conclusiones de dicho estudio.

Sobre el comportamiento de los semiconductores con la temperatura, un primer obstáculo es que los alumnos consideran que el comportamiento eléctrico intermedio de los semiconductores, a temperatura ambiente, se debe a que tienen simultáneamente propiedades de conductores y aislantes (mitad conductor y mitad aislante). La superación de este obstáculo es posible si los alumnos logran comprender que el comportamiento eléctrico de los semiconductores —como en el resto de materiales— depende de su estructura y composición química. Y que éstas pueden modificar sus propiedades ante cambios de temperatura, dando lugar a un comportamiento eléctrico u otro. Por tanto, como prerrequisito, es conveniente que los alumnos adquieran una idea básica del enlace covalente en sólidos, la energía de ionización y la teoría cinética aplicada a los sólidos.

Otro obstáculo se refiere a la relación causa-efecto entre la temperatura y la resistividad de un semiconductor. Algunos alumnos llegan a creer que, en este material, los cambios de temperatura vienen determinados por cambios de la resistividad. Esta confusión podría evitarse si los alumnos, primero, entienden la resistividad como la dificultad que tiene un material para conducir electricidad a causa de su estructura interna; luego, que el estado de agitación de los átomos de esa estructura, y la cantidad de portadores de carga, varía con la temperatura a la que éste se encuentre. Ello puede ser abordado con ayuda de la teoría cinética aplicada a sólidos (covalentes, en este caso) y el concepto de energía de ionización, ambos incluidos en el currículo de física y química de la ESO.

Los alumnos llegan a entender la generación y recombinación de pares electrón-hueco en un semiconductor; también, que los huecos (vacantes de la red cristalina, originadas por los electrones liberados de los enlaces), tras continuos procesos de generación y recombinación, «parecen» moverse por el material en sentido contrario al de los electrones libres. La dificultad surge cuando a esos huecos se les adjudican propiedades corpusculares, como que tienen carga eléctrica positiva. Algunos alumnos no llegan a asimilar que a un *hueco* (una «ausencia de algo») se le adjudiquen propiedades que corresponden a las partículas (reales). Además de ello, otros obstáculos frecuentes, en relación con el concepto, son:

- Creer que un *hueco*, en el proceso de recombinación, es una especie de «funda» permanente de electrones, que adquiere la carga del electrón que llega a «ocuparlo».
- Tener en cuenta los huecos para determinar si un semiconductor es o no eléctricamente neutro, como si fuesen cargas positivas reales.
- Considerar la *recombinación* como una atracción electrostática de cargas de signos opuestos (entre huecos y electrones libres).

Ante esto, lo primero que debemos hacer es intentar que el alumno entienda que el concepto de hueco surge como consecuencia del modelo científico que se emplea en el estudio de los semiconductores. Y, a continuación, ponerle de manifiesto su utilidad para comprender el comportamiento eléctrico de dichos materiales. Como veremos después, habrá que plantear las estrategias didácticas oportunas que permitan al alumnado de ESO adquirir una primera idea del concepto.

Respecto a los semiconductores extrínsecos, encontramos varios obstáculos de aprendizaje, algunos de los cuales tienen su origen en la inadecuada comprensión del concepto de hueco. Estos obstáculos son los siguientes:

- Los huecos son considerados como «defectos» de la red cristalina del semiconductor y, en consecuencia, las impurezas donadoras son introducidas a fin de corregir tales defectos.
- Se identifica una impureza donadora (átomo pentavalente) con un electrón, y una impureza aceptora (átomo trivalente) con un hueco.

- Un semiconductor extrínseco deja de ser eléctricamente neutro porque ya no tiene el mismo número de electrones libres y de huecos, de forma que los semiconductores tipo p están cargados positivamente, y los de tipo n, negativamente. En definitiva, se pone de manifiesto que los huecos se confunden con protones.

Evitar estos últimos obstáculos, además de prestar una especial atención al concepto de hueco, requiere hacer énfasis en que las impurezas con las que son dopados los semiconductores son átomos; en que éstos son eléctricamente neutros, y, por tanto, no alterarán el estado eléctrico del semiconductor.

4. TRATAMIENTO DIDÁCTICO Y OBJETIVOS PARA UNA PRIMERA INTRODUCCIÓN A LA FS

Una vez identificada la demanda de aprendizaje, pasamos a describir nuestra *transposición didáctica* del tópico al nivel de ESO. Mostraremos las partes en las que se desarrolla la propuesta y, en cada una, indicamos cómo se puede pasar del conocimiento científico a la ciencia escolar que va a ser enseñada en esta etapa. Esto es, para cada contenido, partimos de los conceptos o fenómenos científicos del tópico, y luego localizamos aquellos contenidos del currículo de física y química que, a nuestro entender, tienen relación con los mismos. A continuación, indicamos lo que los alumnos ya saben –o, al menos, ya han estudiado– sobre dichos contenidos de referencia; y terminamos proponiendo los contenidos que pueden ser enseñados en la etapa, junto con los objetivos de aprendizaje.

4.1. ¿Qué presencia tienen los semiconductores en nuestra vida cotidiana?

Antes de iniciar el estudio de conceptos, habría que motivar al alumnado en el aprendizaje de nociones de FS, tratando, por ejemplo, de que entiendan la importancia de los materiales semiconductores en el desarrollo de la electrónica. Por tanto, lo que intentamos en la parte introductoria es que los alumnos sientan curiosidad por conocer por qué los semiconductores son tan especiales, y qué conceptos y leyes científicas pueden explicarlo.

