



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Traducción inglés-español y comentario de un texto académico para ingeniería (*Fundamentals of Microelectronics*)

English-Spanish translation and discussion of an academic text in engineering (*Fundamentals of Microelectronics*)

Autor/es

Julia López Cambra

Director/es

Ramón Plo Alastrué

Facultad de Filosofía y Letras
2016/2017

Índice

1	Introducción	3
2	Análisis del texto origen	5
2.1	Factores extratextuales	5
2.1.1	Dimensión comunicativa	5
2.1.2	Dimensión pragmática	6
2.1.3	Dimensión semiótica	7
2.2	Factores intratextuales	8
2.2.1	Aspectos macrotextuales	8
2.2.2	Aspectos microtextuales	9
3	Traducción	11
4	Análisis del proceso de traducción	41
4.1	Problemas y estrategias de traducción	41
4.1.1	Problemas lingüísticos	41
4.1.2	Problemas extralingüísticos	44
4.1.3	Problemas instrumentales	45
4.1.4	Problemas pragmáticos	45

ÍNDICE	2
5 Ficha documental	47
6 Glosario	53
7 Conclusión	55
Anexo 1: Texto original en inglés	61
Anexo 2: Texto final en español	81

1. Introducción

El objetivo de este trabajo es la traducción del inglés al español de un texto de temática científica-técnica. Existe una variedad de géneros entre los que se puede elegir dentro de este campo, que abarcan de lo menos a lo más especializado. Los textos más sencillos conceptualmente, pero posiblemente más complejos de trasladar cultural y estilísticamente, serían los de tipo divulgativo, dirigidos al público general. Los más especializados, que presentan mayor complejidad en el contenido, pero que cuentan con un estilo más uniforme y, habitualmente, más sencillo de imitar, serían los artículos científicos (comúnmente conocidos como *papers*).

El texto elegido se encuentra en un punto intermedio entre los dos extremos mencionados, si bien posiblemente se encuentra un poco más cercano a los más especializados. Se trata de un libro de texto de nivel universitario, titulado *Fundamentals of Microelectronics*, cuyo autor es Behzad Razavi. Consideramos que se encuentra en un nivel intermedio de especialización ya que, aunque presenta una cantidad de información destinada a crear expertos en la materia, nos la muestra de forma didáctica. Esto último es una característica que tiene en común con los textos divulgativos.

Debido a su extensión, resultaría del todo imposible traducirlo al completo. En este caso, hemos decidido traducir la mayor parte de la sección 2.1 del capítulo 2 (*Basic Physics of Semiconductors*), de modo que el texto a traducir tenga una extensión aproximada apropiada para un Trabajo de Fin de Máster. Esta sección contiene una parte introductoria, para después entrar en materia más especializada. Esto nos permitirá, como se explica más adelante, trabajar con diferentes registros para la introducción y para la parte más detallada. Hemos eliminado de

la traducción el apartado “Velocity Saturation” que, según se indica en el propio libro, se puede omitir en una primera lectura (por lo que no afecta a la continuidad del texto usado para la traducción).

2. Análisis del texto origen

Previamente a la traducción del texto, hacemos un análisis y reflexión de las características que lo definen. Esto ayudará a enfocar el proceso de traducción, nos servirá de guía para saber qué estilo, técnicas de traducción, etc. resultarán apropiados.

2.1. Factores extratextuales

En primer lugar se examina el contexto y los aspectos más generales de nuestro texto. Hatim y Mason (1990) utilizan el término “contexto” para referirse al “entorno extratextual que ejerce una influencia determinante en el lenguaje que se usa” (1995 [1990]: 302). Es decir, todos los textos están comprendidos dentro de un contexto concreto, y conocer éste será lo que nos permita adoptar una estrategia y métodos específicos en la tarea de traducción. Estos teóricos distinguen tres dimensiones interdependientes; la dimensión comunicativa, pragmática y semiótica, que se examinan a continuación.

2.1.1. Dimensión comunicativa

Hatim y Mason (1990) describen la dimensión comunicativa como el conjunto de aspectos que dependen del usuario (cuestiones geográficas, sociales, temporales, etc.) y del registro que utiliza.

El texto escogido es una sección de *Fundamentals of Microelectronics*, un libro de texto publicado por Behzad Razavi, un investigador estadounidense de origen

iraní, a través de la Universidad de California Los Ángeles. Se trata de un texto sin una localización geográfica clara, en cuanto a aspectos culturales, ya que trata un área de conocimiento, la electrónica, estudiada en todo el mundo, y el libro en sí es accesible desde cualquier lugar. El texto origen no incorporará una carga geográfica notable, a excepción de la ortografía propia del inglés estadounidense (por ejemplo, “neighbors”, “analyze”).

Examinamos el registro mediante las pautas de análisis que propone Suau (2010: 137), que se basan en las nociones de campo, modo y tenor. El campo, que ya se ha mencionado, es el de la especialización en electrónica; mientras que el tenor o tono es formal, donde el emisor es un experto en la materia que se dirige a los aprendices de la misma. El texto no muestra excesivas referencias al lector ni al emisor, ya que predomina la exposición de los conceptos que pretende enseñar. El modo se refiere al medio o canal usado para la comunicación, en este caso se refiere a su publicación y difusión escrita, y a la alta planificación y estructura con la que se ha elaborado el texto. El tenor describe el grado de formalidad del texto. En este caso, el autor no tiene necesidad de dirigirse al lector constantemente, aunque lo hace como recurso para resaltar algunas observaciones, y llamar su atención. Estas apelaciones en segunda persona se realizan de forma muy neutral, en buena parte porque el inglés no dispone de la distinción tú/usted, mientras que en español la propia elección de una de las dos formas ya define este rasgo.

Por otro lado, aunque también encontramos un nivel de especialización alto, el texto está destinado a enseñar, por lo que podemos observar cómo el nivel de dificultad del mismo comienza siendo bastante asequible, y pronto se incrementa tras exponer los primeros conceptos técnicos. En este sentido, el texto comienza compartiendo los rasgos propios de una divulgación científica, mientras que después se adentra en un lenguaje que, por un lado, es más complejo, aunque por otro sigue manteniendo un cariz didáctico (esto implica principalmente que las ideas y términos técnicos van acompañados de una explicación la primera vez que aparecen).

2.1.2. Dimensión pragmática

Continuando con la definición de Hatim y Mason, la dimensión pragmática representa la parte del contexto que guarda relación con la intencionalidad del autor.

El propósito del mismo, educativo e informativo, ha quedado ya claramente establecido.

En línea con esta intencionalidad del texto, predominan en él las funciones expositiva y, en menor medida, instructiva. Esta última se emplea principalmente en el caso de los ejercicios y problemas prácticos que se incluyen a lo largo de todo el libro.

También es importante resaltar que los conceptos se presentan empezando por lo más general, normalmente de forma más cualitativa, para pasar finalmente a los más específicos, de forma más detallada y cuantitativa. Esta progresión es un rasgo propio característico de este género, que podríamos clasificar como didáctico.

Por último, aunque se presentan muchos conceptos nuevos, debidamente introducidos y explicados, el libro sí da por sobreentendidas las nociones más básicas (es decir, no especializadas) de física y electrónica en las que se basa. Por ejemplo, el autor considera que el lector conoce los conceptos de “intensidad” y “voltaje”, o la “ley de Ohm”.

2.1.3. Dimensión semiótica

En último lugar, la dimensión semiótica trata la caracterización de la intertextualidad, y todos aquellos aspectos que supongan referencias culturales o a otros textos.

Esta dimensión englobaría, por ejemplo, las presuposiciones que asume el autor en cuanto a los conocimientos del lector. En general, no encontramos referencias a una “cultura” concreta, en el sentido habitual, sino a una “cultura científica”.

Ésta “cultura científica” englobaría las asunciones mencionadas (los conocimientos previos de los que debe disponer el lector). También forma parte de los costumbres de este colectivo el uso del sistema métrico decimal. Aunque en nuestro idioma se utiliza habitualmente, en textos en inglés puede resultar menos común. Sin embargo, es una práctica estándar en las áreas de la ciencia y la ingeniería, y es poco frecuente encontrar medidas en el sistema imperial. Por ejemplo, en el texto encontramos las unidades “electrons/cm³” y “holes/cm³”.

2.2. Factores intratextuales

2.2.1. Aspectos macrotextuales

En primer lugar se describen las características macrotextuales de nuestro texto, que analizan el texto en su conjunto.

Las nociones anteriormente mencionadas sobre el tema tratado, así como las presuposiciones de conocimientos previos que el autor ha visto necesarias, podrían formar parte también de este análisis.

Lo que más define a este texto es el cuidado que pone en exponer con claridad y coherencia. Utiliza un lenguaje preciso y “económico”, ya que trata de no extender cada explicación más de lo necesario para que resulte comprensible. Esto es así porque debe cubrir gran cantidad de conceptos, y posiblemente también para facilitar la comprensión y la atención de los estudiantes (el público objetivo).

En lo que se refiere a la organización del texto, hay que tener en cuenta que se trata de un documento muy extenso (aunque solamente traducimos un pequeño fragmento del mismo). Así pues, y también para facilitar el aprendizaje, el libro está organizado y dividido en capítulos y secciones (en otras palabras, se establecen varios niveles de división), de forma muy jerarquizada. Esto contribuye a la claridad y ordenación de la información presentada, además de que facilita mucho la consulta de partes puntuales del mismo. De hecho, el libro comienza con algunas ideas muy generales, y se mueve de lo menos a lo más específico, con cada capítulo apoyándose en las ideas de los anteriores.

Siguiendo con la idea de presentación de lo más general a lo más específico, cada capítulo comienza con una idea cualitativa y sencilla de lo que va a presentar, seguida de un análisis pormenorizado, que suele incluir desarrollos matemáticos y elementos visuales. Dichos elementos, llamados de forma genérica figuras (que pueden ser tablas, esquemas, gráficos, etc.), suelen ir enumerados en un índice al final del libro.

Tanto las ecuaciones como las figuras se presentan numeradas (en el caso de las figuras con un pie de foto explicativo), y a menudo se hace referencia a ellas en el texto, por lo que será necesario tener cuidado a la hora de trasladarlas. Por otro lado, las ecuaciones requieren de una presentación específica dentro del texto, y hay

dos maneras habituales de presentarlas: una es dentro de la misma línea de texto (es menos habitual, y no se emplea para resultados relevantes o que vayan a ser mencionados en otro punto del texto); mientras que la otra consiste en presentarla en una línea aparte (rompiendo visualmente el párrafo) con un espacio adecuado para separarla del texto, aunque sigue formando parte del mismo párrafo. Este método pretende colocar las ecuaciones en una posición destacada, que ayuda al lector a procesarlas con mayor claridad visual, además de hacer más fácil su localización de un vistazo.

Se trata de un texto con muy poco contenido subjetivo. Salvo algunas excepciones, en las que el autor hace énfasis en algunos puntos para apelar al lector a reflexionar sobre ciertos resultados (por ejemplo: “What happens to these electrons?”, “The above results seem quite strange”), el contenido es objetivo. El texto presenta conceptos ya asentados y aceptados por la comunidad científica, y por este motivo encontramos menos uso de elementos matizadores que, por ejemplo, en un artículo científico. El autor está “seguro” de lo que expone, por lo que no tiende a utilizar un lenguaje tentativo.

2.2.2. Aspectos microtextuales

En último lugar antes de abordar la traducción, examinamos algunos de los rasgos de estilo más característicos del texto. A nivel léxico, destaca el uso de terminología especializada, donde a cada término le corresponde en este contexto un significado muy concreto. De hecho, suele existir una relación unívoca entre cada término y su significado; en otras palabras, no cuentan con sinónimos. Durante la traducción será conveniente guardar la coherencia y utilizar de forma consistente los mismos equivalentes. Para ello elaboramos un pequeño glosario con los términos más relevantes y la traducción elegida.

En cuanto al nivel gramatical, el texto presenta algunas características propias de su género. Por ejemplo, son abundantes los usos de la forma pasiva (“a circuit can be analyzed”, “It can be proved that...”). Esto es, en general, más común en la lengua inglesa que en la española. Sin embargo, en este tipo de textos se da incluso con más frecuencia, ya que es una manera de impersonalizar su discurso. En la traducción, suele resolverse mediante el uso de la pasiva refleja.

La gran mayoría de los verbos que aparecen en el texto, incluyendo las pasivas

ya mencionadas, se encuentran en tiempo presente. En este caso, se utiliza este tiempo para expresar afirmaciones que son ciertas de forma atemporal (un ejemplo típico de este uso sería “Water boils at 100 °C”). Además, esta forma de presente va asociada en este caso con el uso de la tercera persona.

A lo largo del texto encontramos una cantidad considerable de apelaciones al lector, expresiones con las que el autor trata de realizar un pequeño acercamiento con este, así como llamar su atención. Estas se caracterizan por el uso de la segunda persona, acompañada de imperativos (por ejemplo, para plantear ejercicios o problemas a resolver); o de la primera persona del plural. Algunas de estas apelaciones utilizan también interrogaciones retóricas, en las que el autor insta directamente al lector a reflexionar sobre el tema expuesto (por ejemplo: “Why can we not say that $n + p$ should remain constant?”, “Can carbon be used for this purpose?”). Tales puntos del texto se caracterizan también por un tono, si bien educado, sin duda menos formal. Esto planteará una duda a la hora de traducirlo, ya que habrá que decidir cómo trasladar estos cambios de registro (deberemos escoger entre la forma de tú y la de usted, en primer lugar).

En último lugar, observamos que es habitual en el estilo de este autor la personificación de algunos de los elementos que describe. A continuación se explica esta idea con algunos ejemplos. En cuanto a la descripción de una característica propia del silicio, dice lo siguiente: “silicon [...] suffering from a high resistance”, a pesar de que el silicio no “sufre”. En cuanto a los enlaces electrónicos, encontramos “each atom *shares* one valence electron with its neighbors”, destacando la palabra “shares”. En la traducción, algunas de estas personificaciones se mantendrán, mientras que trataremos de suavizar otras. Como norma general, para aquellas que presentan un tinte subjetivo, como el primer ejemplo, trataremos de otra expresión más neutra; mientras que para aquellas más descriptivas, como el segundo ejemplo, seremos más fieles al original.

Fuentes

Hatim, B. y Mason, I. (1990). *Discourse and the translator*. Londres, Nueva York: Longman.

Suau Jiménez, F. (2010). *La traducción especializada (en inglés y español en géneros de economía y empresa)*. Madrid: Arco Libros.

3. Traducción

Texto original	Traducción
Fundamentals of Microelectronics Basic Physics of Semiconductors	Fundamentos de microelectrónica Bases de la física de semiconductores
Microelectronic circuits are based on complex semiconductor structures that have been under active research for the past six decades. While this book deals with the analysis and design of <i>circuits</i> , we should emphasize at the outset that a good understanding of <i>devices</i> is essential to our work. The situation is similar to many other engineering problems, e.g., one cannot design a high-performance automobile without a detailed knowledge of the engine and its limitations.	Los circuitos microelectrónicos están basados en complejas estructuras de semiconductores que se han investigado activamente durante las últimas seis décadas. Aunque este libro trata sobre el análisis y diseño de los circuitos, debemos comenzar resaltando que una correcta comprensión de los dispositivos es indispensable para nuestro trabajo. Esta necesidad es similar a la de otros muchos problemas de ingeniería; por ejemplo, no se puede diseñar un automóvil de altas prestaciones sin un conocimiento detallado del motor y sus limitaciones.

Nonetheless, we do face a dilemma. Our treatment of device physics must contain enough depth to provide adequate understanding, but must also be sufficiently brief to allow quick entry into circuits. This chapter accomplishes this task.

Our ultimate objective in this chapter is to study a fundamentally-important and versatile device called the “diode.” However, just as we need to eat our broccoli before having desert, we must develop a basic understanding of “semiconductor” materials and their current conduction mechanisms before attacking diodes.

In this chapter, we begin with the concept of semiconductors and study the movement of charge (i.e., the flow of current) in them. Next, we deal with the “*pn* junction,” which also serves as diode, and formulate its behavior. Our ultimate goal is to represent the device by a circuit model (consisting of resistors, voltage or current sources, capacitors, etc.), so that a circuit using such a device can be analyzed easily. The outline is shown below.

Aun así, nos encontramos ante un dilema. Nuestra presentación de la física de los dispositivos debe ser lo bastante detallada para proporcionar una comprensión adecuada, pero debe ser también suficientemente breve como para permitir pasar rápidamente a los circuitos. Este capítulo se ocupa de esa tarea.

El principal objetivo de este capítulo es el estudio de un dispositivo versátil y de fundamental importancia conocido como *diodo*. Sin embargo, del mismo modo que solemos comer la verdura antes que el postre, necesitamos desarrollar una comprensión básica de los materiales semiconductores y sus mecanismos de conducción de corriente antes de pasar a los diodos.

Este capítulo comienza con el concepto de semiconductor y el estudio del movimiento de las cargas (es decir, el flujo de corriente) en su interior. A continuación, se presenta la unión *pn*, que también sirve como diodo, y se formula su comportamiento. El objetivo final es representar el dispositivo como un modelo circuital (formado por resistencias, fuentes de tensión o corriente, condensadores, etc.), de forma que un circuito que lo incluya pueda ser analizado con facilidad. A continuación se muestra un esquema del capítulo.

- Semiconductors
- Charge Carriers
- Doping
- Transport of Carriers
- PN Junction
- Structure
- Reverse and Forward Bias Conditions
- I/V Characteristics
- Circuit Models

It is important to note that the task of developing accurate models proves critical for *all* microelectronic devices. The electronics industry continues to place greater demands on circuits, calling for aggressive designs that push semiconductor devices to their limits. Thus, a good understanding of the internal operation of devices is necessary.¹

[1] As design managers often say, “If you do not push the devices and circuits to their limit but your competitor does, then you lose to your competitor.”

2.1 Semiconductor Materials and Their Properties

Since this section introduces a multitude of concepts, it is useful to bear a general outline in mind:

- Semiconductores
- Portadores de carga
- Dopaje
- Transporte de portadores
- Unión PN
- Estructura
- Condiciones de polarización directa e inversa
- Características I/V
- Modelos circuitales

Es importante resaltar que el desarrollo de modelos precisos resulta imprescindible para todos los dispositivos microelectrónicos. La industria electrónica es cada vez más exigente con los circuitos, lo que obliga a realizar diseños agresivos que llevan a los dispositivos de semiconductor al límite. Por este motivo, se hace necesaria una correcta comprensión del funcionamiento interno de los dispositivos¹.

[1] Los responsables de diseño suelen decir que “Si nosotros no llevamos nuestros dispositivos y circuitos al límite pero la competencia sí, perdemos ante la competencia”.

2.1 Materiales semiconductores y sus propiedades

Dado que esta sección introduce multitud de conceptos, puede resultar útil comenzar con el siguiente esquema:

- Charge Carriers in Solids
- Crystal Structure
- Bandgap Energy
- Holes
- Modification of Carrier Densities
- Intrinsic Semiconductors
- Extrinsic Semiconductors
- Doping
- Transport of Carriers
- Diffusion
- Drift

Figure 2.1 Outline of this section.