Un modo de abordar esto en clase podría ser planteando a los alumnos preguntas como, por ejemplo:

- *¿Qué diferencias encuentras entre las calculadoras, ordenadores y demás aparatos electrónicos que utilizas actualmente, con los que utilizaban tus padres cuando tenían tu edad? ¿Cuál ha sido la evolución? ¿A qué crees que ha sido debido?*
- *¿Sabes con qué materiales se fabrican los circuitos electrónicos de los teléfonos móviles, calculadoras, relojes digitales, videoconsolas, etc.?*
- *¿Has oído hablar de los semiconductores? ¿Sabes algo de ellos?*

Con objeto de ayudar al alumnado a responder estas preguntas, se les puede sugerir que: *a)* consulten enciclopedias, libros de divulgación o webs dedicadas a instrumentos antiguos y modernos de electricidad/electrónica; *b)* visiten algún museo de ciencia donde haya exposiciones de aparatos electrónicos antiguos; *c)* pregunten a sus familiares, con más edad que ellos, porque tienen visión más amplia en el tiempo al haber percibido la gran evolución de los aparatos electrónicos en las últimas décadas.

También se pueden leer en clase artículos de divulgación científica, inteligibles para alumnos de ESO, dedicados al reconocimiento de la contribución de los semiconductores al desarrollo de la electrónica. Igualmente, se pueden plantear debates y reflexiones acerca de cómo los avances científico-tecnológicos, ligados a los semiconductores, han contribuido al avance de los dispositivos electrónicos, y ello, a su vez, a nuestro estilo de vida (uso de teléfonos móviles, reproductores MP3-4, etc.).

Este planteamiento inicial es uno de tantos posibles, pues ello debe estar abierto a la creatividad y recursos de cada profesor. También puede ser planteado en clase de tecnología, dentro de la unidad dedicada a la electrónica, estableciendo una adecuada coordinación entre el profesor de dicha área y el profesor de física y química. En cualquier caso, el propósito es motivar a los alumnos al aprendizaje de algunos de los conceptos y fenómenos que se manifiestan en los semiconductores.

4.2. ¿A qué llamamos semiconductores? ¿Qué materiales son semiconductores? ¿Cómo se explica su comportamiento eléctrico a escala microscópica?

Una vez puesta de manifiesto la importancia de los semiconductores, se introduce el contenido conceptual, comenzando por los *semiconductores intrínsecos*.

Definición de semiconductor intrínseco

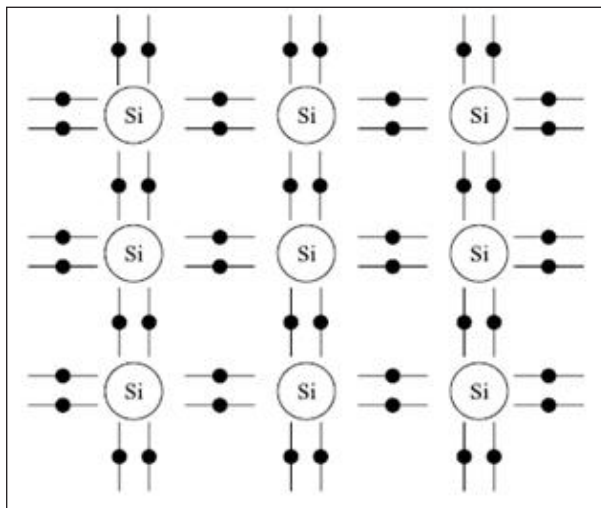
Los alumnos de 14-15 años ya manejan la tabla periódica de los elementos, analizan las principales propiedades de los elementos representativos y distinguen entre metales y no metales. Asimismo, ya saben que los materiales metálicos son conductores de la electricidad, y los no metálicos, aislantes. En este contexto, se hace alusión a los elementos semimetálicos como aquellos que poseen propiedades intermedias a los metales y no metales. Esto permite introducir el concepto de semiconductor intrínseco (puro) como aquel material compuesto por un semimetal, normalmente de Si o Ge, que a temperatura ambiente posee propiedades eléctricas intermedias a los materiales conductores y aislantes típicos.

Estructura interna de un semiconductor intrínseco

La comprensión de la estructura interna de un semiconductor (sustancia sólida covalente) requiere que los alumnos tengan una idea aproximada del enlace químico,

particularmente del covalente, y del papel jugado por los electrones de valencia en la formación de los mismos. El propósito es que asocien la capacidad de los sólidos de conducir electricidad con la cantidad de electrones libres que puedan llegar a tener.

Figura 1
Modelo bidimensional de la estructura covalente de un semiconductor intrínseco de Si/Ge.



En la ESO, el enlace covalente suele abordarse desde una perspectiva clásica basada en la regla del octeto de Lewis. Esta regla tiene sus limitaciones, principalmente por las excepciones que presenta, por lo que puede generar ideas inadecuadas en el alumnado (Levy et al., 2004). Sin embargo, es bastante intuitivo y eso la hace especialmente útil para hacer una primera introducción al enlace químico (García-Carmona, 2006b; Coll y Treaugust, 2003). Consecuentemente, un modo de representar la estructura covalente atómica de un semiconductor intrínseco es el modelo plano de la figura 1. Se trata de un modelo clásico, bastante simplificado, que permite ofrecer una primera idea de la estructura de estos materiales en la ESO (García-Carmona, 2006a). En sintonía con Tsaparlis y Papaphotis (2002), el uso de modelos más complejos, basados en la teoría cuántica, como el de bandas de energía, suele suponer un obstáculo añadido para los alumnos de esta etapa. Este hecho se corrobora, además, con los hallazgos de una investigación reciente (Wittmann, Steinberg y Redish, 2002), que indican las dificultades que este último modelo plantea, incluso, a alumnos universitarios.

Con el modelo de la figura 1, los alumnos pueden comprobar, con relativa facilidad, que cada átomo del semiconductor representado es estable, al compartir sus 4 electrones de valencia con los 4 átomos vecinos más próximos, alcanzando así la configuración electrónica de gas noble.

Comportamiento eléctrico de un semiconductor intrínseco

La *resistencia eléctrica*, como magnitud que da cuenta de la oposición de los materiales al paso de corriente eléctrica, suele ser bien asimilado por los alumnos; pero, el concepto de *resistividad eléctrica* genera más dificultades de comprensión. García-Carmona (2006c) ha comprobado, por ejemplo, que alumnos de ESO creen que la pérdida de conducción eléctrica de un metal (aumento de su resistividad), a altas temperaturas, se debe a un «efecto de compensación» por el cual «los electrones reducen su movilidad, a fin de intentar evitar el calentamiento del metal».

Si bien el concepto de resistividad es esencial en FS, como primera aproximación, en la ESO el concepto puede ser introducido como una característica propia de cada tipo de material (determinada por su estructura y composición química), independiente de sus dimensiones, que da idea de su oposición intrínseca al paso de corriente eléctrica (Pierret, 1994). Además, habría que añadir que el valor de la resistividad varía según la temperatura del material. La influencia de la temperatura sobre la resistividad de los materiales puede ser comprendida a partir de la teoría cinética y del concepto de energía de ionización, en los términos provistos para la ESO. En la literatura existen numerosos trabajos dedicados a las dificultades de aprendizaje de los alumnos de secundaria sobre la teoría cinética. Benarroch (2001) las sintetiza en: a) una tendencia a imaginar la materia en términos macroscópicos, en vez de hacerlo a partir de su carácter discontinuo; b) una tendencia a trasladar las propiedades macroscópicas de un sistema hacia las microscópicas; c) la conceptualización, en el mejor de los casos, de un modelo corpuscular estático, si bien, respecto a esta última, algunos estudios (Domínguez, De Pro y García-Rodeja, 1998; Gómez-Crespo, Pozo y Gutiérrez, 2004) revelan que alumnos de ESO llegan a asociar la agitación de las partículas de un material con su temperatura.

El concepto de *energía de ionización* suele generar dificultades de comprensión en los alumnos de distintas etapas educativas (Taber, 2003). Consecuentemente, en la ESO creemos suficiente definirla como la energía necesaria para liberar electrones de valencia de sus enlaces, sin distinguir si se trata de la 1.^a, 2.^a, 3.^a... energía de ionización.³

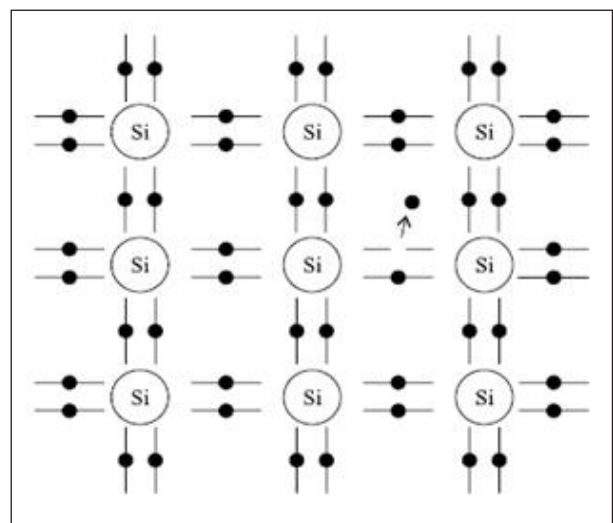
En función de los dos conceptos anteriores, los alumnos pueden adquirir una primera idea de por qué la resistividad de un material metálico (conductor) aumenta con la temperatura, y, sin embargo, en un semiconductor ocurre lo contrario. Lo que se espera es que comprendan que los metales (materiales con bastantes electrones libres a bajas temperaturas) se convierten en malos conductores de la electricidad a altas temperaturas, porque los átomos de la red aumentan su estado de vibración en torno a sus posiciones de equilibrio, obstaculizando así el movimiento de la gran cantidad de electrones libres del material. Sin embargo, en los semiconductores (sólidos covalentes) un aumento de temperatura produce rupturas en sus enlaces y, en consecuencia, la liberación de electrones de valencia —cuando adquieren la energía de ionización—, los cuales estarán dispuestos a formar una corriente eléctrica en

el momento en que sea aplicado un voltaje, lo que explica la disminución de resistividad en los semiconductores al subir la temperatura.

Lo dicho sobre la liberación de electrones de la red covalente de un semiconductor permite hacer una primera introducción al concepto de *hueco*. Con el modelo clásico y simplificado de semiconductor empleado, un hueco puede ser definido como la vacante que deja un electrón de valencia liberado de un enlace (Pierret, 1994). Asimismo, la teoría cinética y el concepto de energía de ionización permiten hacer una primera introducción a dos procesos esenciales en FS: la *generación* y la *recombinación de pares electrón-hueco*. El propósito es que los alumnos entiendan que cuando los electrones de enlace, compartidos por los átomos de la red, adquieren la suficiente energía (de ionización) para romper el enlace, se convierten en electrones libres dejando las correspondientes vacantes (huecos) en la red (Figura 2). Suele ser relativamente fácil para los alumnos deducir que por cada electrón liberado de la red aparece un hueco; y que en un semiconductor puro siempre existirá el mismo número de electrones libres y huecos.

Asumiendo que los alumnos ya tienen en mente que un material es buen conductor si tiene muchos electrones libres, se espera que comprendan que la generación de muchos pares electrón-hueco convierta al semiconductor en un buen conductor de electricidad. No obstante, conviene matizar que la temperatura necesaria para romper los enlaces covalentes del semiconductor y convertirlo en buen conductor de la electricidad es realmente grande (en torno a 600 K para el Si). De modo que decir que «la conducción eléctrica de los semiconductores aumenta con la temperatura», sin más, debe entenderse como una simplificación que hacemos dentro del carácter introductorio de la propuesta.