This outline represents a logical thought process: (a) we identify charge carriers in solids and formulate their role in current flow; (b) we examine means of modifying the density of charge carriers to create desired current flow properties; (c) we determine current flow mechanisms. These steps naturally lead to the computation of the current/voltage (I/V) characteristics of actual diodes in the next section.

2.1.1 Charge Carriers in Solids

- Portadores de carga en sólidos
- Estructura cristalina
- Energía de salto de banda
- Huecos
- Modificación de densidades de portadores
- Semiconductores intrínsecos
- Semiconductores extrínsecos
- Dopaje
- Transporte de portadores
- Difusión
- Deriva

Figura 2.1 Esquema de esta sección.

Este esquema sigue un flujo de pensamiento lógico: (a) se identifican los portadores de carga en sólidos y se formula su papel en el flujo de corriente; (b) se consideran formas de modificar la densidad de portadores de carga para crear las propiedades de flujo de corriente deseadas; (c) se determinan los mecanismos de flujo de corriente. Estos pasos llevan inevitablemente al cálculo de las características de corriente/voltaje (I/V) de los diodos propiamente dichos en la siguiente sección.

2.1.1 Portadores de carga en sólidos

Recall from basic chemistry that the electrons in an atom orbit the nucleus in different “shells.” The atom’s chemical activity is determined by the electrons in the outermost shell, called “valence” electrons, and how complete this shell is. For example, neon exhibits a complete outermost shell (with eight electrons) and hence no tendency for chemical reactions. On the other hand, sodium has only one valence electron, ready to relinquish it, and chloride has seven valence electrons, eager to receive one more. Both elements are therefore highly reactive.

The above principles suggest that atoms having approximately four valence electrons fall somewhere between inert gases and highly volatile elements, possibly displaying interesting chemical and physical properties. Shown in Fig. 2.2 is a section of the periodic table containing a number of elements with three to five valence electrons. As the most popular material in microelectronics, silicon merits a detailed analysis.²

[2] Silicon is obtained from sand after a great deal of processing.

Recordemos, de los fundamentos de la química, que los electrones de un átomo orbitan alrededor del núcleo en distintas capas. La actividad química del átomo viene determinada por los electrones en la capa más externa, a los que se llama electrones de valencia, y por lo completa que esté dicha capa. El neón, por ejemplo, muestra una capa exterior completa (con ocho electrones), y por lo tanto no tiende a las reacciones químicas. El sodio, por otra parte, tiene solamente un electrón de valencia, y tiende a perderlo, mientras que el cloro tiene siete electrones de valencia, por lo que busca recibir uno más. Por este motivo, ambos elementos muestran una alta reactividad.

Los principios anteriores sugieren que los elementos que tengan alrededor de cuatro electrones de valencia se encuentran a medio camino entre los gases inertes y los elementos muy volátiles, y posiblemente muestren propiedades físicas y químicas interesantes. En la Fig. 2.2 se muestra una sección de la tabla periódica que contiene algunos elementos con entre tres y cinco electrones de valencia. Al ser el elemento más utilizado en microelectrónica, el silicio merece un análisis detallado².

[2] El silicio se obtiene de la arena, tras un largo proceso.

- Boron (B)
- Aluminum (Al)
- Gallium (Ga)
- Carbon (C)
- Silicon (Si)
- Germanium (Ge)
- Phosphorous (P)
- Arsenic (As)

Figure 2.2 Section of the periodic table.

Covalent Bonds A silicon atom residing in isolation contains four valence electrons [Fig. 2.3(a)], requiring another four to complete its outermost shell. If processed properly, the silicon material can form a “crystal” wherein each atom is surrounded by exactly four others [Fig. 2.3(b)]. As a result, each atom *shares* one valence electron with its neighbors, thereby completing its own shell and those of the neighbors. The “bond” thus formed between atoms is called a “covalent bond” to emphasize the sharing of valence electrons.

- Covalent Bond
- Free Electron

- Boro (B)
- Aluminio (Al)
- Galio (Ga)
- Carbono (C)
- Silicio (Si)
- Germanio (Ge)
- Fósforo (P)
- Arsénico (As)

Figura 2.2 Sección de la tabla periódica.

Enlaces covalentes Un átomo de silicio aislado contiene cuatro electrones de valencia [Fig. 2.3(a)], por lo que requiere otros cuatro para completar su capa externa. Si se procesa adecuadamente, el silicio forma un cristal donde cada átomo está rodeado de exactamente otros cuatro [Fig. 2.3(b)]. Como consecuencia, cada átomo comparte un electrón de valencia con cada uno de sus vecinos y, de esta forma, completa su propia capa de valencia y las de los átomos colindantes. El enlace entre átomos formado de esta manera se conoce como *enlace covalente* para enfatizar la compartición de electrones de valencia.

- Enlace covalente
- Electrón libre

Figure 2.3 (a) Silicon atom, (b) covalent bonds between atoms, (c) free electron released by thermal energy.

The uniform crystal depicted in Fig. 2.3(b) plays a crucial role in semiconductor devices. But, does it carry current in response to a voltage? At temperatures near absolute zero, the valence electrons are confined to their respective covalent bonds, refusing to move freely. In other words, the silicon crystal behaves as an insulator for $T \rightarrow 0K$. However, at higher temperatures, electrons gain thermal energy, occasionally breaking away from the bonds and acting as free charge carriers [Fig. 2.3(c)] until they fall into another incomplete bond. We will hereafter use the term “electrons” to refer to free electrons.

Holes When freed from a covalent bond, an electron leaves a “void” behind because the bond is now incomplete. Called a “hole,” such a void can readily absorb a free electron if one becomes available. Thus, we say an “electron-hole pair” is generated when an electron is freed, and an “electron-hole recombination” occurs when an electron “falls” into a hole.

Figura 2.3 (a) Átomo de silicio, (b) enlaces covalentes entre átomos, (c) electrón libre, liberado mediante energía térmica.

El cristal uniforme representado en la Fig. 2.3(b) tiene un papel crucial en los dispositivos semiconductores, pero, ¿puede conducir intensidad como respuesta a una diferencia de tensión? A temperaturas próximas al cero absoluto, los electrones de valencia quedan confinados a sus respectivos enlaces covalentes y no pueden moverse libremente. En otras palabras, el cristal de silicio se comporta como aislante para $T \rightarrow 0K$. Sin embargo, a temperaturas superiores, los electrones adquieren energía térmica, lo que ocasiona que algunos se separen de sus enlaces y actúen como portadores de carga libres [Fig. 2.3(c)] hasta que quedan atrapados en otro enlace incompleto. En lo sucesivo, el término *electrones* se referirá a electrones libres.

Huecos Al liberarse de un enlace covalente, el electrón deja un vacío tras de sí, ya que dicho enlace está ahora incompleto. Este vacío, al que se conoce como hueco, puede absorber un electrón si aparece uno disponible. Por ello, se dice que se genera un par electrón-hueco cuando se libera un electrón, y se produce una recombinación electrón-hueco cuando un electrón cae en un hueco.

Why do we bother with the concept of the hole? After all, it is the free electron that actually moves in the crystal. To appreciate the usefulness of holes, consider the time evolution illustrated in Fig. 2.4. Suppose covalent bond number 1 contains a hole after losing an electron some time before $t = t_1$. At $t = t_2$, an electron breaks away from bond number 2 and recombines with the hole in bond number 1. Similarly, at $t = t_3$, an electron leaves bond number 3 and falls into the hole in bond number 2. Looking at the three “snapshots,” we can say one electron has traveled from right to left, or, alternatively, one hole has moved from left to right. This view of current flow by holes proves extremely useful in the analysis of semiconductor devices.

- Hole

Figure 2.4 Movement of electron through crystal.

¿Por qué se establece el concepto de hueco? Al fin y al cabo, es el electrón libre el que realmente se mueve dentro del cristal. Para comprender la utilidad de los huecos, considere la evolución temporal ilustrada en la Fig. 2.4. Supongamos que el enlace covalente número 1 contiene un hueco tras perder un electrón en algún instante anterior a $t = t_1$. En $t = t_2$, un electrón se separa del enlace número 2 y se recombina con el hueco en el enlace número 1. De forma similar, en $t = t_3$, un electrón deja el enlace número 3 y cae en el hueco del enlace número 2. A partir de las tres instantáneas, se puede decir que un electrón ha viajado de derecha a izquierda o, alternativamente, que un hueco se ha desplazado de izquierda a derecha. Esta visión de los flujos de corriente basados en huecos resulta de gran utilidad en el análisis de dispositivos semiconductores.

- Hueco

Figura 2.4 Movimiento de un electrón a través de un cristal.

Bandgap Energy We must now answer two important questions. First, does *any* thermal energy create free electrons (and holes) in silicon? No, in fact, a minimum energy is required to dislodge an electron from a covalent bond. Called the “band-gap energy” and denoted by E_g , this minimum is a fundamental property of the material. For silicon, $E_g = 1,12 \text{ eV}$.³

[3] The unit eV (electron volt) represents the energy necessary to move one electron across a potential difference of 1 V. Note that $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

The second question relates to the conductivity of the material and is as follows. How *many* free electrons are created at a given temperature? From our observations thus far, we postulate that the number of electrons depends on both E_g and T : a greater E_g translates to fewer electrons, but a higher T yields more electrons. To simplify future derivations, we consider the *density* (or concentration) of electrons, i.e., the number of electrons per unit volume, n_i , and write for silicon:

$$n_i = 5,2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT} \text{ electrons/cm}^3$$

Energía de salto de banda Ahora debemos dar respuesta a dos preguntas importantes. En primer lugar, ¿puede cualquier cantidad de energía térmica crear electrones libres (y huecos) en el silicio? No, de hecho se requiere una energía mínima para separar un electrón de un enlace covalente. Este mínimo, conocido como energía de salto de banda y denotado como E_g , es una propiedad fundamental del material. Para el silicio, $E_g = 1,12 \text{ eV}$.

[3] La unidad eV (electrón voltio) representa la energía necesaria para mover un electrón a través de una diferencia de potencial de 1 V. Tenga en cuenta que $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

La segunda pregunta tiene relación con la conductividad del material y se plantea de la siguiente manera: ¿cuántos electrones libres se crean a una temperatura dada? A partir de nuestras observaciones hasta el momento, podemos postular que el número de electrones depende tanto de E_g como de T : un E_g más elevado se traduce en menos electrones, pero una T mayor proporcionará más electrones. Para simplificar los resultados futuros, consideraremos que la *densidad* (o concentración) de electrones, es decir, el número de electrones por unidad de volumen, es n_i , que expresado para el silicio es:

$$n_i = 5,2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT} \text{ electrones/cm}^3$$

where $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K is called the Boltzmann constant. The derivation can be found in books on semiconductor physics, e.g., [1]. As expected, materials having a larger E_g exhibit a smaller n_i . Also, as $T \rightarrow 0$, so do $T^{3/2}$ and $\exp[-E_g/(2kT)]$, thereby bringing n_i toward zero.

The exponential dependence of n_i upon E_g reveals the effect of the bandgap energy on the conductivity of the material. Insulators display a high E_g ; for example, $E_g = 2,5$ eV for diamond. Conductors, on the other hand, have a small bandgap. Finally, *semiconductors* exhibit a moderate E_g , typically ranging from 1 eV to 1.5 eV.

Example 2.1

Determine the density of electrons in silicon at $T = 300$ K (room temperature) and $T = 600$ K.

Solution

Since $E_g = 1,12$ eV $= 1,792 \times 10^{-19}$ J, we have

$$n_i(T = 300 \text{ K}) = 1,08 \times 10^{10} \text{ electrons/cm}^3$$

$$n_i(T = 600 \text{ K}) = 1,54 \times 10^{15} \text{ electrons/cm}^3.$$

donde $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K se conoce como la constante de Boltzmann. El desarrollo se puede consultar en libros que tratan la física de semiconductores, por ejemplo, en [1]. Como se espera, los materiales con un E_g mayor presentan un n_i menor. Además, cuando $T \rightarrow 0$, también lo hacen $T^{3/2}$ y $\exp[-E_g/(2kT)]$, por lo que n_i se acerca también a cero.

La dependencia exponencial de n_i con E_g muestra el efecto de la energía de salto de banda en la conductividad del material. Los aislantes muestran un E_g elevado; por ejemplo, $E_g = 2,5$ eV para el diamante. Por otro lado, los conductores presentan una energía de salto de banda pequeña. Finalmente, los *semiconductores* muestran una E_g moderada, con valores típicos entre 1 eV y 1,5 eV.

Ejemplo 2.1

Determine la densidad de electrones en el silicio para $T = 300$ K (temperatura ambiente) y para $T = 600$ K.

Solución

Como $E_g = 1,12$ eV $= 1,792 \times 10^{-19}$ J, se obtiene que

$$n_i(T = 300 \text{ K}) = 1,08 \times 10^{10} \text{ electrones/cm}^3$$

$$n_i(T = 600 \text{ K}) = 1,54 \times 10^{15} \text{ electrones/cm}^3.$$

Since for each free electron, a hole is left behind, the density of holes is also given by (2.2) and (2.3).

Exercise

Repeat the above exercise for a material having a bandgap of 1.5 eV.

The n_i values obtained in the above example may appear quite high, but, noting that silicon has 5×10^{22} atoms/cm³, we recognize that only one in 5×10^{12} atoms benefit from a free electron at room temperature. In other words, silicon still seems a very poor conductor. But, do not despair! We next introduce a means of making silicon more useful.

2.1.2 Modification of Carrier Densities

Intrinsic and Extrinsic Semiconductors The “pure” type of silicon studied thus far is an example of “intrinsic semiconductors,” suffering from a very high resistance. Fortunately, it is possible to modify the resistivity of silicon by replacing some of the atoms in the crystal with atoms of another material. In an intrinsic semiconductor, the electron density, $n(= n_i)$, is equal to the hole density, p . Thus,

$$np = n_i^2.$$

Ya que, por cada electrón libre, se crea un hueco, la densidad de huecos también viene determinada por (2.2) y (2.3).

Ejercicio

Repita el ejercicio anterior para un material con una energía de salto de banda de 1,5 eV.

Los valores de n_i obtenidos en el ejemplo anterior pueden parecer muy elevados pero, teniendo en cuenta que el silicio tiene 5×10^{22} átomos/cm³, obtenemos que solo uno de cada 5×10^{12} átomos consigue un electrón libre a temperatura ambiente. En otras palabras, el silicio aún parece un conductor muy pobre. Por este motivo, a continuación presentamos un modo de hacer que el silicio resulte más útil.

2.1.2 Modificación de las densidades de portadores

Semiconductores intrínsecos y extrínsecos El silicio puro estudiado hasta ahora es un ejemplo de semiconductor intrínseco y presenta una resistencia muy alta. Convenientemente, es posible modificar la resistencia del silicio reemplazando algunos de los átomos del cristal con átomos de otro material. Para un semiconductor intrínseco, la densidad de electrones, $n(= n_i)$, es igual a la densidad de huecos, p . Así,

$$np = n_i^2.$$

We return to this equation later.

Recall from Fig. 2.2 that phosphorus (P) contains five valence electrons. What happens if some P atoms are introduced in a silicon crystal? As illustrated in Fig. 2.5, each P atom shares four electrons with the neighboring silicon atoms, leaving the fifth electron “unattached.” This electron is free to move, serving as a charge carrier. Thus, if N phosphorus atoms are uniformly introduced in each cubic centimeter of a silicon crystal, then the density of free electrons rises by the same amount.

Figure 2.5 Loosely-attached electron with phosphorus doping.

The controlled addition of an “impurity” such as phosphorus to an intrinsic semiconductor is called “doping,” and phosphorus itself a “dopant.” Providing many more free electrons than in the intrinsic state, the doped silicon crystal is now called “extrinsic,” more specifically, an “ n -type” semiconductor to emphasize the abundance of free electrons.

Retomaremos esta ecuación más adelante.

Recuerde de la Fig. 2.2 que el fósforo (P) contiene cinco electrones de valencia. ¿Qué ocurre si se introducen algunos átomos P en un cristal de silicio? Como se ilustra en la Fig. 2.5, cada átomo P comparte cuatro electrones con los átomos de silicio colindantes, lo que deja al quinto electrón libre. Este electrón puede moverse libremente, por lo que sirve como portador de carga. Por tanto, si N átomos de fósforo se introducen de manera uniforme en cada centímetro cúbico de un cristal de silicio, la densidad de electrones libres crece en la misma cantidad.

Figura 2.5 Electrón débilmente enlazado con dopaje de fósforo.

La adición controlada de una impureza, como el fósforo, a un semiconductor intrínseco se conoce como *dopaje*, mientras que al fósforo se le denomina *dopante*. El cristal de silicio dopado, que ahora contiene muchos más electrones libres que en su estado intrínseco, ahora se denomina *extrínseco* o, más específicamente, semiconductor *tipo n*, para enfatizar la abundancia de electrones libres.

As remarked earlier, the electron and hole densities in an intrinsic semiconductor are equal. But, how about these densities in a doped material? It can be proved that even in this case,

$$np = n_i^2,$$

where n and p respectively denote the electron and hole densities in the extrinsic semiconductor. The quantity n_i represents the densities in the intrinsic semiconductor (hence the subscript i) and is therefore independent of the doping level [e.g., Eq. (2.1) for silicon].

Example 2.2

The above result seems quite strange. How can np remain constant while we add more donor atoms and increase n ?

Solution

Equation (2.5) reveals that p must fall *below* its intrinsic level as more n -type dopants are added to the crystal. This occurs because many of the new electrons donated by the dopant “recombine” with the holes that were created in the intrinsic material.

Exercise

Why can we not say that $n + p$ should remain constant?

Como se ha indicado anteriormente, las densidades de electrones y huecos en un semiconductor intrínseco son iguales. Sin embargo, ¿qué ocurre con estas densidades en un material dopado? Se puede demostrar que, incluso en este caso,

$$np = n_i^2,$$

donde n y p denotan respectivamente las densidades de electrones y huecos en el semiconductor extrínseco. La cantidad n_i representa las densidades del semiconductor intrínseco (de ahí el subíndice i) y es, por tanto, independiente del nivel de dopaje [véase, por ejemplo, la Ec. (2.1) para el silicio].

Ejemplo 2.2

Los resultados anteriores pueden parecer extraños. ¿Cómo es posible que np permanezca constante, a pesar de añadir más átomos donantes e incrementar n ?

Solución

La Ecuación (2.5) revela que p debe caer a niveles inferiores al intrínseco cuando se añaden más dopantes tipo n al cristal. Esto ocurre porque muchos de los nuevos electrones donados por el dopante se recombinan con los huecos que se habían creado en el material intrínseco.

Ejercicio

¿Por qué no podemos decir que $n + p$ debe permanecer constante?

Example 2.3

A piece of crystalline silicon is doped uniformly with phosphorus atoms. The doping density is 10^{16} atoms/cm³. Determine the electron and hole densities in this material at the room temperature.

Solution

The addition of 10^{16} P atoms introduces the same number of free electrons per cubic centimeter. Since this electron density exceeds that calculated in Example 2.1 by six orders of magnitude, we can assume

$$n = 10^{16} \text{ electrons/cm}^3$$

It follows from (2.2) and (2.5) that

$$\begin{aligned} p &= \frac{n_i^2}{n} \\ &= 1,17 \times 10^4 \text{ holes/cm}^3 \end{aligned}$$

Note that the hole density has dropped below the intrinsic level by six orders of magnitude. Thus, if a voltage is applied across this piece of silicon, the resulting current predominantly consists of electrons.

Exercise

At what doping level does the hole density drop by three orders of magnitude?

Ejemplo 2.3

Un fragmento de silicio cristalino se dopa de manera uniforme con átomos de fósforo. La densidad de dopaje es de 10^{16} átomos/cm³. Determine las densidades de electrones y huecos de este material a temperatura ambiente.

Solución

La adición de 10^{16} átomos P introduce el mismo número de electrones libres por centímetro cúbico. Como la densidad de electrones excede la calculada en el Ejemplo 2.1 en seis órdenes de magnitud, podemos asumir que

$$n = 10^{16} \text{ electrones/cm}^3$$

Se deduce a partir de (2.2) y (2.5) que

$$\begin{aligned} p &= \frac{n_i^2}{n} \\ &= 1,17 \times 10^4 \text{ huecos/cm}^3 \end{aligned}$$

Tenga en cuenta que la densidad de huecos ha caído por debajo del nivel intrínseco en seis órdenes de magnitud. Por ello, si se aplica un voltaje a través de este fragmento de silicio, la corriente resultante estará formada mayoritariamente por electrones.

Ejercicio

¿Para qué nivel de dopaje cae la densidad de huecos en tres órdenes de magnitud?

This example justifies the reason for calling electrons the “majority carriers” and holes the “minority carriers” in an n -type semiconductor. We may naturally wonder if it is possible to construct a “ p -type” semiconductor, thereby exchanging the roles of electrons and holes.

Indeed, if we can dope silicon with an atom that provides an *insufficient* number of electrons, then we may obtain many *incomplete* covalent bonds. For example, the table in Fig. 2.2 suggests that a boron (B) atom—with three valence electrons—can form only three complete covalent bonds in a silicon crystal (Fig. 2.6). As a result, the fourth bond contains a hole, ready to absorb a free electron. In other words, N boron atoms contribute N boron holes to the conduction of current in silicon. The structure in Fig. 2.6 therefore exemplifies a p -type semiconductor, providing holes as majority carriers. The boron atom is called an “acceptor” dopant.

Figure 2.6 Available hole with boron doping.

Este ejemplo muestra el motivo por el que se llama a los electrones *portadores mayoritarios* y a los huecos *portadores minoritarios* en un semiconductor de tipo n . Nos podríamos preguntar si es posible fabricar un semiconductor tipo p , intercambiando el papel de los electrones y huecos.

Efectivamente, si se dopa el silicio con un átomo que proporcione un número de electrones insuficiente, se obtendrían muchos enlaces covalentes *incompletos*. Por ejemplo, la tabla de la Fig. 2.2 sugiere que un átomo de boro (B), con tres electrones de valencia, solamente puede formar tres enlaces covalentes completos en un cristal de silicio (Fig. 2.6). Como consecuencia, el cuarto enlace contiene un hueco, que puede absorber un electrón libre. Es decir, N átomos de boro contribuyen con N huecos a la conducción de corriente en el silicio. Por lo tanto, la estructura de la Fig. 2.6 ejemplifica un semiconductor de tipo p , que proporciona huecos como portadores mayoritarios. El boro se conoce como un dopante aceptor.

Figura 2.6 Hueco disponible con dopaje de boro.

Let us formulate our results thus far. If an intrinsic semiconductor is doped with a density of N_D ($\gg n_i$) donor atoms per cubic centimeter, then the mobile charge densities are given by

Majority Carriers : $n \approx N_D$

Minority Carriers : $p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$.

Similarly, for a density of N_A ($\gg n_i$) acceptor atoms per cubic centimeter:

Majority Carriers : $p \approx N_A$

Minority Carriers : $n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$.

Since typical doping densities fall in the range of 10^{15} to 10^{18} atoms/cm³, the above expressions are quite accurate.

Example 2.4

Is it possible to use other elements of Fig. 2.2 as semiconductors and dopants?

Solution

Yes, for example, some early diodes and transistors were based on germanium (Ge) rather than silicon. Also, arsenic (As) is another common dopant.

Exercise

A continuación se recapitulan los resultados obtenidos hasta el momento. Si un semiconductor intrínseco se dopa con una densidad de N_D ($\gg n_i$) átomos donantes por centímetro cúbico, las densidades de cargas móviles vienen dadas por

Portadores mayoritarios: $n \approx N_D$

Portadores minoritarios: $p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$.

De forma similar, para una densidad de N_A ($\gg n_i$) átomos aceptores por centímetro cúbico:

Portadores mayoritarios: $p \approx N_A$

Portadores minoritarios: $n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$.

Considerando que las densidades de dopaje típicas se encuentran entre 10^{15} y 10^{18} átomos/cm³, las expresiones anteriores tienen una precisión adecuada.

Ejemplo 2.4

¿Es posible utilizar otros elementos de la Fig. 2.2 como semiconductores y dopantes?

Solución

Sí, por ejemplo, algunos de los primeros diodos y transistores están basados en el germanio (Ge) y no en el silicio. Por otra parte, el arsénico (As) es otro dopante habitual.

Ejercicio

Can carbon be used for this purpose?

Figure 2.7 summarizes the concepts introduced in this section, illustrating the types of charge carriers and their densities in semiconductors.

- Intrinsic Semiconductor
- Covalent Bond
- Valence Electron
- Extrinsic Semiconductor

- Silicon Crystal
- ND Donors/cm³
- n-Type Dopant (Donor)
- Free Majority Carrier

- Silicon Crystal
- NA Acceptors/cm³
- Free Majority Carrier
- p-Type Dopant (Acceptor)

Figure 2.7 Summary of charge carriers in silicon.

2.1.3 Transport of Carriers

¿Se puede utilizar el carbono para este propósito?

La Figura 2.7 resume los conceptos presentados en esta sección, ilustrando los tipos de portadores de cargas y sus densidades en semiconductores.

- Semiconductor intrínseco
- Enlace covalente
- Electrón de valencia
- Semiconductor extrínseco

- Cristal de silicio
- ND donantes/cm³
- Dopante tipo n (donante)
- Portador mayoritario libre

- Cristal de silicio
- NA aceptores/cm³
- Portador mayoritario libre
- Dopante tipo p (aceptor)

Figura 2.7 Resumen de los portadores de carga en el silicio.

2.1.3 Transporte de portadores

Having studied charge carriers and the concept of doping, we are ready to examine the *movement* of charge in semiconductors, i.e., the mechanisms leading to the flow of current.

Drift We know from basic physics and Ohm's law that a material can conduct current in response to a potential difference and hence an electric field.⁴ The field accelerates the charge carriers in the material, forcing some to flow from one end to the other. Movement of charge carriers due to an electric field is called "drift."⁵

[4] Recall that the potential (voltage) difference, V , is equal to the negative integral of the electric field, E , with respect to distance: $V_{ab} = -\int_a^b E dx$.

[5] The convention for direction of current assumes flow of *positive* charge from a positive voltage to a negative voltage. Thus, if electrons flow from point A to point B , the current is considered to have a direction from B to A .

Tras haber estudiado los portadores de carga y el concepto de dopaje, podemos ahora examinar el movimiento de la carga en semiconductores, es decir, los mecanismos que permiten el flujo de corriente.

Deriva Conocemos, por las bases de la física y la ley de Ohm, que un material puede conducir corriente como respuesta a una diferencia de potencial y, por lo tanto, a un campo eléctrico⁴. El campo acelera los portadores de carga en el material, lo que fuerza a algunos a desplazarse de un extremo a otro. El movimiento de portadores de carga debido a un campo eléctrico se conoce como deriva⁵.

[4] Recuerde que la diferencia de potencial (voltaje), V , es igual a la integral negativa del campo eléctrico, E , con respecto a la distancia: $V_{ab} = -\int_a^b E dx$.

[5] La convención para la dirección de corriente asume el flujo de carga positiva de un voltaje positivo a uno negativo. Por lo tanto, si los electrones fluyen del punto A al punto B , se considera que la corriente tiene dirección de B a A .

Semiconductors behave in a similar manner. As shown in Fig. 2.8, the charge carriers are accelerated by the field and accidentally collide with the atoms in the crystal, eventually reaching the other end and flowing into the battery. The acceleration due to the field and the collision with the crystal counteract, leading to a *constant* velocity for the carriers.⁶ We expect the velocity, v , to be proportional to the electric field strength, E :

[6] This phenomenon is analogous to the “terminal velocity” that a sky diver with a parachute (hopefully, open) experiences.

$$v \propto E,$$

and hence

$$v = \mu E,$$

where μ is called the “mobility” and usually expressed in $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. For example in silicon, the mobility of electrons, $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, and that of holes, $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Of course, since electrons move in a direction opposite to the electric field, we must express the velocity vector as

$$\vec{v}_e = -\mu_n \vec{E}.$$

For holes, on the other hand,

$$\vec{v}_h = \mu_p \vec{E}.$$

Los semiconductores presentan un comportamiento similar. Como se muestra en la Fig. 2.8, el campo acelera los portadores de carga, que colisionan accidentalmente con átomos del cristal, y finalmente llegan al otro extremo y entran en la batería. La aceleración debida al campo y las colisiones con el cristal se cancelan mutuamente, lo que da como resultado una velocidad constante para los portadores⁶. Suponemos que la velocidad, v , será proporcional a la magnitud del campo eléctrico, E :

[6] Este fenómeno es análogo a la velocidad límite que un paracaidista experimenta en su caída.

$$v \propto E,$$

y por tanto

$$v = \mu E,$$

donde μ se conoce como *movilidad*, y suele expresarse en $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Para el silicio, por ejemplo, la movilidad de los electrones es $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, y la de los huecos, $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Por supuesto, ya que los electrones se mueven en dirección opuesta al campo eléctrico, el vector de velocidad se expresa como

$$\vec{v}_e = -\mu_n \vec{E}.$$

Por otra parte, en el caso de los huecos,

$$\vec{v}_h = \mu_p \vec{E}.$$

Figure 2.8 Drift in a semiconductor.

Example 2.5

A uniform piece of n -type of silicon that is $1\ \mu\text{m}$ long senses a voltage of $1\ \text{V}$. Determine the velocity of the electrons.

Solution

Since the material is uniform, we have $E = V/L$, where L is the length. Thus, $E = 10,000\ \text{V/cm}$ and hence $v = \mu_n E = 1,35 \times 10^7\ \text{cm/s}$. In other words, electrons take $(1\ \mu\text{m}) / (1,35 \times 10^7\ \text{cm/s}) = 7,4\ \text{ps}$ to cross the $1\text{-}\mu\text{m}$ length.

Exercise

What happens if the mobility is halved?

Figura 2.8 Deriva en un semiconductor.

Ejemplo 2.5

Un fragmento de silicio tipo n uniforme de $1\ \mu\text{m}$ de longitud se somete a un voltaje de $1\ \text{V}$. Determine la velocidad de los electrones.

Solución

Dado que el material es uniforme, se obtiene que $E = V/L$, donde L es la longitud. Por lo tanto, $E = 10\,000\ \text{V/cm}$, de lo que se extrae que $v = \mu_n E = 1,35 \times 10^7\ \text{cm/s}$. En otras palabras, los electrones necesitan $(1\ \mu\text{m}) / (1,35 \times 10^7\ \text{cm/s}) = 7,4\ \text{ps}$ para cruzar la distancia de $1\ \mu\text{m}$.

Ejercicio

¿Qué ocurre si la movilidad se divide por dos?

With the velocity of carriers known, how is the current calculated? We first note that an electron carries a negative charge equal to $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$. Equivalently, a hole carries a positive charge of the same value. Now suppose a voltage V_1 is applied across a uniform semiconductor bar having a free electron density of n (Fig. 2.9). Assuming the electrons move with a velocity of v m/s, considering a cross section of the bar at $x = x_1$ and taking two “snapshots” at $t = t_1$ and $t = t_1 + 1$ second, we note that the total charge in v meters passes the cross section in 1 second. In other words, the current is equal to the total charge enclosed in v meters of the bar’s length. Since the bar has a width of W , we have:

$$I = -v \cdot W \cdot h \cdot n \cdot q,$$

where $v \cdot W \cdot h$ represents the volume, $n \cdot q$ denotes the charge density in coulombs, and the negative sign accounts for the fact that electrons carry negative charge.

- v meters

Figure 2.9 Current flow in terms of charge density.

Conocida la velocidad de los portadores, ¿cómo se calcula la corriente? En primer lugar, se observa que un electrón tiene una carga negativa de $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$. De forma equivalente, un hueco tiene una carga positiva del mismo valor absoluto. Supongamos ahora que se aplica un voltaje V_1 sobre una barra de semiconductor uniforme que tiene una densidad de electrones libres n (Fig. 2.9). Suponiendo que los electrones se mueven con una velocidad de v m/s, y considerando una sección transversal de la barra en $x = x_1$, si se toman dos instantáneas en $t = t_1$ y $t = t_1 + 1$ segundo, se observa que la carga total en v metros atraviesa la sección en 1 segundo. En otras palabras, la corriente es igual a la carga total encerrada en v metros de la longitud de la barra. Como la barra tiene una anchura W , se obtiene:

$$I = -v \cdot W \cdot h \cdot n \cdot q,$$

donde $v \cdot W \cdot h$ representa el volumen, $n \cdot q$ denota la densidad de carga en coulombios, y el signo negativo representa la carga negativa de los electrones.

- v metros

Figura 2.9 Flujo de corriente en términos de la densidad de carga.

Let us now reduce Eq. (2.17) to a more convenient form. Since for electrons, $v = -\mu_n E$, and since $W \cdot h$ is the cross section area of the bar, we write

$$J_n = \mu_n E \cdot n \cdot q,$$

where J_n denotes the “current density,” i.e., the current passing through a *unit* cross section area, and is expressed in A/cm². We may loosely say, “the current is equal to the charge velocity times the charge density,” with the understanding that “current” in fact refers to current density, and negative or positive signs are taken into account properly.

In the presence of both electrons and holes, Eq. (2.18) is modified to

$$\begin{aligned} J_{tot} &= \mu_n E \cdot n \cdot q + \mu_p E \cdot p \cdot q \\ &= q(\mu_n n + \mu_p p)E. \end{aligned}$$

This equation gives the drift current density in response to an electric field E in a semiconductor having uniform electron and hole densities.

Example 2.6

In an experiment, it is desired to obtain equal electron and hole drift currents. How should the carrier densities be chosen?

A continuación se reduce la Ec. (2.17) a una expresión más conveniente. Ya que para los electrones, $v = -\mu_n E$, y $W \cdot h$ es la sección transversal de la barra, se obtiene

$$J_n = \mu_n E \cdot n \cdot q,$$

donde J_n representa la *densidad de corriente*, es decir, la corriente que pasa a través de una sección de área unidad, y se expresa en A/cm². Se puede decir, aproximadamente, que “la corriente es igual a la velocidad de las cargas multiplicada por la densidad de carga”, entendiendo que *corriente* se refiere a la densidad de corriente, y suponiendo que los signos positivos o negativos se tengan en cuenta adecuadamente.

En presencia de tanto electrones como huecos, la Ec. (2.18) se convierte en

$$\begin{aligned} J_{tot} &= \mu_n E \cdot n \cdot q + \mu_p E \cdot p \cdot q \\ &= q(\mu_n n + \mu_p p)E. \end{aligned}$$

Esta ecuación da la densidad de corriente de deriva en función del campo eléctrico E en un semiconductor con densidades uniformes de electrones y huecos.

Ejemplo 2.6

En un experimento, se desea obtener corrientes de deriva iguales para electrones y huecos. ¿Cómo deben elegirse las densidades de portadora?

Solution

We must impose

$$\mu_n n = \mu_p p,$$

and hence

$$\frac{n}{p} = \frac{\mu_p}{\mu_n}.$$

We also recall that $np = n_i^2$. Thus,

$$p = \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_p}} n_i$$

$$n = \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}} n_i.$$

For example, in silicon, $\mu_n/\mu_p = 1350/480 = 2,81$, yielding

$$p = 1,68n_i$$

$$n = 0,596n_i.$$

Since p and n are of the same order as n_i , equal electron and hole drift currents can occur for only a very lightly doped material. This confirms our earlier notion of majority carriers in semiconductors having typical doping levels of 10^{15} - 10^{18} atoms/cm³.

Exercise

How should the carrier densities be chosen so that the electron drift current is twice the hole drift current?

[...]

Solución

Se debe imponer la condición

$$\mu_n n = \mu_p p,$$

y por tanto

$$\frac{n}{p} = \frac{\mu_p}{\mu_n}.$$

También debemos recordar que $np = n_i^2$.

Así,

$$p = \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_p}} n_i$$

$$n = \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}} n_i.$$

Para el silicio, por ejemplo, $\mu_n/\mu_p = 1350/480 = 2,81$, lo que significa que

$$p = 1,68n_i$$

$$n = 0,596n_i.$$

Como p y n son del mismo orden de magnitud que n_i , solo se pueden obtener corrientes de deriva iguales para electrones y huecos en un material con un dopaje muy reducido. Esto confirma la idea inicial de que los portadores mayoritarios de los semiconductores tienen niveles de dopaje típicos de 10^{15} - 10^{18} átomos/cm³.

Ejercicio

¿Cómo deberían elegirse las densidades de portadores para que la corriente de deriva de electrones sea el doble que la de huecos?

[...]

Diffusion In addition to drift, another mechanism can lead to current flow. Suppose a drop of ink falls into a glass of water. Introducing a high local concentration of ink molecules, the drop begins to “diffuse,” that is, the ink molecules tend to flow from a region of high concentration to regions of low concentration. This mechanism is called “diffusion.”

A similar phenomenon occurs if charge carriers are “dropped” (injected) into a semiconductor so as to create a *nonuniform* density. Even in the absence of an electric field, the carriers move toward regions of low concentration, thereby carrying an electric current so long as the nonuniformity is sustained. Diffusion is therefore distinctly different from drift.

Figure 2.11 conceptually illustrates the process of diffusion. A source on the left continues to inject charge carriers into the semiconductor, a nonuniform charge profile is created along the x -axis, and the carriers continue to “roll down” the profile.