Figura 2
Generación de un par electrón-hueco.



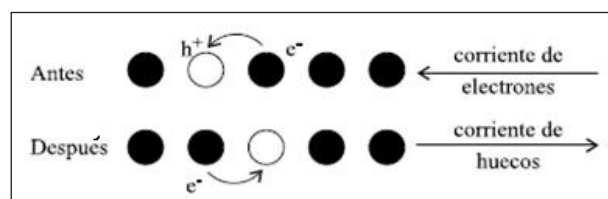
En este contexto se puede hacer alusión a la aplicación de los semiconductores en la generación de energía fotovoltaica. Se intenta que los alumnos adquieran una idea básica de la aplicación, llegando a entender –como primera aproximación⁴– que la luz solar proporciona la energía de ionización necesaria para liberar electrones de la estructura covalente, que pueden formar parte de una corriente eléctrica.

Respecto al proceso de recombinación de pares electrón-hueco, el objetivo es que los alumnos entiendan que los electrones libres pierden parte de su energía debido a los múltiples choques con la red cristalina del semiconductor. Por tanto, vuelven a caer sobre la red, ocupando los huecos dejados por otros electrones liberados y quedando enlazados nuevamente.

Portadores de carga de un semiconductor: electrones y huecos

Los alumnos de 14-15 años ya tienen una primera idea de la ley de Ohm, y de las magnitudes físicas que se relacionan en dicha ley (intensidad, voltaje y resistencia eléctrica). También han estudiado que los portadores de carga eléctrica en los conductores son los electrones. El aspecto novedoso que se introduce con los semiconductores es que, además de los electrones, existe otro tipo de portador de carga: el *hueco*.

Figura 3
Movimiento de electrones y huecos en un semiconductor.



Antes hemos definido el hueco como la vacante que deja un electrón liberado de la red covalente del semiconductor. Además de esto, en FS a un hueco se le adjudican una serie de propiedades corpusculares, con el fin de hacer más fácil la comprensión de la conducción eléctrica en estos materiales. Los huecos se comportan como partículas con las mismas propiedades que los electrones libres, pero con carga positiva, de modo que si se aplica un voltaje al semiconductor, los huecos «generan» una corriente eléctrica positiva que circulará en sentido opuesto a la producida por los electrones (Figura 3).

Al principio, el concepto de hueco suele ocasionar dificultades de comprensión a los alumnos de ESO; principalmente, porque su sentido común les puede inducir a rechazar que algo «vacío» funcione como una carga eléctrica (García-Carmona, 2007). Después de todo, como señala van Zeghbroeck (2004), los electrones son los únicos portadores de carga reales en un semiconductor. En efecto, los huecos sólo existen dentro de un

semiconductor, y, a diferencia de los electrones, nunca podremos extraerlos del material. Pierret (1994) argumenta que este tipo de conflictos mentales suelen ser consecuencia de las imperfecciones, o limitaciones, que tienen los modelos que utilizamos en ciencias. Sin embargo, en la enseñanza de las ciencias tenemos que tener en cuenta dichas limitaciones, y tratar de buscar las formas más adecuadas para que los conceptos puedan ser comprendidos por los alumnos.

Mediante el uso complementario de analogías, los alumnos de ESO pueden adquirir una idea aproximada del concepto de hueco. Imaginemos, por ejemplo, que tenemos seis vasos y cinco bolas. Disponemos en línea los vasos, e introducimos las cinco bolas en los primeros cinco vasos, dejando el primer vaso vacío, situado más a la izquierda. Ahora movemos la bola del segundo vaso hacia el primero, la bola del tercero hacia el segundo vaso que ha quedado vacío, y así sucesivamente. La impresión es que el vaso vacío (hueco) parece moverse de izquierda a derecha, es decir, en sentido contrario al movimiento de las bolas (electrones). Lógicamente, este movimiento es posible porque hay diferente número de vasos (huecos) y bolas (electrones); por tanto, si se opta por emplear la analogía, será conveniente hablar de sus limitaciones y aclarar que no es realmente válida para representar a un semiconductor intrínseco (puro).

Hemos dicho que la concepción de un hueco como portador de carga eléctrica es consecuencia de los modelos que se utilizan para facilitar la comprensión del comportamiento eléctrico de los semiconductores, lo que es fácilmente justificable cuando se emplea el modelo de bandas de energía⁵. Sin embargo, en el contexto del modelo clásico bidimensional de semiconductor, podemos utilizar la analogía anterior para justificar la utilidad del concepto de hueco. Imaginemos ahora que tenemos muchos vasos vacíos y sólo unas pocas bolas que se mueven continuamente saltando de unos vasos a otros. En este caso, es fácil seguir el movimiento de las bolas (electrones). Pero, si lo que hay son muchas bolas y sólo unos cuantos vasos vacíos, es más eficaz seguir qué vasos quedan vacíos en cada momento (huecos) que intentar llevar un registro del movimiento de todas las bolas.

Como se ha comentado, la asignación de una carga positiva a los huecos suele producir conflictos cognitivos en los alumnos, porque pueden confundirlos con protones. En este sentido, es preciso incidir en que: 1) los protones son cargas reales y los huecos no, y 2) los huecos pueden moverse y generar una corriente eléctrica positiva, mientras que los protones no, al encontrarse en el interior del núcleo atómico.