- Semiconductor Material
- Injection of Carriers
- Nonuniform Concentration

Difusión Además de la deriva, existe otro mecanismo que puede producir un flujo de corriente. Imagine una gota de tinta que cae en un vaso de agua. Inicialmente la gota introduce una alta concentración local de moléculas de tinta y comienza a difundirse, es decir, las moléculas de tinta tienden a fluir de una región de alta concentración a regiones de baja concentración. Este mecanismo se conoce como difusión.

Ocurre un fenómeno similar cuando se depositan (se inyectan) portadores de carga en un semiconductor, para crear una densidad no uniforme. Incluso en ausencia de un campo eléctrico, los portadores se mueven a regiones de baja concentración, creando así una corriente eléctrica que existirá mientras se mantenga la no uniformidad. La difusión es, por tanto, claramente diferente a la deriva.

La Figura 2.11 ilustra el concepto del proceso de difusión. Una fuente a la izquierda inyecta de forma constante portadores de carga al semiconductor, un perfil de carga no uniforme se forma a lo largo del eje x , y las cargas descienden a lo largo del perfil.

- Material semiconductor
- Inyección de portadores
- Concentración no uniforme

Figure 2.11 Diffusion in a semiconductor.

The reader may raise several questions at this point. What serves as the source of carriers in Fig. 2.11? Where do the charge carriers go after they roll down to the end of the profile at the far right? And, most importantly, why should we care?! Well, patience is a virtue and we will answer these questions in the next section.

Example 2.8

A source injects charge carriers into a semiconductor bar as shown in Fig. 2.12. Explain how the current flows.

- Injection of Carriers

Figure 2.12 Injection of carriers into a semiconductor.

Solution

In this case, two symmetric profiles may develop in both positive and negative directions along the x -axis, leading to current flow from the source toward the two ends of the bar.

Exercise

Is KCL still satisfied at the point of injection?

Figura 2.11 Difusión en un semiconductor.

El lector puede preguntarse algunas cuestiones en este punto. ¿Cuál es la fuente de los portadores en la Fig. 2.11? ¿Dónde van a parar los portadores de carga después de descender hasta la parte derecha del perfil? Y, lo más importante, ¿cuál es la importancia de esto? Estas preguntas se responderán en la siguiente sección.

Ejemplo 2.8

Una fuente inyecta portadores de carga en una barra de semiconductor, tal como se muestra en la Fig. 2.12. Explique cómo fluye la corriente.

- Inyección de portadores

Figura 2.12 Inyección de portadores en un semiconductor.

Solución

En este caso, se desarrollarán dos perfiles simétricos en sentido positivo y negativo del eje x , lo que produce un flujo de corriente desde la fuente hasta los dos extremos de la barra.

Ejercicio

¿Se satisface KCL también en el punto de inyección?

Our qualitative study of diffusion suggests that the more nonuniform the concentration, the larger the current. More specifically, we can write:

$$I \propto \frac{dn}{dx},$$

where n denotes the carrier concentration at a given point along the x -axis. We call dn/dx the concentration “gradient” with respect to x , assuming current flow only in the x direction. If each carrier has a charge equal to q , and the semiconductor has a cross section area of A , Eq. (2.39) can be written as

$$I \propto Aq \frac{dn}{dx}.$$

Thus,

$$I = AqD_n \frac{dn}{dx},$$

where D_n is a proportionality factor called the “diffusion constant” and expressed in cm^2/s . For example, in intrinsic silicon, $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$ (for electrons), and $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$ (for holes).

As with the convention used for the drift current, we normalize the diffusion current to the cross section area, obtaining the current density as

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}.$$

Nuestro estudio cualitativo de la difusión sugiere que, cuanto menos uniforme sea la concentración, mayor será la corriente. Se puede expresar, de forma más específica, como:

$$I \propto \frac{dn}{dx},$$

donde n representa la concentración de portadores en un punto dado del eje x . La expresión dn/dx se conoce como gradiente de concentración con respecto a x , asumiendo que el flujo de corriente existe solamente en dirección x . Si cada portadora tiene una carga q , y el semiconductor tiene una sección A , la Ec. (2.39) se puede expresar como

$$I \propto Aq \frac{dn}{dx}.$$

Por lo tanto,

$$I = AqD_n \frac{dn}{dx},$$

donde D_n es un factor de proporcionalidad conocido como *constante de difusión*, expresado en cm^2/s . Por ejemplo, para el silicio intrínseco, $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$ (para los electrones), y $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$ (para los huecos).

Del mismo modo que ocurre con la deriva, se normaliza la corriente de difusión al área de la sección, obteniendo así la expresión de la densidad de corriente

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}.$$

Similarly, a gradient in hole concentration yields:

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}.$$

With both electron and hole concentration gradients present, the total current density is given by

$$J_{tot} = q \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right).$$

Example 2.9

Consider the scenario depicted in Fig. 2.11 again. Suppose the electron concentration is equal to N at $x = 0$ and falls linearly to zero at $x = L$ (Fig. 2.13). Determine the diffusion current.

- Inyección

Figure 2.13 Current resulting from a linear diffusion profile.

Solution

We have

$$\begin{aligned} J_n &= qD_n \frac{dn}{dx} \\ &= -qD_n \cdot \frac{N}{L}. \end{aligned}$$

De forma equivalente, un gradiente en la concentración de huecos se expresa como

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}.$$

En presencia de gradientes tanto de electrones como de huecos, la densidad total de corriente se expresa como

$$J_{tot} = q \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right).$$

Ejemplo 2.9

Considere de nuevo el escenario representado en la Fig. 2.11. Asuma que la concentración de electrones es igual a N en $x = 0$ y cae linealmente hasta cero en $x = L$ (Fig. 2.13). Determine la corriente de difusión.

- Inyección

Figura 2.13 Corriente resultante de un perfil de difusión lineal.

Solución

Se obtiene:

$$\begin{aligned} J_n &= qD_n \frac{dn}{dx} \\ &= -qD_n \cdot \frac{N}{L}. \end{aligned}$$

The current is constant along the x -axis; i.e., all of the electrons entering the material at $x = 0$ successfully reach the point at $x = L$. While obvious, this observation prepares us for the next example.

Exercise

Repeat the above example for holes.

Example 2.10

Repeat the above example but assume an exponential gradient (Fig. 2.14):

- Injection

Figure 2.14 Current resulting from an exponential diffusion profile.

$$n(x) = N \exp \frac{-x}{L_d},$$

where L_d is a constant.⁷

[7] The factor L_d is necessary to convert the exponent to a dimensionless quantity.

Solution

We have

$$\begin{aligned} J_n &= qD_n \frac{dn}{dx} \\ &= \frac{-qD_n N}{L_d} \exp \frac{-x}{L_d}. \end{aligned}$$

La corriente es constante a lo largo del eje x , es decir, todos los electrones que entran en el material en $x = 0$ alcanzan el punto $x = L$. Aunque parece obvia, esta observación sirve de preámbulo para el siguiente ejemplo.

Ejercicio

Repita el ejemplo anterior para el caso de los huecos.

Ejemplo 2.10

Repita el ejemplo anterior, pero en esta ocasión suponga que el gradiente es exponencial (Fig. 2.14):

- Inyección

Figura 2.14 Corriente resultante de un perfil de difusión exponencial.

$$n(x) = N \exp \frac{-x}{L_d},$$

donde L_d es una constante⁷.

[7] El factor L_d es necesario para convertir el exponente a una magnitud adimensional.

Solución

Se obtiene que:

$$\begin{aligned} J_n &= qD_n \frac{dn}{dx} \\ &= \frac{-qD_n N}{L_d} \exp \frac{-x}{L_d}. \end{aligned}$$

Interestingly, the current is *not* constant along the x -axis. That is, some electrons vanish while traveling from $x = 0$ to the right. What happens to these electrons? Does this example violate the law of conservation of charge? These are important questions and will be answered in the next section.

Exercise

At what value of x does the current density drop to 1% its maximum value?

Einstein Relation Our study of drift and diffusion has introduced a factor for each: μ_n (or μ_p) and D_n (or D_p), respectively. It can be proved that μ and D are related as:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}.$$

Called the “Einstein Relation,” this result is proved in semiconductor physics texts, e.g., [1]. Note that $kT/q \approx 26$ mV at $T = 300$ K.

Figure 2.15 summarizes the charge transport mechanisms studied in this section.

Resulta interesante observar que la corriente no es uniforme a lo largo del eje x . Es decir, algunos electrones desaparecen al viajar de $x = 0$ hacia la derecha. ¿Qué ocurre con estos electrones? ¿Incumple este ejemplo la ley de conservación de las cargas? Estas cuestiones son de gran importancia y se resolverán en la siguiente sección.

Ejercicio

¿Para qué valor de x cae la densidad de corriente al 1% de su valor máximo?

Relación de Einstein Nuestro estudio de la deriva y la difusión ha introducido un factor para cada una: μ_n (o μ_p) y D_n (o D_p), respectivamente. Se puede demostrar que μ y D guardan la siguiente relación:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}.$$

Se puede encontrar la demostración de este resultado, conocido como relación de Einstein, en la literatura sobre física de semiconductores, por ejemplo, en [1]. Tenga en cuenta que $kT/q \approx 26$ mV a $T = 300$ K.

La Figura 2.15 resume los mecanismos de transporte de cargas estudiados en esta sección.

- Drift Current
- Diffusion Current

Figure 2.15 Summary of drift and diffusion mechanisms.

- Corriente de deriva
- Corriente de difusión

Figura 2.15 Resumen de los mecanismos de deriva y difusión.

4. Análisis del proceso de traducción

4.1. Problemas y estrategias de traducción

En esta sección reflexionamos sobre las dificultades de traducción más características del presente texto, así como las estrategias que resultan más apropiadas para resolverlas. Para hacer frente a esta tarea, clasificaremos los problemas o dificultades de traducción en cuatro tipos: lingüísticos, extralingüísticos, instrumentales y pragmáticos (Hurtado, 2001).

4.1.1. Problemas lingüísticos

Entenderemos por problemas lingüísticos aquellos de carácter normativo, que recogen sobre todo las discrepancias entre las dos lenguas en sus diferentes planos: léxico, morfosintáctico, estilístico y textual.

Como ya se ha comentado en la sección anterior, hemos podido distinguir dos tipos de texto durante el análisis del original en inglés. En el caso de la mayor parte del mismo, se trata de un texto expositivo, con un tono neutral, que emplea casi exclusivamente la tercera persona y el tiempo presente y que corresponde con las partes en las que se desarrolla el tema didáctico del libro. El segundo tipo se emplea en algunas ocasiones para apelar al lector y se caracteriza por el uso de la primera o la segunda persona.

En este primer registro del texto, nuestro principal objetivo a la hora de traducir consistirá en ser fiel al original, no tanto en cuanto a mantener la literalidad (palabra por palabra) como en lo que se refiere al contenido. Esto puede lograrse en algunos casos mediante una traducción literal, pero no siempre será la mejor opción.

En las partes del texto que correspondan con esta clasificación, encontraremos principalmente dificultades de tipo lingüístico, relacionadas a menudo con el léxico y con las construcciones sintácticas. En el segundo tipo antes mencionado, encontraremos problemas de tipo pragmático, que se comentan más adelante.

Relacionado con los problemas de tipo léxico, parte del vocabulario más utilizado (como el que se recoge en el glosario) y, en concreto, muchos de los términos técnicos son en realidad calcos o préstamos del inglés. Esto ocurre a menudo en áreas de conocimiento relacionadas con la tecnología o la ciencia. Otras muchas de estas palabras son muy similares en ambos idiomas debido a que, en ambos casos, descienden del latín o del griego.

Un calco es la estrategia de traducción mediante la cual se traducen literalmente todos los elementos de un sintagma, pero respetando el orden natural del idioma meta. Algunos ejemplos de calco que se repiten a lo largo del texto podrían ser: “dopaje” (“doping”), “unión PN” (“PN junction”), “aceptor” (“acceptor”), “relación de Einstein” (“Einstein Relation”). Esta estrategia es muy común en este ámbito, ya que es una forma de trasladar conceptos precisos al idioma meta por medio de nombres que son equivalentes exactos.

Un préstamo, en cambio, se refiere a una palabra que se ha utilizado tal cual es en el idioma origen o, en el caso de que se naturalice, a la que se ha modificado la grafía para que siga las normas del idioma meta. Ejemplos de esto serían términos tan comunes como “voltaje” o “electrón”. El término “voltaje” fue acuñado primero en inglés, a partir del nombre de Alessandro Volta, quien desarrolló la primera pila eléctrica. Por su parte, el término “electrón”, aunque fue acuñado en inglés (con su significado actual, de partícula subatómica), en última instancia proviene del griego clásico, de la palabra “ámbar” (esto está relacionado con el hecho de que una de las primeras experiencias humanas con la electricidad está relacionada con este material).

El tratamiento de los verbos requiere un análisis propio. En primer lugar, nos en-

contramos con un uso de la primera y la segunda persona más abundante de lo que consideramos apropiado en un texto de estas características en español. Por ello, recurriremos a técnicas de transposición para cambiar la forma verbal, permitiendo utilizar convenciones más propias del español. Se decide mantener algunas instancias, ya que también en español se puede ver su uso (aunque no tan abundante), mientras que en otros casos utilizamos esta técnica de traducción para convertirlas en oraciones impersonales. A continuación se muestran algunos ejemplos de conservación de la primera persona: “Nonetheless, we do face a dilemma” (“Aun así, nos encontramos ante un dilema”), “Our treatment of device physics. . .” (“Nuestra presentación de la física de los dispositivos. . .”). Por el contrario, algunos ejemplos de transposiciones podrían ser: “In this chapter, we begin. . .” (“Este capítulo comienza. . .”), “Our ultimate objective in this chapter” (“El principal objetivo de este capítulo”).

Por otra parte, el uso de la pasiva es habitual en este texto, un rasgo muy característico de este género en inglés, aunque no así en español. A menudo optamos por la técnica habitual de convertir estos tiempos verbales en pasivas reflejas. Por ejemplo, tenemos: “the current is considered” (“se considera que la corriente”). En otras ocasiones, los convertimos a la voz activa. Por ejemplo: “the charge carriers are accelerated by the field” (“el campo acelera los portadores de carga”). En este caso es posible escoger esta opción porque se menciona el agente que realiza la acción.

Además de la pasiva, otra forma muy habitual en inglés, cuyo uso también tratamos de evitar en el texto meta, es el gerundio. La técnica de traducción que nos permite variar la forma verbal es de nuevo la transposición. Algunos ejemplos de estas transposiciones podrían ser: “forcing” (“lo que fuerza”), “Introducing a high local concentration of ink molecules” (“la gota introduce una alta concentración local de moléculas de tinta”).

Como último apunte en relación con la traducción de los verbos, queda la decisión de utilizar la forma de “tú” o de “usted”, ya que hemos decidido conservar algunos usos de la segunda persona. Este parece un ejemplo en el que la elección de “usted” parece firme, ya que se trata de un texto escrito, formal, y que pretende transmitir cierta autoridad.

También es común en el texto origen utilizar expresiones que “personifican” a entidades como los electrones. En la traducción se ha tendido a una mayor neu-

tralidad en estos casos. Por ejemplo: “Semiconductors behave in a similar manner” (“los semiconductores presentan un comportamiento similar”), “suffering from a very high resistance” (“presenta una resistencia muy alta”). Estos serían ejemplos de modulaciones, técnica que consiste en cambiar la “base conceptual” de la proposición, sin alterar su significado real.

El uso de la cursiva y de las comillas en el texto original supone un problema a la hora de traducir. El texto original es muy dado a enfatizar utilizando cualquiera de los dos métodos. En español, no utilizamos las comillas de esta manera, mientras que sí se puede utilizar la cursiva, aunque no sería recomendable hacerlo con tanta frecuencia como encontramos aquí. Así, decidimos en la traducción escoger en qué ocasiones mantener el énfasis (que aparecerá en cursiva en todos los casos). Por lo general, se mantiene cuando aparece un término nuevo junto a su definición (en algunos de estos casos no es necesario porque el término en cuestión ya aparece destacado en negrita, como introducción al apartado). Por ejemplo, enfatizamos en la traducción “bandgap energy”, “density”, pero no “*insufficient*”. En algunos casos en los que el énfasis nos parece necesario para comprender lo que el autor quiere destacar, también se mantiene la cursiva. Por ejemplo, en “*incomplete* covalent bonds”.

4.1.2. Problemas extralingüísticos

Consideraremos como problemas extralingüísticos aquellos que hacen referencia a cuestiones de tipo temático, cultural o enciclopédico. En general, no hemos encontrado muchas dificultades de estas características. Solamente en un punto concreto de la traducción encontramos un problema que entra dentro de esta clasificación.

En la introducción encontramos “just as we need to eat our broccoli...”. Al margen del problema relacionado con el registro (más coloquial que la media del texto), que representaría un problema de estilo, consideramos que “eat our broccoli” es una expresión que hace referencia a un alimento más popular en la cultura anglosajona, por lo que en el texto meta decidimos utilizar una generalización, y convertirlo en “verdura”.

4.1.3. Problemas instrumentales

Clasificaremos como problemas instrumentales aquellos que derivan de la dificultad en la documentación (por requerir información poco accesible o difícil de encontrar) o en el uso de herramientas informáticas.

En el caso que nos ocupa, debido a que se trata de un libro de texto, que pretende ser un documento bastante autocontenido, no hemos incurrido en dificultades de documentación en el idioma origen. Al mismo tiempo, debido a la abundancia de información, tampoco se puede hablar de problemas de este tipo en el idioma meta. Las pocas menciones a fuentes de referencia que encontramos remiten a demostraciones y desarrollo de conceptos que el autor no considera el objetivo de su libro.

La única dificultad de tipo instrumental tiene que ver con la maquetación del texto, en particular con la imitación del aspecto del texto original. Más concretamente, debemos tener cuidado a la hora de incluir las ecuaciones, ya que deben estar presentadas de una manera particular. Deben aparecer en una línea aparte, incluso si formalmente se trata del mismo párrafo que el texto que le precede y el que le sigue. También deben seguir una numeración, lo cual es muy importante para la cohesión del texto, ya que son referenciadas a menudo siguiendo esta numeración.

A lo largo del texto también aparecen una serie de figuras, que siguen una numeración similar a la de las ecuaciones, la cual también se utiliza para hacer referencia a dichas figuras.

4.1.4. Problemas pragmáticos

Los problemas pragmáticos son aquellos relacionados con los actos de habla presentes en el texto original, la intencionalidad del autor, las presuposiciones y las implicaturas, así como los derivados del encargo de traducción, de las características del destinatario y del contexto en el que se efectúa la traducción.