Asimismo, a fin de evitar que en los alumnos la idea de que el proceso de recombinación se debe a una atracción electrostática entre un hueco y un electrón, se puede analizar con ellos lo que ocurre con la energía de un «objeto» tras sufrir numerosos choques en su camino. La finalidad es que lleguen a entender que los electrones libres van perdiendo parte de su energía por los múltiples choques con los átomos de la red, y terminan «cayendo» sobre los huecos, creados por otros electrones liberados.

Habría que dedicar, por tanto, un tiempo a hacer ver al alumno que decisiones como la de adjudicar propiedades corpusculares a los huecos son frecuentes en ciencia, sobre todo cuando se construyen modelos para intentar explicar «lo que no podemos observar a simple vista» (fenómenos microscópicos), pero que sabemos de su manifestación. Se les puede evocar, en este sentido, que en cursos anteriores ya han empleado modelos –principalmente analógicos– cuando han abordado el estudio de la materia, con expresiones como: «los átomos son “bolitas”», en el modelo atómico de Dalton; «el núcleo es como el Sol y los electrones como los planetas», en el modelo atómico de Rutherford, o «los átomos son los “ladrillos” que constituyen la materia».

4.3. ¿Cómo pueden ser modificados los semiconductores para mejorar sus propiedades eléctricas/electrónicas?

Una vez que han sido tratados los semiconductores puros (intrínsecos), se introducen los *semiconductores extrínsecos*. Se puede comenzar haciendo alusión a las limitaciones de los primeros, como que sólo conducen bien la electricidad a altas temperaturas. Por tanto, se trata de poner de relieve la idea de que los científicos y tecnólogos, que diseñan dispositivos electrónicos, se plantean la necesidad de manipular de algún modo estos materiales, con el propósito de mejorar sus prestaciones. Por ejemplo, conseguir que estos materiales conduzcan bien la electricidad a temperatura ambiente. Surge así el concepto de semiconductor extrínseco.

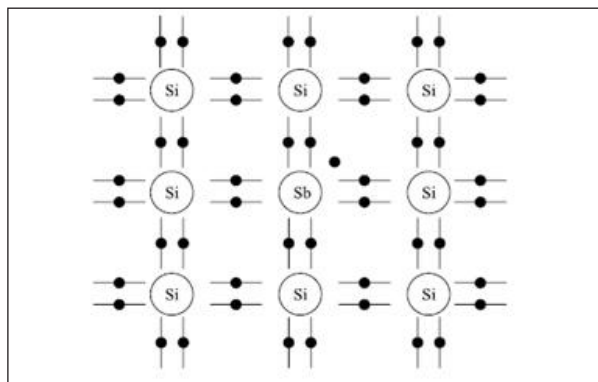
Aprovechando que los alumnos de ESO ya distinguen las sustancias puras de las impuras, el semiconductor extrínseco puede ser definido como aquel que ha sido dopado con impurezas, a fin de mejorar su conducción eléctrica sin aumentarle la temperatura.⁶

Antes de abordar el proceso de dopado de un semiconductor, se puede preguntar a los alumnos si han oído antes la palabra dopado (es posible que la hayan oído en el ámbito del deporte). En el momento que tienen una idea general de lo que es «dopar», se les plantea si saben qué impurezas habría que introducir a un semiconductor para modificar su número de portadores de carga (electrones o huecos). Para ayudarles a responder se les puede dar la pista de que los portadores procederán de los electrones de valencia de los átomos introducidos. Lo que se espera es que lleguen a la conclusión de que el dopado de un semiconductor consiste en introducirle átomos de otros elementos diferentes y que, por tanto, tendrán diferente número de electrones de valencia que el Si/Ge. Los alumnos de ESO suelen entender sin mucha dificultad que así el semiconductor se convierte en una sustancia impura (semiconductor extrínseco).

Una vez que los alumnos llegan a asociar el proceso de dopado con la introducción de átomos extraños, se les cuestiona si sería lógico que se introdujese cualquier tipo de átomos o si debe haber algún tipo de restricción. Se les puede dar una primera pista: que los átomos introducidos no rompan, o no alteren significativamente, la

estructura cristalina del material. Con ello se intenta que deduzcan que las impurezas introducidas deben tener un tamaño similar al de los átomos del semiconductor (Si/Ge). Luego se les sigue dando pistas que les ayuden a concluir que ello se consigue introduciendo átomos pentavalentes o trivalentes, es decir, con un electrón de valencia más o menos, respectivamente, que el Si/Ge (átomo tetravalente).

Figura 4
Generación de un electrón libre mediante la introducción de una impureza donadora.



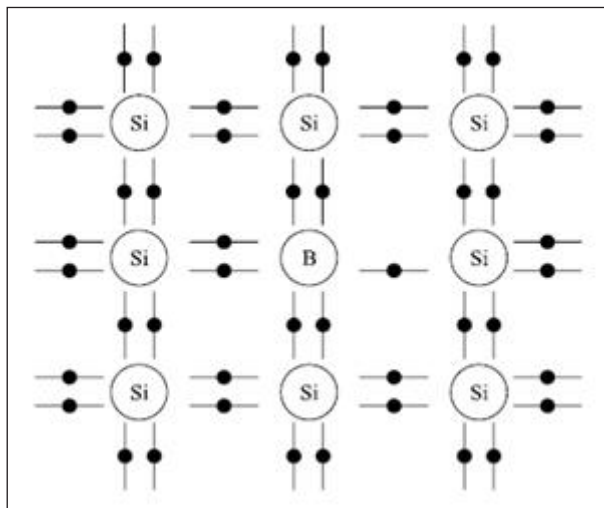
Después de que se hayan identificado las impurezas con las que suelen ser dopados los semiconductores, el objetivo es entender qué consecuencias tienen éstas en el comportamiento eléctrico de los mismos, lo que puede conseguirse mediante el modelo/esquema bidimensional de semiconductor definido, y la regla del octeto. Cuestionando a los alumnos qué ocurre si a un semiconductor de Si/Ge le es introducido un átomo pentavalente, por ejemplo de Sb (Figura 4), se espera que comprueben que tal impureza comparte cuatro de sus electrones de valencia con cada uno de los cuatro átomos de Si/Ge vecinos, quedándole uno de sus electrones desapareado. Luego se plantearía la siguiente pregunta genérica: ese electrón que «sobra», al no estar implicado en el enlace covalente, ¿requiere una energía de liberación igual que la requerida para romper un enlace covalente? Si es necesario, se aporta la información de que incluso a temperatura ambiente dicho electrón puede adquirir la energía suficiente para convertirse en un electrón libre. El propósito es que los alumnos entiendan que con la introducción de átomos pentavalentes en un semiconductor, se consigue tener electrones libres sin sus correspondientes huecos; con lo cual, si se aplica un voltaje, la corriente debida a electrones será mayor que la debida a huecos.

A continuación se puede pedir a los alumnos que investiguen cómo se denominan las impurezas que generan electrones libres en un semiconductor, sin los correspondientes huecos. La intención es que concluyan que dichas impurezas se denominan impurezas donadoras (átomos pentavalentes). Esto permite, además, definir el concepto de semiconductor extrínseco tipo n (de ne-

gativo) como aquel que ha sido dopado con impurezas donadoras y que, por tanto, tiene a los electrones como portadores de carga mayoritarios.

De forma análoga a lo anterior, se pide a los alumnos que analicen qué ocurre cuando se dopa un semiconductor con átomos trivalentes. Se espera que deduzcan que el átomo «extraño» (impureza) no posee el número suficiente de electrones de valencia para completar los cuatro enlaces covalentes. Consecuentemente, surge un hueco en uno de los enlaces (Figura 5), sin que haya sido liberado un electrón. Igualmente, se les pedirá que investiguen cómo se denominan las impurezas que aportan huecos a los semiconductores, sin que lleve aparejado la liberación de un electrón. En este caso, se espera que encuentren que éstas son denominadas impurezasceptoras (átomos trivalentes). En definitiva, lo que se pretende es que lleguen a comprender que el dopado de un semiconductor con impurezasceptoras aumenta la concentración de huecos respecto a la de electrones. Asimismo, que los portadores de carga mayoritarios son los huecos (positivos) y que, por ello, al semiconductor se le denomina extrínseco tipo p (de positivo).⁷

Figura 5
Generación de un hueco mediante la introducción de una impureza aceptora.



Como posibles dificultades de comprensión, anticipamos que el hecho de que en los semiconductores extrínsecos existan distintas cantidades de electrones libres y huecos puede hacer pensar a los alumnos que no son eléctricamente neutros. En este sentido, se les puede preguntar cómo varía la cantidad de electrones y protones de un semiconductor cuando es dopado. Se intentaría reforzar así la idea de que las impurezas, tanto donadoras comoceptoras, insertadas en un semiconductor son átomos; por tanto, eléctricamente neutros (aportan el mismo número de electrones y protones), con lo que el semiconductor extrínseco también. Esto se puede conseguir incluyendo

alguna actividad donde se pida a los alumnos que hagan un balance de protones y electrones, en una porción de cierto material (homogéneo) donde existe cierta cantidad de átomos de dos tipos diferentes (como ocurre en un semiconductor extrínseco), y determinen si estaría o no cargado eléctricamente.

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Hemos planteado la posibilidad de integrar nociones de FS en el currículo de física y química de la ESO, a fin de complementar la enseñanza de la electrónica, actualmente abordada desde la materia de tecnología. El desarrollo de nuestra propuesta didáctica parte de la hipótesis de que con los contenidos sobre materia y electricidad, previstos en dicho currículo, y sin más que añadir unos pocos conceptos nuevos, es factible una primera introducción al tópico en la ESO. Así se pone de manifiesto en nuestro estudio piloto, donde observamos que los alumnos, sin grandes dificultades, logran entender: 1) la estructura interna de un semiconductor, en base a la teoría de Lewis; 2) los procesos de generación y recombinación de pares electrón-hueco; 3) la generación de electrones libres en un semiconductor mediante dopado con impurezas donadoras; y 4) el balance de portadores de carga en un semiconductor extrínseco.

Esto no quita, sin embargo, que puedan surgir concepciones alternativas, como que:

- Un semiconductor tiene simultáneamente propiedades de conductor y aislante.
- Un hueco es una funda del electrón.
- Los huecos participan en la neutralidad eléctrica de los semiconductores, como si fuesen cargas físicas (reales).
- El proceso de recombinación es una atracción electrostática entre un hueco y un electrón.
- Los huecos son defectos de la red cristalina de un semiconductor, y el dopado con impurezas donadoras tiene la finalidad de «repararlos».

Por tanto, la propuesta debe ser sometida a nuevos ensayos que arrojen mayor luz acerca de su viabilidad y eficacia. Porque es posible que las simplificaciones hechas en la transposición didáctica del tópico para dicho nivel puedan contribuir, de algún modo, al desarrollo de las concepciones alternativas anteriores. Hay que tener en cuenta que el tópico suele ser estudiado en la educación posobligatoria desde el dominio de la física cuántica, y nosotros lo hemos planteado desde una perspectiva clásica. También cabe preguntarse si el grado de abstracción de algunos de los conceptos tratados, como, por ejemplo, el de hueco, sobrepasa o no la capacidad habitual de un alumno de ESO, y que, por ello, a lo mejor es conveniente posponer su introducción a cursos superiores. Este tipo de preguntas son las que van a guiar nuestras futuras investigaciones, a fin de mejorar nuestro planteamiento didáctico sucesivamente.