Como se ha explicado anteriormente, en este texto conviven dos registros diferentes. El segundo registro de nuestra clasificación (el que menos predomina) se emplea en algunas ocasiones para apelar al lector y se caracteriza por el uso de la primera o la segunda persona. En ocasiones sirve simplemente para expresar la

intencionalidad del autor (por ejemplo: “Our treatment of device physics. . .”, “we should emphasize. . .”). En otros casos, emplea el imperativo para plantear cuestiones al lector, con la intención de que este examine los conocimientos expuestos (por ejemplo: “Determine the velocity of the electrons.”), o formula preguntas (“What happens if the mobility is halved?”). En contadas ocasiones, emplea expresiones marcadamente más cargadas de subjetividad, también para apelar al lector (por ejemplo: “Why do we bother with the concept of the hole?”, “do not despair”). En estos casos, decidimos no mantener este tipo de expresiones, y en su lugar las suavizamos o neutralizamos. Esto es debido a que, en un texto de este tipo en español, lo consideramos inusual.

En términos generales, en inglés se admite más la yuxtaposición entre coloquialidad y discurso técnico. Por ello, en estos casos se emplearán técnicas de traducción que permitan adaptar el texto a las convenciones propias del español.

En general, se emplean técnicas de modulación para suavizar algunas apelaciones al lector que parecen excesivamente directas; e incluso ocasionalmente se empleará una omisión. Los siguientes ejemplos ilustran la aplicación de estas técnicas: “successfully reach the point” (“alcanzan el punto”), contiene una omisión; “And, most importantly, why should we care?! Well, patience is a virtue and we will answer these questions in the next section.” (“Y, lo más importante, ¿cuál es la importancia de esto? Estas preguntas se responderán en la siguiente sección.”), en este caso también se ha omitido parte del texto original, además de la modulación en “why should we care”, en la que evitamos a toda costa el signo de exclamación.

Fuentes

Hurtado Albir, A. (2001). *Traducción y traductología: introducción a la traductología*. Madrid: Cátedra.

5. Ficha documental

Información deseada	Lugar donde buscarla y ruta de búsqueda	Información encontrada	Uso que se le ha dado a la información
1. Texto original completo		www.csun.edu/~acm31201/Old%20Class%20Work/ECE%20340/Fundamentals%20of%20Microelectronics.pdf	Esta fuente es un libro de texto titulado <i>Fundamentals of Microelectronics</i> . De aquí se ha extraído el fragmento a traducir.
2. Obras monográficas especializadas en el ámbito temático escritas para no especialistas			No ha sido necesaria la búsqueda de textos complementarios en el idioma origen.

3. Artículos especializados sobre el ámbito temático			No ha sido necesaria la búsqueda de textos complementarios en el idioma origen.
4. Textos paralelos en la lengua original			No ha sido necesaria la búsqueda de textos paralelos en el idioma origen.
5. Terminología especializada (definiciones en la lengua original)	Búsqueda en Google: “electron shell”	www.khanacademy.org/science/biology/chemistry-of-life/electron-shells-and-orbitals/a/the-periodic-table-electron-shells-and-orbitals-article	Encontramos la definición de “electron shell”, que nos sirve para establecer la relación con el equivalente en español.
	Búsqueda en Google: “Einstein Relation”	www.britannica.com/science/electricity/Kirchhoffs-laws-of-electric-circuits#toc71581	Encontramos la definición de “Einstein Relation”, que servirá como base para futuras búsquedas, ya en español.

6. Equivalencias	www.wordreference.com	La información encontrada corresponde con los términos que aparecen en el glosario. A menudo se han consultado los mismos términos en ambas fuentes (Wordreference y Linguee) para contrastar.	Se han consultado algunas equivalencias inglés-español, que aparecen en el glosario.
	www.linguee.es	La información encontrada corresponde con los términos que aparecen en el glosario.	Se han consultado algunas equivalencias inglés-español. En los casos en los que se utiliza este recurso, no es para averiguar el significado de un término, sino para tener una idea rápida de los equivalentes comunes.

	Búsqueda en Google: “Terminal velocity”	es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_l%C3%ADmite	Artículo en Wikipedia en español que se corresponde con el artículo en inglés para “Terminal velocity”. Nos proporciona dos posibles equivalentes.
7. Verificación de equivalencias (definiciones en la lengua meta)	Búsqueda en Google: “velocidad límite”	hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbases/airfri2.html	En este texto en español, que trata sobre la física de la caída de los objetos, encontramos un uso del equivalente para “terminal velocity”, lo que nos sirve para decidir entre dos posibles.

8. Textos paralelos en la lengua meta	Búsqueda en Google: “portadores de carga”	ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/fundamentos-fisicos/contenidos/Teoria/Transparencias%20Tema%202.pdf	En esta fuente encontramos muchas de las equivalencias recogidas en el glosario. El texto nos ha servido para escoger entre varias posibilidades (por ejemplo, entre “portadores” y “portadoras”, ya que se dan casos de ambas).
---------------------------------------	---	---	--

	books.google.es/books?id=S2aof-Z5doUC&pg=PA69&lpg=PA69&dq=relacion+de+einstein+difusion&source=bl&ots=wmkfeMDK3B&sig=ok8rvu-AR1SzCN5U35dyLG3Ea5Y&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjVxuvExcVXAhWHJcAKHW5PDMAQ6AEIPDAD#v=onepage&q=relacion%20de%20einstein%20difusion&f=false	Libro: Hlawiczka, P. (1977). <i>Introducción a la electrónica cuántica</i> . Barcelona: Reverte.	Lo encontramos con la intención de verificar el uso de “relación de Einstein”. Sin embargo, resulta útil como texto paralelo de forma más general: tiene una estructura similar al nuestro, también incluye ecuaciones y figuras, y se puede tomar ejemplo en cuanto al estilo y tono del lenguaje. Es, pues, un texto bastante similar al que queremos crear.
--	---	---	--

Como reflexión general en cuanto a las fuentes utilizadas, no ha sido necesaria la búsqueda de muchos textos paralelos en lengua origen, debido en parte a tener conocimientos previos en la materia; pero, sobre todo, por contar con un texto origen de tipo didáctico bastante completo y exhaustivo. Se podría decir que el libro del cual traducimos trata de ser autocontenido.

Lo mismo ocurre en lo que respecta a la terminología especializada en el idioma origen. La necesidad de documentación más allá del texto origen se da, principalmente, para asegurar que los equivalentes en español son los adecuados. Para ello se han encontrado definiciones en este idioma, con las que nos hemos asegurado de que los conceptos coinciden con los descritos en el texto que traducimos.

6. Glosario

En esta sección se recoge un glosario con los términos que consideramos más relevantes. Esta lista se ha recogido para su uso durante la traducción y revisión del texto, con el objetivo de mantener una serie de equivalencias consistentes entre términos de los textos origen y meta.

- **Acceptor** → Aceptor
- **At the outset** → Al principio / desde el principio
- **Bandgap energy** → Energía de salto de banda
- **Bias** → Polarización
- **Bond** → Enlace
- **Capacitor** → Condensador
- **Charge carrier** → Portador de carga(s)
- **Covalent bond** → Enlace covalente
- **Cross section** → Sección (transversal)
- **Current** → Corriente
- **Derivation** → Desarrollo (matemático)
- **Device** → Dispositivo
- **Donor** → Donante
- **Doping** → Dopaje
- **Drift [carriers]** → Deriva / arrastre (de portadores)
- **Einstein Relation** → Relación de Einstein
- **Extrinsic semiconductors** → Semiconductores extrínsecos
- **Forward bias** → Polarización directa
- **Free charge carriers** → Portadores de carga libres
- **Free electron** → Electrón libre

- High performance → De altas prestaciones
- **Holes** → Huecos
- **Insulator** → Aislante
- **Intrinsic semiconductors** → Semiconductores intrínsecos
- Operation → Funcionamiento
- Outline → Resumen / Esquema
- **PN junction** → Unión PN
- **Resistor** → Resistencia
- **Reverse bias** → Polarización inversa
- **Shell** [electron] → Capa (de valencia)
- **Terminal velocity** → Velocidad límite
- **Thermal energy** → Energía térmica
- **Voltage** → Voltaje / tensión

7. Conclusión

Con la finalización de este Trabajo de Fin de Máster, se ha completado un encargo de traducción de una extensión mayor que los manejados en el desarrollo de las asignaturas del curso. Además, brinda la oportunidad de trabajar en un texto de elección propia, lo que personalmente me ha permitido aprovechar las áreas de conocimiento en las que dispongo de mayor experiencia (debido a haber cursado previamente un Grado en Ingeniería, con especialización en materia de electrónica).

Este conocimiento de la materia tratada me ha convencido de la necesidad de proporcionar traducciones de calidad para textos de aprendizaje. Por un lado, sirve para facilitar a los estudiantes la entrada al área de conocimiento, además de la familiarización con el lenguaje técnico. Por otra parte, el hecho de que los estudiantes cuenten con textos didácticos en su propio idioma ayudaría a sentar las bases del vocabulario técnico de manera más organizada y definitiva. La situación actual en este sentido es de prevalencia de préstamos y traducciones literales, a menudo incorrectas, debido a la fuerte predominancia del inglés.

El aprendizaje de cualquier disciplina de la ciencia o la ingeniería inevitablemente va a suponer, a largo plazo, adquirir también cierto dominio del inglés (al menos, del lenguaje técnico). Contar con libros introductorios traducidos al idioma propio puede hacer más llevaderas estas dos curvas de aprendizaje paralelas. Por esta razón, consideramos que tiene mayor aplicación práctica la traducción de textos de este tipo que, por ejemplo, de artículos científicos (*papers*).

El hecho de trabajar en un solo texto de mayor extensión nos permite practicar de forma más consistente y exhaustiva el género tratado. En otras palabras, nos permite desarrollar una dinámica de trabajo y un estilo de traducción adaptados al tipo de texto del que partimos. A esto ha ayudado el realizar una reflexión para

extraer los rasgos más característicos del mismo; además de otra reflexión posterior sobre nuestro propio proceso de traducción, que ayudará a retener las estrategias adquiridas.

Por otra parte, la elección de este texto nos ha permitido trabajar con este género por primera vez, lo que ha supuesto algunas dificultades nuevas, como pueda ser la inclusión de las ecuaciones y expresiones matemáticas dentro del texto, así como la maquetación del mismo. La presentación del texto se ha realizado mediante LaTeX, un sistema de preparación de documentos muy utilizado en publicaciones científicas y técnicas (los artículos de investigación, por ejemplo, rara vez no están presentados en LaTeX). Cabe destacar que esta herramienta es completamente distinta a las herramientas de Microsoft Office, ya que se trabaja utilizando comandos de texto, en lugar de un entorno gráfico. Esto puede suponer una importante dificultad de tipo instrumental para un traductor ya que, para poder recrear el aspecto del texto original, deberá adaptarse al nuevo entorno de trabajo.

ANEXOS

ANEXO 1:
TEXTO ORIGINAL
EN INGLÉS

Fundamentals of Microelectronics

[...]

2

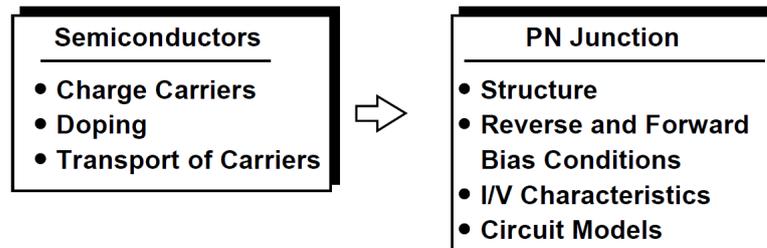
Basic Physics of Semiconductors

Microelectronic circuits are based on complex semiconductor structures that have been under active research for the past six decades. While this book deals with the analysis and design of *circuits*, we should emphasize at the outset that a good understanding of *devices* is essential to our work. The situation is similar to many other engineering problems, e.g., one cannot design a high-performance automobile without a detailed knowledge of the engine and its limitations.

Nonetheless, we do face a dilemma. Our treatment of device physics must contain enough depth to provide adequate understanding, but must also be sufficiently brief to allow quick entry into circuits. This chapter accomplishes this task.

Our ultimate objective in this chapter is to study a fundamentally-important and versatile device called the “diode.” However, just as we need to eat our broccoli before having dessert, we must develop a basic understanding of “semiconductor” materials and their current conduction mechanisms before attacking diodes.

In this chapter, we begin with the concept of semiconductors and study the movement of charge (i.e., the flow of current) in them. Next, we deal with the “*pn* junction,” which also serves as diode, and formulate its behavior. Our ultimate goal is to represent the device by a circuit model (consisting of resistors, voltage or current sources, capacitors, etc.), so that a circuit using such a device can be analyzed easily. The outline is shown below.



It is important to note that the task of developing accurate models proves critical for *all* microelectronic devices. The electronics industry continues to place greater demands on circuits, calling for aggressive designs that push semiconductor devices to their limits. Thus, a good understanding of the internal operation of devices is necessary.¹

2.1 Semiconductor Materials and Their Properties

Since this section introduces a multitude of concepts, it is useful to bear a general outline in mind:

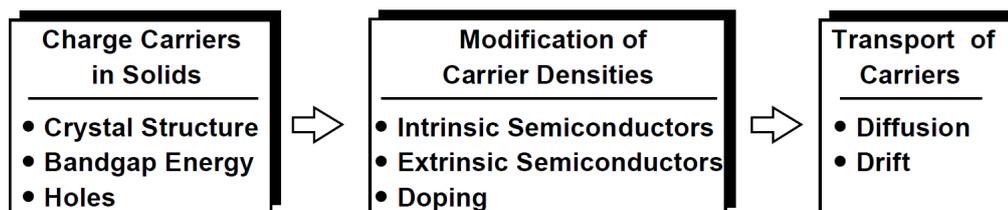


Figure 2.1 Outline of this section.

This outline represents a logical thought process: (a) we identify charge carriers in solids and formulate their role in current flow; (b) we examine means of modifying

¹As design managers often say, “If you do not push the devices and circuits to their limit but your competitor does, then you lose to your competitor.”

the density of charge carriers to create desired current flow properties; (c) we determine current flow mechanisms. These steps naturally lead to the computation of the current/voltage (I/V) characteristics of actual diodes in the next section.

2.1.1 Charge Carriers in Solids

Recall from basic chemistry that the electrons in an atom orbit the nucleus in different “shells.” The atom’s chemical activity is determined by the electrons in the outermost shell, called “valence” electrons, and how complete this shell is. For example, neon exhibits a complete outermost shell (with eight electrons) and hence no tendency for chemical reactions. On the other hand, sodium has only one valence electron, ready to relinquish it, and chloride has seven valence electrons, eager to receive one more. Both elements are therefore highly reactive.

The above principles suggest that atoms having approximately four valence electrons fall somewhere between inert gases and highly volatile elements, possibly displaying interesting chemical and physical properties. Shown in Fig. 2.2 is a section of the periodic table containing a number of elements with three to five valence electrons. As the most popular material in microelectronics, silicon merits a detailed analysis.²

	III	IV	V	
	Boron (B)	Carbon (C)		
• • •	Aluminum (Al)	Silicon (Si)	Phosphorous (P)	• • •
	Galium (Ga)	Germanium (Ge)	Arsenic (As)	
		• • •		

Figure 2.2 Section of the periodic table.

Covalent Bonds A silicon atom residing in isolation contains four valence electrons [Fig. 2.3(a)], requiring another four to complete its outermost shell. If processed properly, the silicon material can form a “crystal” wherein each atom is surrounded by

²Silicon is obtained from sand after a great deal of processing.

exactly four others [Fig. 2.3(b)]. As a result, each atom *shares* one valence electron with its neighbors, thereby completing its own shell and those of the neighbors. The “bond” thus formed between atoms is called a “covalent bond” to emphasize the sharing of valence electrons.

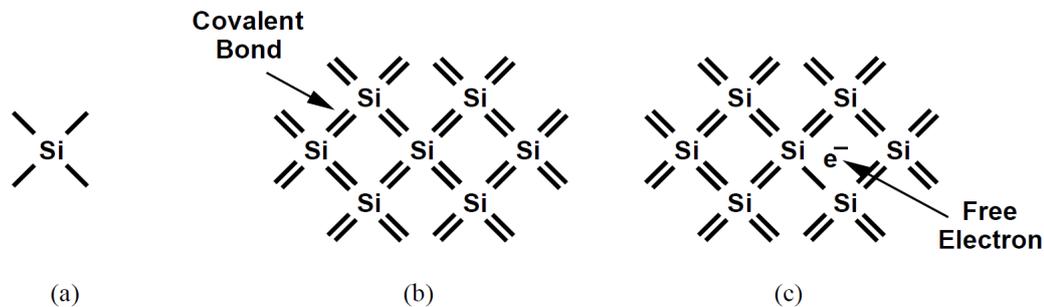


Figure 2.3 (a) Silicon atom, (b) covalent bonds between atoms, (c) free electron released by thermal energy.

The uniform crystal depicted in Fig. 2.3(b) plays a crucial role in semiconductor devices. But, does it carry current in response to a voltage? At temperatures near absolute zero, the valence electrons are confined to their respective covalent bonds, refusing to move freely. In other words, the silicon crystal behaves as an insulator for $T \rightarrow 0K$. However, at higher temperatures, electrons gain thermal energy, occasionally breaking away from the bonds and acting as free charge carriers [Fig. 2.3(c)] until they fall into another incomplete bond. We will hereafter use the term “electrons” to refer to free electrons.

Holes When freed from a covalent bond, an electron leaves a “void” behind because the bond is now incomplete. Called a “hole,” such a void can readily absorb a free electron if one becomes available. Thus, we say an “electron-hole pair” is generated when an electron is freed, and an “electron-hole recombination” occurs when an electron “falls” into a hole.

Why do we bother with the concept of the hole? After all, it is the free electron that actually moves in the crystal. To appreciate the usefulness of holes, consider the time evolution illustrated in Fig. 2.4. Suppose covalent bond number 1 contains a hole after losing an electron some time before $t = t_1$. At $t = t_2$, an electron breaks away from bond number 2 and recombines with the hole in bond number 1. Similarly, at $t = t_3$, an electron leaves bond number 3 and falls into the hole in bond number 2. Looking at the three “snapshots,” we can say one electron has traveled from right to left, or, alternatively, one hole has moved from left to right. This view of current flow by holes proves extremely useful in the analysis of semiconductor devices.

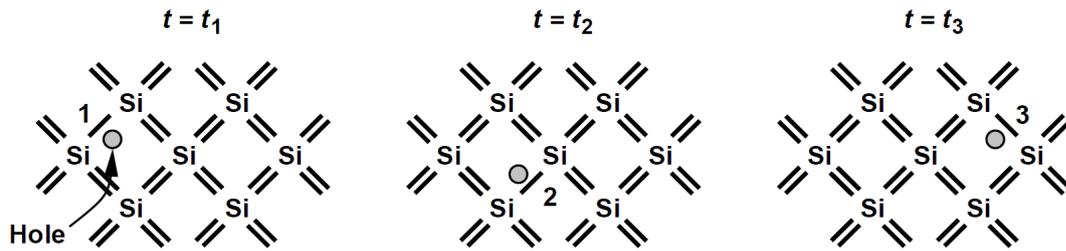


Figure 2.4 Movement of electron through crystal.

Bandgap Energy We must now answer two important questions. First, does *any* thermal energy create free electrons (and holes) in silicon? No, in fact, a minimum energy is required to dislodge an electron from a covalent bond. Called the “bandgap energy” and denoted by E_g , this minimum is a fundamental property of the material. For silicon, $E_g = 1.12$ eV.³

The second question relates to the conductivity of the material and is as follows. How *many* free electrons are created at a given temperature? From our observations thus far, we postulate that the number of electrons depends on both E_g and T : a greater E_g translates to fewer electrons, but a higher T yields more electrons. To simplify future derivations, we consider the *density* (or concentration) of electrons, i.e., the number of electrons per unit volume, n_i , and write for silicon:

$$n_i = 5.2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT} \text{ electrons/cm}^3 \quad (2.1)$$

where $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K is called the Boltzmann constant. The derivation can be found in books on semiconductor physics, e.g., [1]. As expected, materials having a larger E_g exhibit a smaller n_i . Also, as $T \rightarrow 0$, so do $T^{3/2}$ and $\exp[-E_g/(2kT)]$, thereby bringing n_i toward zero.

The exponential dependence of n_i upon E_g reveals the effect of the bandgap energy on the conductivity of the material. Insulators display a high E_g ; for example, $E_g = 2.5$ eV for diamond. Conductors, on the other hand, have a small bandgap. Finally, *semiconductors* exhibit a moderate E_g , typically ranging from 1 eV to 1.5 eV.

Example 2.1

Determine the density of electrons in silicon at $T = 300$ K (room temperature) and $T = 600$ K.

Solution

³The unit eV (electron volt) represents the energy necessary to move one electron across a potential difference of 1 V. Note that $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ J.

Since $E_g = 1.12 \text{ eV} = 1.792 \times 10^{-19} \text{ J}$, we have

$$n_i(T = 300 \text{ K}) = 1.08 \times 10^{10} \text{ electrons/cm}^3 \quad (2.2)$$

$$n_i(T = 600 \text{ K}) = 1.54 \times 10^{15} \text{ electrons/cm}^3. \quad (2.3)$$

Since for each free electron, a hole is left behind, the density of holes is also given by (2.2) and (2.3).

Exercise

Repeat the above exercise for a material having a bandgap of 1.5 eV.

The n_i values obtained in the above example may appear quite high, but, noting that silicon has $5 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^3$, we recognize that only one in 5×10^{12} atoms benefit from a free electron at room temperature. In other words, silicon still seems a very poor conductor. But, do not despair! We next introduce a means of making silicon more useful.

2.1.2 Modification of Carrier Densities

Intrinsic and Extrinsic Semiconductors The “pure” type of silicon studied thus far is an example of “intrinsic semiconductors,” suffering from a very high resistance. Fortunately, it is possible to modify the resistivity of silicon by replacing some of the atoms in the crystal with atoms of another material. In an intrinsic semiconductor, the electron density, $n(= n_i)$, is equal to the hole density, p . Thus,

$$np = n_i^2. \quad (2.4)$$

We return to this equation later.

Recall from Fig. 2.2 that phosphorus (P) contains five valence electrons. What happens if some P atoms are introduced in a silicon crystal? As illustrated in Fig. 2.5, each P atom shares four electrons with the neighboring silicon atoms, leaving the fifth electron “unattached.” This electron is free to move, serving as a charge carrier. Thus, if N phosphorus atoms are uniformly introduced in each cubic centimeter of a silicon crystal, then the density of free electrons rises by the same amount.

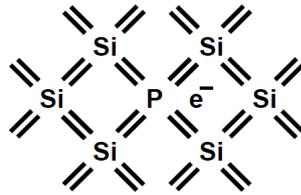


Figure 2.5 Loosely-attached electron with phosphorus doping.

The controlled addition of an “impurity” such as phosphorus to an intrinsic semiconductor is called “doping,” and phosphorus itself a “dopant.” Providing many more free electrons than in the intrinsic state, the doped silicon crystal is now called “extrinsic,” more specifically, an “ n -type” semiconductor to emphasize the abundance of free electrons.

As remarked earlier, the electron and hole densities in an intrinsic semiconductor are equal. But, how about these densities in a doped material? It can be proved that even in this case,

$$np = n_i^2, \quad (2.5)$$

where n and p respectively denote the electron and hole densities in the extrinsic semiconductor. The quantity n_i represents the densities in the intrinsic semiconductor (hence the subscript i) and is therefore independent of the doping level [e.g., Eq. (2.1) for silicon].

Example 2.2

The above result seems quite strange. How can np remain constant while we add more donor atoms and increase n ?

Solution

Equation (2.5) reveals that p must fall *below* its intrinsic level as more n -type dopants are added to the crystal. This occurs because many of the new electrons donated by the dopant “recombine” with the holes that were created in the intrinsic material.

Exercise

Why can we not say that $n + p$ should remain constant?

Example 2.3

A piece of crystalline silicon is doped uniformly with phosphorus atoms. The doping density is 10^{16} atoms/cm³. Determine the electron and hole densities in this material at the room temperature.

Solution

The addition of 10^{16} P atoms introduces the same number of free electrons per cubic centimeter. Since this electron density exceeds that calculated in Example 2.1 by six orders of magnitude, we can assume

$$n = 10^{16} \text{ electrons/cm}^3 \quad (2.6)$$

It follows from (2.2) and (2.5) that

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.7)$$

$$= 1.17 \times 10^4 \text{ holes/cm}^3 \quad (2.8)$$

Note that the hole density has dropped below the intrinsic level by six orders of magnitude. Thus, if a voltage is applied across this piece of silicon, the resulting current predominantly consists of electrons.

Exercise

At what doping level does the hole density drop by three orders of magnitude?

This example justifies the reason for calling electrons the “majority carriers” and holes the “minority carriers” in an *n*-type semiconductor. We may naturally wonder if it is possible to construct a “*p*-type” semiconductor, thereby exchanging the roles of electrons and holes.

Indeed, if we can dope silicon with an atom that provides an *insufficient* number of electrons, then we may obtain many *incomplete* covalent bonds. For example, the table in Fig. 2.2 suggests that a boron (B) atom—with three valence electrons—can form only three complete covalent bonds in a silicon crystal (Fig. 2.6). As a result, the fourth bond contains a hole, ready to absorb a free electron. In other words, *N* boron atoms contribute *N* boron holes to the conduction of current in silicon. The structure in Fig. 2.6 therefore exemplifies a *p*-type semiconductor, providing holes as majority carriers. The boron atom is called an “acceptor” dopant.

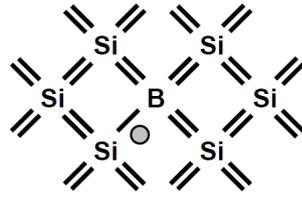


Figure 2.6 Available hole with boron doping.

Let us formulate our results thus far. If an intrinsic semiconductor is doped with a density of N_D ($\gg n_i$) donor atoms per cubic centimeter, then the mobile charge densities are given by

$$\text{Majority Carriers : } n \approx N_D \quad (2.9)$$

$$\text{Minority Carriers : } p \approx \frac{n_i^2}{N_D}. \quad (2.10)$$

Similarly, for a density of N_A ($\gg n_i$) acceptor atoms per cubic centimeter:

$$\text{Majority Carriers : } p \approx N_A \quad (2.11)$$

$$\text{Minority Carriers : } n \approx \frac{n_i^2}{N_A}. \quad (2.12)$$

Since typical doping densities fall in the range of 10^{15} to 10^{18} atoms/cm³, the above expressions are quite accurate.

Example 2.4

Is it possible to use other elements of Fig. 2.2 as semiconductors and dopants?

Solution

Yes, for example, some early diodes and transistors were based on germanium (Ge) rather than silicon. Also, arsenic (As) is another common dopant.

Exercise

Can carbon be used for this purpose?

Figure 2.7 summarizes the concepts introduced in this section, illustrating the types

of charge carriers and their densities in semiconductors.

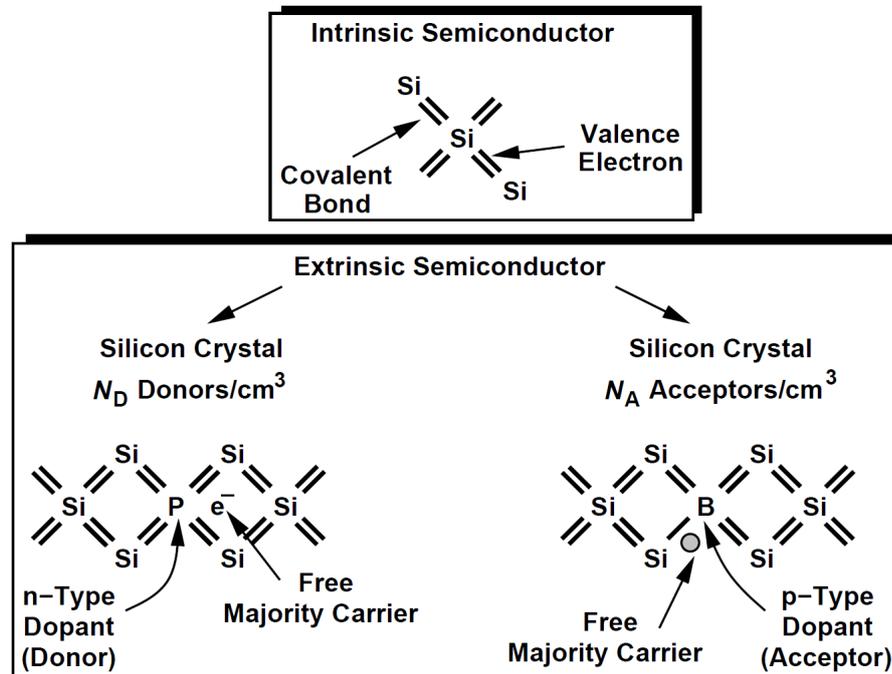


Figure 2.7 Summary of charge carriers in silicon.

2.1.3 Transport of Carriers

Having studied charge carriers and the concept of doping, we are ready to examine the *movement* of charge in semiconductors, i.e., the mechanisms leading to the flow of current.

Drift We know from basic physics and Ohm's law that a material can conduct current in response to a potential difference and hence an electric field.⁴ The field accelerates the charge carriers in the material, forcing some to flow from one end to the other. Movement of charge carriers due to an electric field is called "drift."⁵

Semiconductors behave in a similar manner. As shown in Fig. 2.8, the charge carriers are accelerated by the field and accidentally collide with the atoms in the crystal, even-

⁴Recall that the potential (voltage) difference, V , is equal to the negative integral of the electric field, E , with respect to distance: $V_{ab} = -\int_a^b E dx$.

⁵The convention for direction of current assumes flow of *positive* charge from a positive voltage to a negative voltage. Thus, if electrons flow from point A to point B , the current is considered to have a direction from B to A .

tually reaching the other end and flowing into the battery. The acceleration due to the field and the collision with the crystal counteract, leading to a *constant* velocity for the carriers.⁶ We expect the velocity, v , to be proportional to the electric field strength, E :

$$v \propto E, \quad (2.13)$$

and hence

$$v = \mu E, \quad (2.14)$$

where μ is called the “mobility” and usually expressed in $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. For example in silicon, the mobility of electrons, $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, and that of holes, $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Of course, since electrons move in a direction opposite to the electric field, we must express the velocity vector as

$$\vec{v}_e = -\mu_n \vec{E}. \quad (2.15)$$

For holes, on the other hand,

$$\vec{v}_h = \mu_p \vec{E}. \quad (2.16)$$

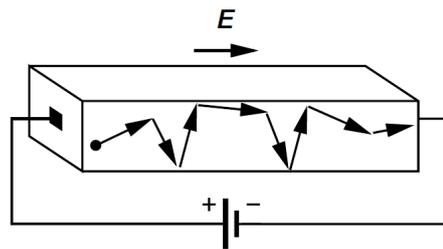


Figure 2.8 Drift in a semiconductor.

Example 2.5

A uniform piece of n -type silicon that is $1 \mu\text{m}$ long senses a voltage of 1 V . Determine the velocity of the electrons.

Solution

Since the material is uniform, we have $E = V/L$, where L is the length. Thus, $E = 10,000 \text{ V/cm}$ and hence $v = \mu_n E = 1.35 \times 10^7 \text{ cm/s}$. In other words, electrons take $(1 \mu\text{m})/(1.35 \times 10^7 \text{ cm/s}) = 7.4 \text{ ps}$ to cross the $1 \mu\text{m}$ length.

⁶This phenomenon is analogous to the “terminal velocity” that a sky diver with a parachute (hopefully, open) experiences.

Exercise

What happens if the mobility is halved?

With the velocity of carriers known, how is the current calculated? We first note that an electron carries a negative charge equal to $q = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$. Equivalently, a hole carries a positive charge of the same value. Now suppose a voltage V_1 is applied across a uniform semiconductor bar having a free electron density of n (Fig. 2.9). Assuming the electrons move with a velocity of v m/s, considering a cross section of the bar at $x = x_1$ and taking two “snapshots” at $t = t_1$ and $t = t_1 + 1$ second, we note that the total charge in v meters passes the cross section in 1 second. In other words, the current is equal to the total charge enclosed in v meters of the bar’s length. Since the bar has a width of W , we have:

$$I = -v \cdot W \cdot h \cdot n \cdot q, \quad (2.17)$$

where $v \cdot W \cdot h$ represents the volume, $n \cdot q$ denotes the charge density in coulombs, and the negative sign accounts for the fact that electrons carry negative charge.

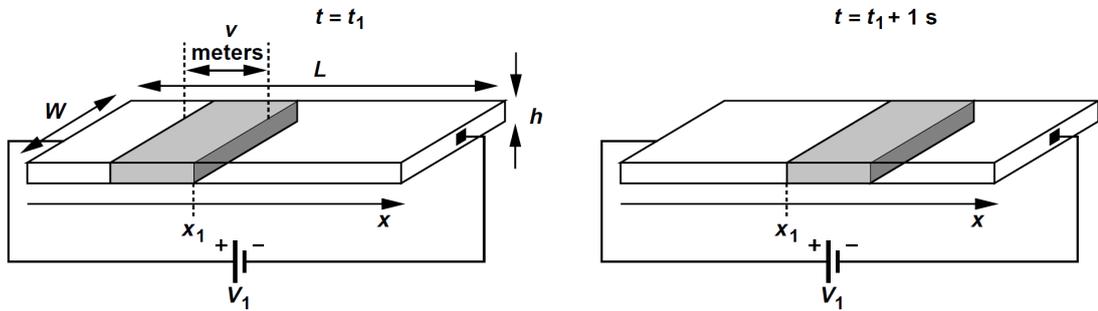


Figure 2.9 Current flow in terms of charge density.

Let us now reduce Eq. (2.17) to a more convenient form. Since for electrons, $v = -\mu_n E$, and since $W \cdot h$ is the cross section area of the bar, we write

$$J_n = \mu_n E \cdot n \cdot q, \quad (2.18)$$

where J_n denotes the “current density,” i.e., the current passing through a *unit* cross section area, and is expressed in A/cm^2 . We may loosely say, “the current is equal to the charge velocity times the charge density,” with the understanding that “current”

in fact refers to current density, and negative or positive signs are taken into account properly.

In the presence of both electrons and holes, Eq. (2.18) is modified to

$$J_{tot} = \mu_n E \cdot n \cdot q + \mu_p E \cdot p \cdot q \quad (2.19)$$

$$= q(\mu_n n + \mu_p p) E. \quad (2.20)$$

This equation gives the drift current density in response to an electric field E in a semiconductor having uniform electron and hole densities.

Example 2.6

In an experiment, it is desired to obtain equal electron and hole drift currents. How should the carrier densities be chosen?

Solution

We must impose

$$\mu_n n = \mu_p p, \quad (2.21)$$

and hence

$$\frac{n}{p} = \frac{\mu_p}{\mu_n}. \quad (2.22)$$

We also recall that $np = n_i^2$. Thus,

$$p = \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_p}} n_i \quad (2.23)$$

$$n = \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}} n_i. \quad (2.24)$$

For example, in silicon, $\mu_n/\mu_p = 1350/480 = 2.81$, yielding

$$p = 1.68 n_i \quad (2.25)$$

$$n = 0.596 n_i. \quad (2.26)$$

Since p and n are of the same order as n_i , equal electron and hole drift currents can occur for only a very lightly doped material. This confirms our earlier notion of majority carriers in semiconductors having typical doping levels of 10^{15} - 10^{18} atoms/cm³.

Exercise

How should the carrier densities be chosen so that the electron drift current is twice the hole drift current?

[...]

Diffusion In addition to drift, another mechanism can lead to current flow. Suppose a drop of ink falls into a glass of water. Introducing a high local concentration of ink molecules, the drop begins to “diffuse,” that is, the ink molecules tend to flow from a region of high concentration to regions of low concentration. This mechanism is called “diffusion.”

A similar phenomenon occurs if charge carriers are “dropped” (injected) into a semiconductor so as to create a *nonuniform* density. Even in the absence of an electric field, the carriers move toward regions of low concentration, thereby carrying an electric current so long as the nonuniformity is sustained. Diffusion is therefore distinctly different from drift.

Figure 2.11 conceptually illustrates the process of diffusion. A source on the left continues to inject charge carriers into the semiconductor, a nonuniform charge profile is created along the x -axis, and the carriers continue to “roll down” the profile.

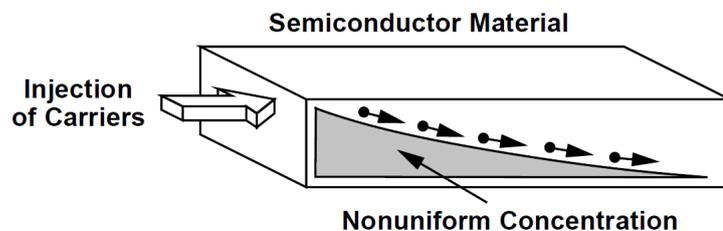


Figure 2.11 Diffusion in a semiconductor.

The reader may raise several questions at this point. What serves as the source of carriers in Fig. 2.11? Where do the charge carriers go after they roll down to the end of the profile at the far right? And, most importantly, why should we care?! Well, patience is a virtue and we will answer these questions in the next section.

Example 2.8

A source injects charge carriers into a semiconductor bar as shown in Fig. 2.12. Explain how the current flows.

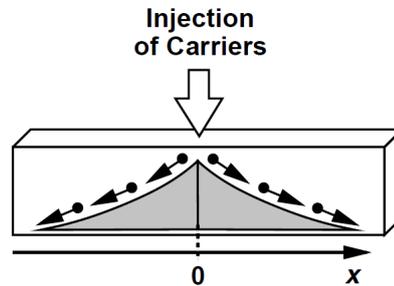


Figure 2.12 Injection of carriers into a semiconductor.

Solution

In this case, two symmetric profiles may develop in both positive and negative directions along the x -axis, leading to current flow from the source toward the two ends of the bar.

Exercise

Is KCL still satisfied at the point of injection?