Sabemos, igualmente, que la cantidad de contenidos propuestos es amplia, teniendo en cuenta las posibilidades reales de la asignatura de Física y Química en la ESO, sobre todo en el tercer curso (2 horas lectivas semanales), si bien, nos parece que de este modo se da un extenso margen para que luego cada profesor pueda delimitarlos según sus intereses y características de su alumnado.

Somos conscientes, además, de que la propuesta es una de tantas posibles, que surge de la inquietud y experiencia personal de un profesor investigador en su contexto educativo particular. Por tanto, deseamos que sea asumida como tal, y, consecuentemente, su desarrollo en cualquier otro contexto docente venga dado por las modificaciones y adaptaciones pertinentes. Lo que esperamos, en definitiva, es que otros profesores, con inquietudes parecidas a las nuestras, se animen a introducir el tópico en su contexto docente y consideren nuestra propuesta como un posible referente.

NOTAS

1. En nuestro caso, los contenidos sobre *materia y electricidad*, que no abordamos en 3.º de ESO, a consecuencia de la reestructuración de la programación, se integran en las asignaturas de Tecnología, del mismo curso, y de Física y Química de 4.º de ESO. En la primera, cuando se abordan los contenidos relativos a la *electricidad y electrónica* y a los *materiales*; y, en la segunda, en el contexto del estudio de la estructura y comportamiento de la materia.

2. El estudio piloto, de corte cualitativo, fue llevado a cabo con una muestra de 60 alumnos y alumnas, constituida por dos grupos naturales de 3.º de ESO (14-15 años). El proceso de enseñanza-aprendizaje se desarrolló mediante un programa de actividades, diseñadas y secuenciadas en consonancia con el modelo de aprendizaje socioconstructivista.

3. Obviamente, la diferenciación de las distintas energías de ionización de un elemento es lo que permite explicar por qué, por ejemplo, el cobre es mejor conductor que el sodio. Sin embargo, somos partidarios de posponer este tratamiento más profundo del concepto al nivel de bachillerato.

4. En la práctica, una célula fotovoltaica se fabrica con semiconductores extrínsecos, formando una unión p-n, a fin de activar su funcionamiento sin necesidad de alcanzar grandes temperaturas.

5. Se trata de una simplificación de la representación del aporte eléctrico colectivo de los electrones de la banda de valencia.

6. En general, lo que intentan los diseñadores de dispositivos electrónicos con el dopado de semiconductores es poder controlar a su antojo la conducción eléctrica en dichos materiales, y, con ello, lograr nuevas y mejores aplicaciones electrónicas, si bien, en esta introducción a los semiconductores extrínsecos en la ESO, pensamos que es suficiente que los alumnos entiendan que con el dopado se puede conseguir que un semiconductor conduzca bien la electricidad a temperatura ambiente, algo que no ocurre en un semiconductor intrínseco.