Our qualitative study of diffusion suggests that the more nonuniform the concentration, the larger the current. More specifically, we can write:

$$I \propto \frac{dn}{dx}, \quad (2.39)$$

where n denotes the carrier concentration at a given point along the x -axis. We call dn/dx the concentration “gradient” with respect to x , assuming current flow only in the x direction. If each carrier has a charge equal to q , and the semiconductor has a cross section area of A , Eq. (2.39) can be written as

$$I \propto Aq \frac{dn}{dx}. \quad (2.40)$$

Thus,

$$I = AqD_n \frac{dn}{dx}, \quad (2.41)$$

where D_n is a proportionality factor called the “diffusion constant” and expressed in

cm²/s. For example, in intrinsic silicon, $D_n = 34$ cm²/s (for electrons), and $D_p = 12$ cm²/s (for holes).

As with the convention used for the drift current, we normalize the diffusion current to the cross section area, obtaining the current density as

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}. \quad (2.42)$$

Similarly, a gradient in hole concentration yields:

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}. \quad (2.43)$$

With both electron and hole concentration gradients present, the total current density is given by

$$J_{tot} = q \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right). \quad (2.44)$$

Example 2.9

Consider the scenario depicted in Fig. 2.11 again. Suppose the electron concentration is equal to N at $x = 0$ and falls linearly to zero at $x = L$ (Fig. 2.13). Determine the diffusion current.

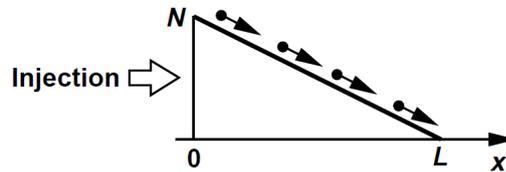


Figure 2.13 Current resulting from a linear diffusion profile.

Solution

We have

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2.45)$$

$$= -qD_n \cdot \frac{N}{L}. \quad (2.46)$$

The current is constant along the x -axis; i.e., all of the electrons entering the material at $x = 0$ successfully reach the point at $x = L$. While obvious, this observation prepares

us for the next example.

Exercise

Repeat the above example for holes.

Example 2.10

Repeat the above example but assume an exponential gradient (Fig. 2.14):

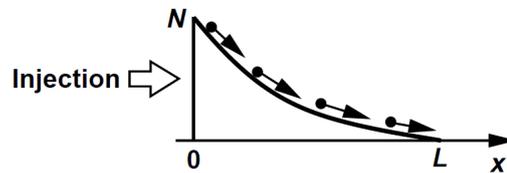


Figure 2.14 Current resulting from an exponential diffusion profile.

$$n(x) = N \exp \frac{-x}{L_d}, \quad (2.47)$$

where L_d is a constant.⁷

Solution

We have

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2.48)$$

$$= \frac{-qD_n N}{L_d} \exp \frac{-x}{L_d}. \quad (2.49)$$

Interestingly, the current is *not* constant along the x -axis. That is, some electrons vanish while traveling from $x = 0$ to the right. What happens to these electrons? Does this example violate the law of conservation of charge? These are important questions and will be answered in the next section.

⁷The factor L_d is necessary to convert the exponent to a dimensionless quantity.

Exercise

At what value of x does the current density drop to 1% its maximum value?

Einstein Relation Our study of drift and diffusion has introduced a factor for each: μ_n (or μ_p) and D_n (or D_p), respectively. It can be proved that μ and D are related as:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}. \quad (2.50)$$

Called the “Einstein Relation,” this result is proved in semiconductor physics texts, e.g., [1]. Note that $kT/q \approx 26$ mV at $T = 300$ K.

Figure 2.15 summarizes the charge transport mechanisms studied in this section.

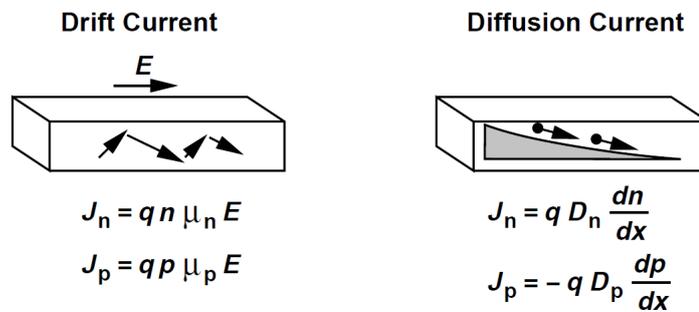


Figure 2.15 Summary of drift and diffusion mechanisms.

**ANEXO 2:
TEXTO FINAL
EN ESPAÑOL**

Fundamentos de microelectrónica

[...]

2

Bases de la física de semiconductores

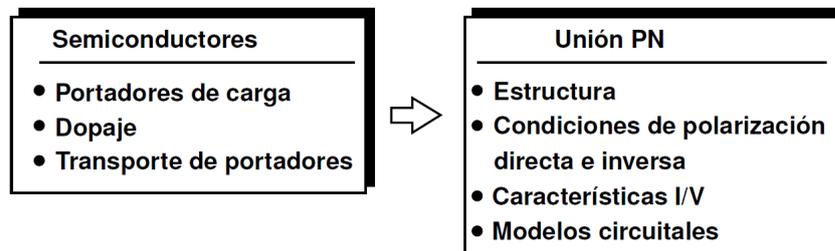
Los circuitos microelectrónicos están basados en complejas estructuras de semiconductores que se han investigado activamente durante las últimas seis décadas. Aunque este libro trata sobre el análisis y diseño de los circuitos, debemos comenzar resaltando que una correcta comprensión de los dispositivos es indispensable para nuestro trabajo. Esta necesidad es similar a la de otros muchos problemas de ingeniería; por ejemplo, no se puede diseñar un automóvil de altas prestaciones sin un conocimiento detallado del motor y sus limitaciones.

Aun así, nos encontramos ante un dilema. Nuestra presentación de la física de los dispositivos debe ser lo bastante detallada para proporcionar una comprensión adecuada, pero debe ser también suficientemente breve como para permitir pasar rápidamente a los circuitos. Este capítulo se ocupa de esa tarea.

El principal objetivo de este capítulo es el estudio de un dispositivo versátil y de fundamental importancia conocido como *diodo*. Sin embargo, del mismo modo que

solemos comer la verdura antes que el postre, necesitamos desarrollar una comprensión básica de los materiales semiconductores y sus mecanismos de conducción de corriente antes de pasar a los diodos.

Este capítulo comienza con el concepto de semiconductor y el estudio del movimiento de las cargas (es decir, el flujo de corriente) en su interior. A continuación, se presenta la unión pn , que también sirve como diodo, y se formula su comportamiento. El objetivo final es representar el dispositivo como un modelo circuital (formado por resistencias, fuentes de tensión o corriente, condensadores, etc.), de forma que un circuito que lo incluya pueda ser analizado con facilidad. A continuación se muestra un esquema del capítulo.



Es importante resaltar que el desarrollo de modelos precisos resulta imprescindible para todos los dispositivos microelectrónicos. La industria electrónica es cada vez más exigente con los circuitos, lo que obliga a realizar diseños agresivos que llevan a los dispositivos de semiconductor al límite. Por este motivo, se hace necesaria una correcta comprensión del funcionamiento interno de los dispositivos¹.

2.1 Materiales semiconductores y sus propiedades

Dado que esta sección introduce multitud de conceptos, puede resultar útil comenzar con el siguiente esquema:

¹Los responsables de diseño suelen decir que “Si nosotros no llevamos nuestros dispositivos y circuitos al límite pero la competencia sí, perdemos ante la competencia”.

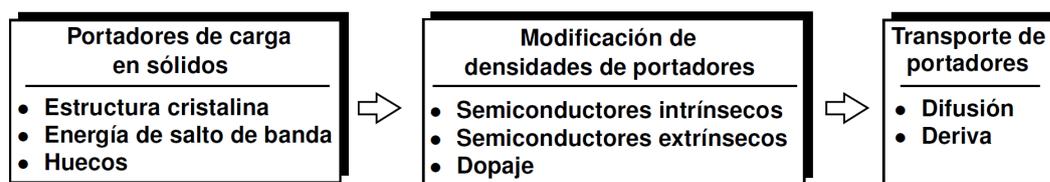


Figura 2.1 Esquema de esta sección.

Este esquema sigue un flujo de pensamiento lógico: (a) se identifican los portadores de carga en sólidos y se formula su papel en el flujo de corriente; (b) se consideran formas de modificar la densidad de portadores de carga para crear las propiedades de flujo de corriente deseadas; (c) se determinan los mecanismos de flujo de corriente. Estos pasos llevan inevitablemente al cálculo de las características de corriente/voltaje (I/V) de los diodos propiamente dichos en la siguiente sección.

2.1.1 Portadores de carga en sólidos

Recordemos, de los fundamentos de la química, que los electrones de un átomo orbitan alrededor del núcleo en distintas capas. La actividad química del átomo viene determinada por los electrones en la capa más externa, a los que se llama electrones de valencia, y por lo completa que esté dicha capa. El neón, por ejemplo, muestra una capa exterior completa (con ocho electrones), y por lo tanto no tiende a las reacciones químicas. El sodio, por otra parte, tiene solamente un electrón de valencia, y tiende a perderlo, mientras que el cloro tiene siete electrones de valencia, por lo que busca recibir uno más. Por este motivo, ambos elementos muestran una alta reactividad.

Los principios anteriores sugieren que los elementos que tengan alrededor de cuatro electrones de valencia se encuentran a medio camino entre los gases inertes y los elementos muy volátiles, y posiblemente muestren propiedades físicas y químicas interesantes. En la Fig. 2.2 se muestra una sección de la tabla periódica que contiene algunos elementos con entre tres y cinco electrones de valencia. Al ser el elemento más utilizado en microelectrónica, el silicio merece un análisis detallado².

²El silicio se obtiene de la arena, tras un largo proceso.

	III	IV	V	
	Boro (B)	Carbono (C)		
• • •	Aluminio (Al)	Silicio (Si)	Fósforo (P)	• • •
	Galio (Ga)	Germanio (Ge)	Arsénico (As)	
		• • •		

Figura 2.2 Sección de la tabla periódica.

Enlaces covalentes Un átomo de silicio aislado contiene cuatro electrones de valencia [Fig. 2.3(a)], por lo que requiere otros cuatro para completar su capa externa. Si se procesa adecuadamente, el silicio forma un cristal donde cada átomo está rodeado de exactamente otros cuatro [Fig. 2.3(b)]. Como consecuencia, cada átomo comparte un electrón de valencia con cada uno de sus vecinos y, de esta forma, completa su propia capa de valencia y las de los átomos colindantes. El enlace entre átomos formado de esta manera se conoce como *enlace covalente* para enfatizar la compartición de electrones de valencia.

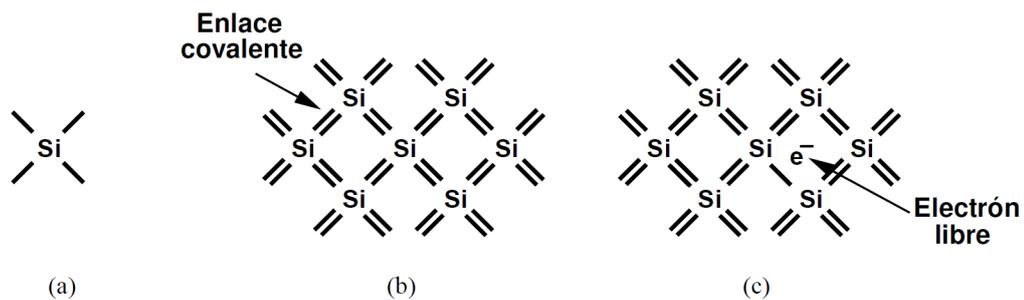


Figura 2.3 (a) Átomo de silicio, (b) enlaces covalentes entre átomos, (c) electrón libre, liberado mediante energía térmica.

El cristal uniforme representado en la Fig. 2.3(b) tiene un papel crucial en los dispositivos semiconductores, pero, ¿puede conducir intensidad como respuesta a

una diferencia de tensión? A temperaturas próximas al cero absoluto, los electrones de valencia quedan confinados a sus respectivos enlaces covalentes y no pueden moverse libremente. En otras palabras, el cristal de silicio se comporta como aislante para $T \rightarrow 0K$. Sin embargo, a temperaturas superiores, los electrones adquieren energía térmica, lo que ocasiona que algunos se separen de sus enlaces y actúen como portadores de carga libres [Fig. 2.3(c)] hasta que quedan atrapados en otro enlace incompleto. En lo sucesivo, el término *electrones* se referirá a electrones libres.

Huecos Al liberarse de un enlace covalente, el electrón deja un vacío tras de sí, ya que dicho enlace está ahora incompleto. Este vacío, al que se conoce como hueco, puede absorber un electrón si aparece uno disponible. Por ello, se dice que se genera un par electrón-hueco cuando se libera un electrón, y se produce una recombinación electrón-hueco cuando un electrón cae en un hueco.

¿Por qué se establece el concepto de hueco? Al fin y al cabo, es el electrón libre el que realmente se mueve dentro del cristal. Para comprender la utilidad de los huecos, considere la evolución temporal ilustrada en la Fig. 2.4. Supongamos que el enlace covalente número 1 contiene un hueco tras perder un electrón en algún instante anterior a $t = t_1$. En $t = t_2$, un electrón se separa del enlace número 2 y se recombina con el hueco en el enlace número 1. De forma similar, en $t = t_3$, un electrón deja el enlace número 3 y cae en el hueco del enlace número 2. A partir de las tres instantáneas, se puede decir que un electrón ha viajado de derecha a izquierda o, alternativamente, que un hueco se ha desplazado de izquierda a derecha. Esta visión de los flujos de corriente basados en huecos resulta de gran utilidad en el análisis de dispositivos semiconductores.

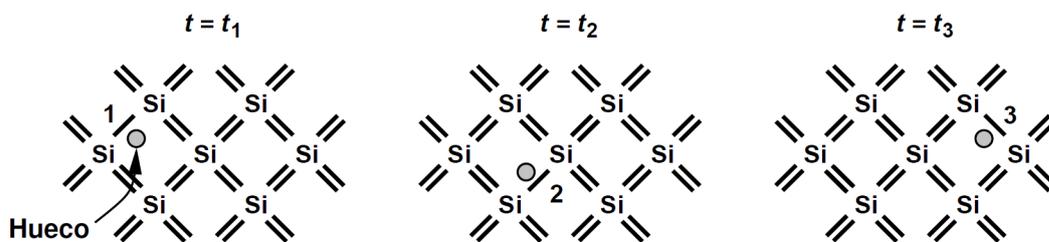


Figura 2.4 Movimiento de un electrón a través de un cristal.

Energía de salto de banda Ahora debemos dar respuesta a dos preguntas importantes. En primer lugar, ¿puede cualquier cantidad de energía térmica crear electrones libres (y huecos) en el silicio? No, de hecho se requiere una energía mínima para separar un electrón de un enlace covalente. Este mínimo, conocido como energía de salto de banda y denotado como E_g , es una propiedad fundamental

del material. Para el silicio, $E_g = 1,12 \text{ eV}$ ³.

La segunda pregunta tiene relación con la conductividad del material y se plantea de la siguiente manera: ¿cuántos electrones libres se crean a una temperatura dada? A partir de nuestras observaciones hasta el momento, podemos postular que el número de electrones depende tanto de E_g como de T : un E_g más elevado se traduce en menos electrones, pero una T mayor proporcionará más electrones. Para simplificar los resultados futuros, consideraremos que la *densidad* (o concentración) de electrones, es decir, el número de electrones por unidad de volumen, es n_i , que expresado para el silicio es:

$$n_i = 5,2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT} \text{ electrones/cm}^3 \quad (2.1)$$

donde $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ se conoce como la constante de Boltzmann. El desarrollo se puede consultar en libros que tratan la física de semiconductores, por ejemplo, en [1]. Como se espera, los materiales con un E_g mayor presentan un n_i menor. Además, cuando $T \rightarrow 0$, también lo hacen $T^{3/2}$ y $\exp[-E_g/(2kT)]$, por lo que n_i se acerca también a cero.

La dependencia exponencial de n_i con E_g muestra el efecto de la energía de salto de banda en la conductividad del material. Los aislantes muestran un E_g elevado; por ejemplo, $E_g = 2,5 \text{ eV}$ para el diamante. Por otro lado, los conductores presentan una energía de salto de banda pequeña. Finalmente, los *semiconductores* muestran una E_g moderada, con valores típicos entre 1 eV y 1,5 eV.

Ejemplo 2.1

Determine la densidad de electrones en el silicio para $T = 300 \text{ K}$ (temperatura ambiente) y para $T = 600 \text{ K}$.

Solución

Como $E_g = 1,12 \text{ eV} = 1,792 \times 10^{-19} \text{ J}$, se obtiene que

$$n_i(T = 300 \text{ K}) = 1,08 \times 10^{10} \text{ electrones/cm}^3 \quad (2.2)$$

$$n_i(T = 600 \text{ K}) = 1,54 \times 10^{15} \text{ electrones/cm}^3. \quad (2.3)$$

Ya que, por cada electrón libre, se crea un hueco, la densidad de huecos también viene determinada por (2.2) y (2.3).

³La unidad eV (electrón voltio) representa la energía necesaria para mover un electrón a través de una diferencia de potencial de 1 V. Tenga en cuenta que $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Ejercicio

Repita el ejercicio anterior para un material con una energía de salto de banda de 1,5 eV.

Los valores de n_i obtenidos en el ejemplo anterior pueden parecer muy elevados pero, teniendo en cuenta que el silicio tiene 5×10^{22} átomos/cm³, obtenemos que solo uno de cada 5×10^{12} átomos consigue un electrón libre a temperatura ambiente. En otras palabras, el silicio aún parece un conductor muy pobre. Por este motivo, a continuación presentamos un modo de hacer que el silicio resulte más útil.

2.1.2 Modificación de las densidades de portadores

Semiconductores intrínsecos y extrínsecos El silicio puro estudiado hasta ahora es un ejemplo de semiconductor intrínseco y presenta una resistencia muy alta. Convenientemente, es posible modificar la resistencia del silicio reemplazando algunos de los átomos del cristal con átomos de otro material. Para un semiconductor intrínseco, la densidad de electrones, $n(= n_i)$, es igual a la densidad de huecos, p . Así,

$$np = n_i^2. \quad (2.4)$$

Retomaremos esta ecuación más adelante.

Recuerde de la Fig. 2.2 que el fósforo (P) contiene cinco electrones de valencia. ¿Qué ocurre si se introducen algunos átomos P en un cristal de silicio? Como se ilustra en la Fig. 2.5, cada átomo P comparte cuatro electrones con los átomos de silicio colindantes, lo que deja al quinto electrón libre. Este electrón puede moverse libremente, por lo que sirve como portador de carga. Por tanto, si N átomos de fósforo se introducen de manera uniforme en cada centímetro cúbico de un cristal de silicio, la densidad de electrones libres crece en la misma cantidad.