7. En la práctica interesan más los semiconductores tipo n, ya que tienen como portadores de carga mayoritarios a los electrones libres, los cuales tienen una mayor movilidad que los huecos (portadores mayoritarios en los semiconductores tipo p), aunque en nuestra propuesta de enseñanza no nos ocupamos de ello porque su justificación resultaría compleja para el nivel de ESO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENARROCH, A. (2001). Una interpretación del desarrollo cognoscitivo de los alumnos en el área de la naturaleza corpuscular de la materia. *Enseñanza de las Ciencias*, 19(1), pp. 123-134.
- BUTY, C., TIBERGHEN, A. y LE MARÉCHAL, J.F. (2004). Learning hypotheses and an associated tool to design and analyse teaching-learning sequences. *International Journal of Science Education*, 26(5), pp. 579-604.
- CANAL, P. (2007). La investigación escolar, hoy. *Alambique*, 52, pp. 9-19.
- CHEVALLARD, Y. (1997). *La transposición didáctica*. Buenos Aires: Aique.
- COLL, R.K. y TREAGUST, D.F. (2003). Investigation of secondary school, undergraduate, and graduate learners' mental models of ionic bonding. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(5), pp. 464-486.
- DOMÍNGUEZ, J.M., DE PRO, A. y GARCÍA-RODEJA, E. (1998). Las partículas de la materia y su utilización en el campo conceptual de *calor y temperatura*: un estudio transversal. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(3), pp. 461-475.
- GARCÍA-CARMONA, A. (2006a). Construcción de significados de física de semiconductores en educación secundaria: Fundamentos y resultados de una investigación. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 28(4), pp. 507-519.
- GARCÍA-CARMONA, A. (2006b). La estructura electrónica de los átomos en la escuela secundaria: un estudio de los niveles de comprensión. *Educación Química*, 17(4), pp. 414-423.
- GARCÍA-CARMONA, A. (2006c). Influencia de la temperatura en el comportamiento eléctrico de los materiales: Análisis de su comprensión y dificultades de aprendizaje. *Investigações em Ensino de Ciências*, 11(1), pp. 1-21. Disponible en <<http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>>.
- GARCÍA-CARMONA, A. (2007). Comprensión del concepto de hueco en física de semiconductores: resultados de un estudio con estudiantes de 14-15 años. *Revista Iberoamericana de Física*, 3(1), pp. 65-72.
- GARCÍA-CARMONA, A. y CRIADO, A.M. (2009). Introduction of semiconductor physics in secondary education: evaluation of a teaching sequence. *International Journal of Science Education*, 31(16), pp. 2205-2245.
- GÓMEZ-CRESPO, M.A., POZO, J.I. y GUTIÉRREZ, M.S. (2004). Enseñando a comprender la naturaleza de la materia: el diálogo entre la química y nuestros sentidos. *Educación Química*, 15(3), pp. 198-209.
- JENKINS, T. (2005). A brief history of... semiconductors. *Physics Education*, 40, pp. 430-439.
- LEACH, J. y SCOTT, P. (2002). Designing and evaluating science teaching sequences: an approach drawing upon the concept of learning demand and a social constructivist perspective on learning. *Studies in Science Education*, 38, pp. 115-142.
- LEVY, T., HOFSTEIN, A., MAMLOK-NAAMAN, R. y BARDOV, Z. (2004). Can final examinations amplify students' misconceptions in chemistry? *Chemistry Education: Research and Practice*, 5(3), pp. 301-325.
- LIJNSE, P. (2000). Didactics of science: the forgotten dimension in science education research?, en Millar, R., Leach, J. y Osborne, J. (eds.). *Improving Science Education: The Contribution of Research*, pp. 308-326. Buckingham: Open University Press.
- MÉNDEZ, E. (2000). La Era de la Información, al fin reconocida. Premio Nobel de Física 2000. *Revista Española de Física*, 14(4), pp. 64-66.
- PIERRET, R.F. (1994). *Semiconductor device fundamentals* (2.ª ed.). EE.UU.: Addison-Wesley.
- ROCARD, M., CSERMELY, P., JORDE, D., LENZEN, D., WALBERG-HENRIKSSON, H. y HEMMO, V. (2007). *Science education now: A renewed pedagogy for the future of Europe*. Bruselas: European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit.
- ROSADO, L. y GARCÍA-CARMONA, A. (2004). Física de semiconductores en la electrónica de la ESO: situación actual y perspectivas. En *XXI Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales*, pp. 265-272. San Sebastián: Universidad del País Vasco.
- ROSADO, L. y GARCÍA-CARMONA, A. (2005a). Some didactic and epistemological considerations for the introduction of basic knowledge on physics of semiconductors in secondary school. *Journal of Physics Teacher Education Online*, 3(1), pp. 21-24. Disponible en <<http://www.phy.ilstu.edu/jpteo>>.
- ROSADO, L. y GARCÍA-CARMONA, A. (2005b). Esquemas conceptuales de estudiantes de secundaria sobre el comportamiento físico de semiconductores extrínsecos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 22(3), pp. 338-363.
- TABER, K.S. (2003). Understanding ionization energy: physical, chemical and alternative conceptions. *Chemistry Education: Research and Practice*, 4, pp. 149-169.
- TSAPARLIS G. y PAPAPHOTIS, G. (2002). Quantum-chemical concepts: are they suitable for secondary students? *Chemistry Education: Research and Practice*, 3, pp. 129-144.
- VAN ZEGHBROECK, B. (2004). *Principles of semiconductor devices*. Disponible en <<http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/>>.
- WITTMANN, M.C., STEINBERG, R.N. y REDISH, E.F. (2002). Investigating student understanding of quantum physics: spontaneous models of conductivity. *American Journal of Physics*, 70(3), pp. 218-226.

[Artículo recibido en abril de 2008 y aceptado en octubre de 2008]

Semiconductor Physics in basic Electronics teaching: First steps of a didactic transposition process

GARCÍA-CARMONA, ANTONIO y CRIADO, ANA M.

Departamento de Didáctica de las Ciencias. Universidad de Sevilla

garcia-carmona@us.es

acriado@us.es

Summary

This paper proposes, as an educational innovation, the introduction of notions of Semiconductor Physics in Secondary Education, so that students at this stage may acquire a basic knowledge of the physical foundations of electronics.

The teaching proposal is based on the following hypotheses:

- *A priori* the students can activate inappropriate conceptions on semiconductor physics, because they have not studied the topic previously.
- Given that there are not previously studies on learning of Semiconductor Physics in Secondary Education, it is needed to carry out a pilot study to provide with data and conclusions about it. Those will be the point of beginning for designing a didactic proposal directed to teach the topic at this educational stage.
- The didactic transposition of Semiconductor Physics for the Secondary Education level must be done in such a way that the concepts of the topic connect appropriately with the physics and chemistry content established in the current science syllabus for this level. Therefore, those concepts of Semiconductor Physics which can not be constructed directly from the content of the syllabus will be excluded from the learning goals. Also, the models and semeiotic registers that are introduced must be in accordance with Secondary Education students' cognitive capacities.
- To motivate students in studying the basic notions of semiconductor physics, we must first give them good reasons for the importance of these materials in the development of Electronics. Besides the tasks proposed must be as appealing as possible, in order to attract the students' attention towards their study.

• The introduction to Semiconductor Physics requires reconstructing the planning of the subject without taking any of the rest of the content away, and staying within the available schedule of classes. This can be done by selecting only that content of matter and electricity which is indispensable for learning the new topic. The open nature of the syllabus has to be taken into consideration, and it is the teacher who will ultimately have to decide on the specific learning objectives that are most appropriate for his or her educational context.

From this study is concluded that students attained to understand: (1) The internal structure of semiconductor from Lewis' theory; (2) generation and recombination process of electron-hole pairs; (3) generation of free electrons by means of doping with donor impurities; and (4) balance among carrier of charge in a extrinsic semiconductor.

However it was not possible to avoid that students acquired the alternative conceptions following:

- Semiconductor materials have simultaneously the properties of conductors and of insulators [half conducting and half insulating].
- A hole is a sort of permanent 'holster' for an electron.
- Holes are taken into account when deciding whether or not a semiconductor is electrically neutral as if they were [real] physical charges.
- Recombination process is an electrostatic attraction between holes and free electrons.
- Holes are «defects» in the semiconductor's crystal lattice, and donor impurities are introduced in order to correct these defects.

Therefore, it is necessary to continue going deeper into the topic with new researches.