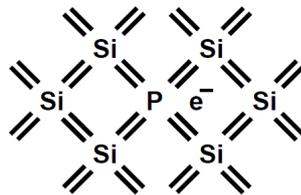


Figura 2.5 Electrón débilmente enlazado con dopaje de fósforo.

La adición controlada de una impureza, como el fósforo, a un semiconductor

intrínseco se conoce como *dopaje*, mientras que al fósforo se le denomina *dopante*. El cristal de silicio dopado, que ahora contiene muchos más electrones libres que en su estado intrínseco, ahora se denomina *extrínseco* o, más específicamente, semiconductor *tipo n*, para enfatizar la abundancia de electrones libres.

Como se ha indicado anteriormente, las densidades de electrones y huecos en un semiconductor intrínseco son iguales. Sin embargo, ¿qué ocurre con estas densidades en un material dopado? Se puede demostrar que, incluso en este caso,

$$np = n_i^2, \quad (2.5)$$

donde n y p denotan respectivamente las densidades de electrones y huecos en el semiconductor extrínseco. La cantidad n_i representa las densidades del semiconductor intrínseco (de ahí el subíndice i) y es, por tanto, independiente del nivel de dopaje [véase, por ejemplo, la Ec. (2.1) para el silicio].

Ejemplo 2.2

Los resultados anteriores pueden parecer extraños. ¿Cómo es posible que np permanezca constante, a pesar de añadir más átomos donantes e incrementar n ?

Solución

La Ecuación (2.5) revela que p debe caer a niveles inferiores al intrínseco cuando se añaden más dopantes tipo n al cristal. Esto ocurre porque muchos de los nuevos electrones donados por el dopante se recombinan con los huecos que se habían creado en el material intrínseco.

Ejercicio

¿Por qué no podemos decir que $n + p$ debe permanecer constante?

Ejemplo 2.3

Un fragmento de silicio cristalino se dopa de manera uniforme con átomos de fósforo. La densidad de dopaje es de 10^{16} átomos/cm³. Determine las densidades de electrones y huecos de este material a temperatura ambiente.

Solución

La adición de 10^{16} átomos P introduce el mismo número de electrones libres por centímetro cúbico. Como la densidad de electrones excede la calculada en el Ejemplo 2.1 en seis órdenes de magnitud, podemos asumir que

$$n = 10^{16} \text{ electrones/cm}^3 \quad (2.6)$$

Se deduce a partir de (2.2) y (2.5) que

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.7)$$

$$= 1,17 \times 10^4 \text{ huecos/cm}^3 \quad (2.8)$$

Tenga en cuenta que la densidad de huecos ha caído por debajo del nivel intrínseco en seis órdenes de magnitud. Por ello, si se aplica un voltaje a través de este fragmento de silicio, la corriente resultante estará formada mayoritariamente por electrones.

Ejercicio

¿Para qué nivel de dopaje cae la densidad de huecos en tres órdenes de magnitud?

Este ejemplo muestra el motivo por el que se llama a los electrones *portadores mayoritarios* y a los huecos *portadores minoritarios* en un semiconductor de tipo *n*. Nos podríamos preguntar si es posible fabricar un semiconductor tipo *p*, intercambiando el papel de los electrones y huecos.

Efectivamente, si se dopa el silicio con un átomo que proporcione un número de electrones insuficiente, se obtendrían muchos enlaces covalentes *incompletos*. Por ejemplo, la tabla de la Fig. 2.2 sugiere que un átomo de boro (B), con tres electrones de valencia, solamente puede formar tres enlaces covalentes completos en un cristal de silicio (Fig. 2.6). Como consecuencia, el cuarto enlace contiene un hueco, que puede absorber un electrón libre. Es decir, *N* átomos de boro contribuyen con *N* huecos a la conducción de corriente en el silicio. Por lo tanto, la estructura de la Fig. 2.6 ejemplifica un semiconductor de tipo *p*, que proporciona huecos como portadores mayoritarios. El boro se conoce como un dopante aceptor.

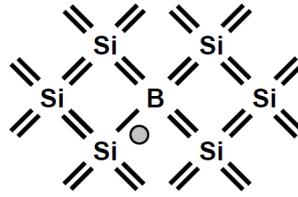


Figura 2.6 Hueco disponible con dopaje de boro.

A continuación se recapitulan los resultados obtenidos hasta el momento. Si un semiconductor intrínseco se dopa con una densidad de N_D ($\gg n_i$) átomos donantes por centímetro cúbico, las densidades de cargas móviles vienen dadas por

$$\text{Portadores mayoritarios: } n \approx N_D \quad (2.9)$$

$$\text{Portadores minoritarios: } p \approx \frac{n_i^2}{N_D}. \quad (2.10)$$

De forma similar, para una densidad de N_A ($\gg n_i$) átomos aceptores por centímetro cúbico:

$$\text{Portadores mayoritarios: } p \approx N_A \quad (2.11)$$

$$\text{Portadores minoritarios: } n \approx \frac{n_i^2}{N_A}. \quad (2.12)$$

Considerando que las densidades de dopaje típicas se encuentran entre 10^{15} y 10^{18} átomos/cm³, las expresiones anteriores tienen una precisión adecuada.

Ejemplo 2.4

¿Es posible utilizar otros elementos de la Fig. 2.2 como semiconductores y dopantes?

Solución

Sí, por ejemplo, algunos de los primeros diodos y transistores están basados en el germanio (Ge) y no en el silicio. Por otra parte, el arsénico (As) es otro dopante habitual.

Ejercicio

¿Se puede utilizar el carbono para este propósito?

La Figura 2.7 resume los conceptos presentados en esta sección, ilustrando los tipos de portadores de cargas y sus densidades en semiconductores.

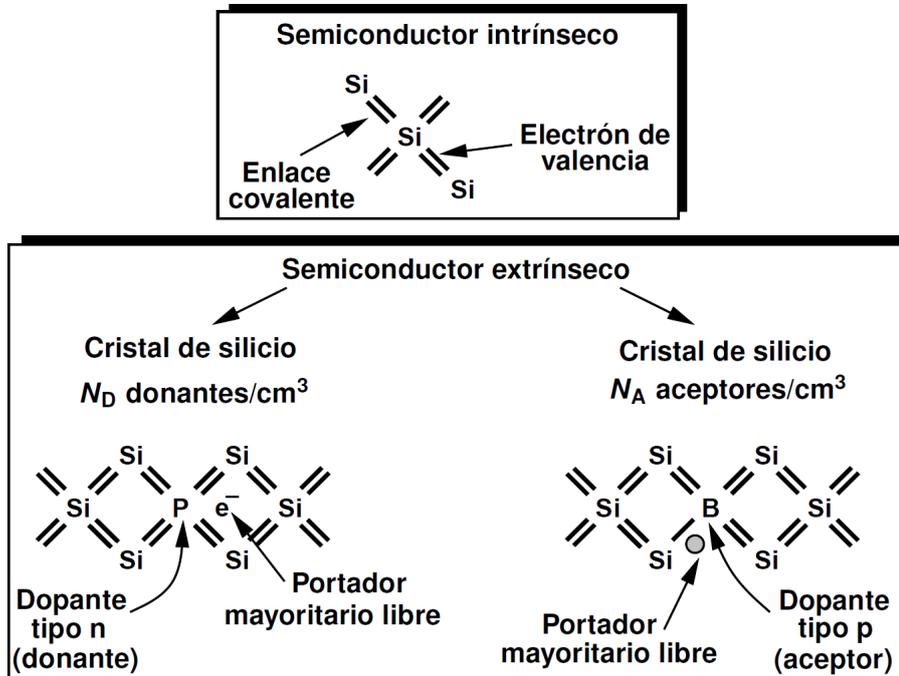


Figura 2.7 Resumen de los portadores de carga en el silicio.

2.1.3 Transporte de portadores

Tras haber estudiado los portadores de carga y el concepto de dopaje, podemos ahora examinar el movimiento de la carga en semiconductores, es decir, los mecanismos que permiten el flujo de corriente.

Deriva Conocemos, por las bases de la física y la ley de Ohm, que un material puede conducir corriente como respuesta a una diferencia de potencial y, por lo tanto, a un campo eléctrico⁴. El campo acelera los portadores de carga en el material, lo que fuerza a algunos a desplazarse de un extremo a otro. El movimiento de portadores de carga debido a un campo eléctrico se conoce como deriva⁵.

⁴Recuerde que la diferencia de potencial (voltaje), V , es igual a la integral negativa del campo eléctrico, E , con respecto a la distancia: $V_{ab} = - \int_a^b E dx$.

⁵La convención para la dirección de corriente asume el flujo de carga positiva de un voltaje positivo a uno negativo. Por lo tanto, si los electrones fluyen del punto A al punto B , se considera que la corriente tiene dirección de B a A .

Los semiconductores presentan un comportamiento similar. Como se muestra en la Fig. 2.8, el campo acelera los portadores de carga, que colisionan accidentalmente con átomos del cristal, y finalmente llegan al otro extremo y entran en la batería. La aceleración debida al campo y las colisiones con el cristal se cancelan mutuamente, lo que da como resultado una velocidad constante para los portadores⁶. Suponemos que la velocidad, v , será proporcional a la magnitud del campo eléctrico, E :

$$v \propto E, \quad (2.13)$$

y por tanto

$$v = \mu E, \quad (2.14)$$

donde μ se conoce como *movilidad*, y suele expresarse en $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Para el silicio, por ejemplo, la movilidad de los electrones es $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, y la de los huecos, $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Por supuesto, ya que los electrones se mueven en dirección opuesta al campo eléctrico, el vector de velocidad se expresa como

$$\vec{v}_e = -\mu_n \vec{E}. \quad (2.15)$$

Por otra parte, en el caso de los huecos,

$$\vec{v}_h = \mu_p \vec{E}. \quad (2.16)$$

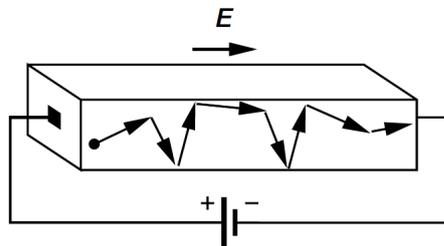


Figura 2.8 Deriva en un semiconductor.

Ejemplo 2.5

Un fragmento de silicio tipo n uniforme de $1 \mu\text{m}$ de longitud se somete a un voltaje de 1 V . Determine la velocidad de los electrones.

Solución

Dado que el material es uniforme, se obtiene que $E = V/L$, donde L es la longitud.

⁶Este fenómeno es análogo a la velocidad límite que un paracaidista experimenta en su caída.

Por lo tanto, $E = 10\,000\text{ V/cm}$, de lo que se extrae que $v = \mu_n E = 1,35 \times 10^7\text{ cm/s}$. En otras palabras, los electrones necesitan $(1\ \mu\text{m}) / (1,35 \times 10^7\text{ cm/s}) = 7,4\text{ ps}$ para cruzar la distancia de $1\ \mu\text{m}$.

Ejercicio

¿Qué ocurre si la movilidad se divide por dos?

Conocida la velocidad de los portadores, ¿cómo se calcula la corriente? En primer lugar, se observa que un electrón tiene una carga negativa de $q = 1,6 \times 10^{-19}\text{ C}$. De forma equivalente, un hueco tiene una carga positiva del mismo valor absoluto. Supongamos ahora que se aplica un voltaje V_1 sobre una barra de semiconductor uniforme que tiene una densidad de electrones libres n (Fig. 2.9). Suponiendo que los electrones se mueven con una velocidad de $v\text{ m/s}$, y considerando una sección transversal de la barra en $x = x_1$, si se toman dos instantáneas en $t = t_1$ y $t = t_1 + 1$ segundo, se observa que la carga total en v metros atraviesa la sección en 1 segundo. En otras palabras, la corriente es igual a la carga total encerrada en v metros de la longitud de la barra. Como la barra tiene una anchura W , se obtiene:

$$I = -v \cdot W \cdot h \cdot n \cdot q, \quad (2.17)$$

donde $v \cdot W \cdot h$ representa el volumen, $n \cdot q$ denota la densidad de carga en culombios, y el signo negativo representa la carga negativa de los electrones.

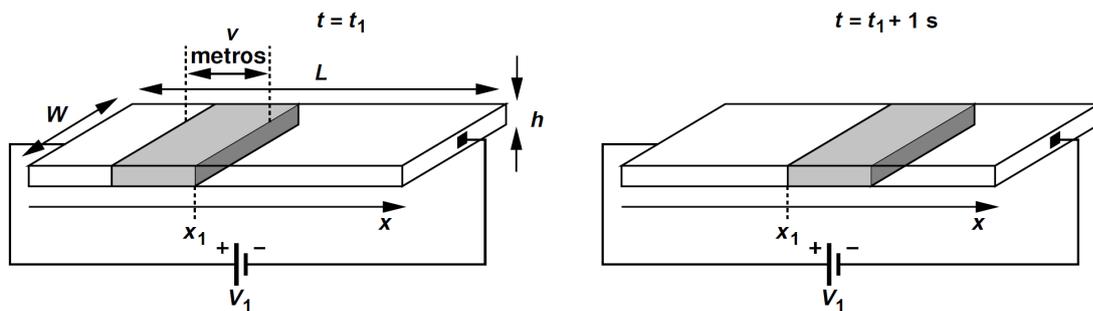


Figura 2.9 Flujo de corriente en términos de la densidad de carga.

A continuación se reduce la Ec. (2.17) a una expresión más conveniente. Ya que para los electrones, $v = -\mu_n E$, y $W \cdot h$ es la sección transversal de la barra, se obtiene

$$J_n = \mu_n E \cdot n \cdot q, \quad (2.18)$$

donde J_n representa la *densidad de corriente*, es decir, la corriente que pasa a través de una sección de área unidad, y se expresa en A/cm². Se puede decir, aproximadamente, que “la corriente es igual a la velocidad de las cargas multiplicada por la densidad de carga”, entendiendo que *corriente* se refiere a la densidad de corriente, y suponiendo que los signos positivos o negativos se tengan en cuenta adecuadamente.

En presencia de tanto electrones como huecos, la Ec. (2.18) se convierte en

$$J_{tot} = \mu_n E \cdot n \cdot q + \mu_p E \cdot p \cdot q \quad (2.19)$$

$$= q(\mu_n n + \mu_p p) E. \quad (2.20)$$

Esta ecuación da la densidad de corriente de deriva en función del campo eléctrico E en un semiconductor con densidades uniformes de electrones y huecos.

Ejemplo 2.6

En un experimento, se desea obtener corrientes de deriva iguales para electrones y huecos. ¿Cómo deben elegirse las densidades de portadora?

Solución

Se debe imponer la condición

$$\mu_n n = \mu_p p, \quad (2.21)$$

y por tanto

$$\frac{n}{p} = \frac{\mu_p}{\mu_n}. \quad (2.22)$$

También debemos recordar que $np = n_i^2$. Así,

$$p = \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_p}} n_i \quad (2.23)$$

$$n = \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}} n_i. \quad (2.24)$$

Para el silicio, por ejemplo, $\mu_n/\mu_p = 1350/480 = 2,81$, lo que significa que

$$p = 1,68 n_i \quad (2.25)$$

$$n = 0,596n_i. \quad (2.26)$$

Como p y n son del mismo orden de magnitud que n_i , solo se pueden obtener corrientes de deriva iguales para electrones y huecos en un material con un dopaje muy reducido. Esto confirma la idea inicial de que los portadores mayoritarios de los semiconductores tienen niveles de dopaje típicos de 10^{15} - 10^{18} átomos/cm³.

Ejercicio

¿Cómo deberían elegirse las densidades de portadores para que la corriente de deriva de electrones sea el doble que la de huecos?

[...]

Difusión Además de la deriva, existe otro mecanismo que puede producir un flujo de corriente. Imagine una gota de tinta que cae en un vaso de agua. Inicialmente la gota introduce una alta concentración local de moléculas de tinta y comienza a difundirse, es decir, las moléculas de tinta tienden a fluir de una región de alta concentración a regiones de baja concentración. Este mecanismo se conoce como difusión.

Ocurre un fenómeno similar cuando se depositan (se inyectan) portadores de carga en un semiconductor, para crear una densidad no uniforme. Incluso en ausencia de un campo eléctrico, los portadores se mueven a regiones de baja concentración, creando así una corriente eléctrica que existirá mientras se mantenga la no uniformidad. La difusión es, por tanto, claramente diferente a la deriva.

La Figura 2.11 ilustra el concepto del proceso de difusión. Una fuente a la izquierda inyecta de forma constante portadores de carga al semiconductor, un perfil de carga no uniforme se forma a lo largo del eje x , y las cargas descienden a lo largo del perfil.

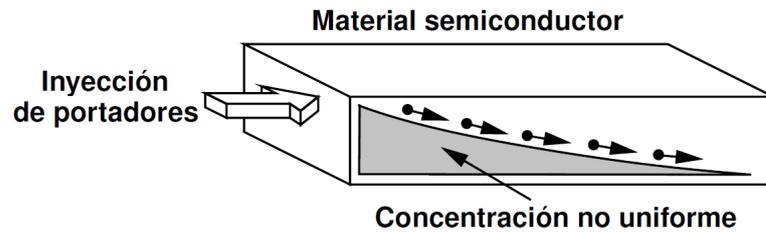


Figura 2.11 Difusión en un semiconductor.

El lector puede preguntarse algunas cuestiones en este punto. ¿Cuál es la fuente de los portadores en la Fig. 2.11? ¿Dónde van a parar los portadores de carga después de descender hasta la parte derecha del perfil? Y, lo más importante, ¿cuál es la importancia de esto? Estas preguntas se responderán en la siguiente sección.

Ejemplo 2.8

Una fuente inyecta portadores de carga en una barra de semiconductor, tal como se muestra en la Fig. 2.12. Explique cómo fluye la corriente.

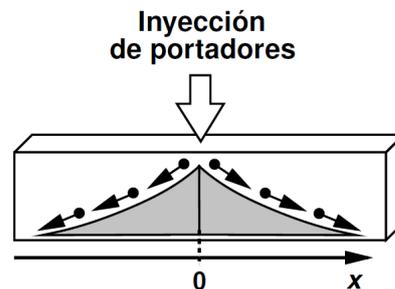


Figura 2.12 Inyección de portadores en un semiconductor.

Solución

En este caso, se desarrollarán dos perfiles simétricos en sentido positivo y negativo del eje x , lo que produce un flujo de corriente desde la fuente hasta los dos extremos de la barra.

Ejercicio

¿Se satisface KCL también en el punto de inyección?

Nuestro estudio cualitativo de la difusión sugiere que, cuanto menos uniforme sea la concentración, mayor será la corriente. Se puede expresar, de forma más específica, como:

$$I \propto \frac{dn}{dx}, \quad (2.39)$$

donde n representa la concentración de portadores en un punto dado del eje x . La expresión dn/dx se conoce como gradiente de concentración con respecto a x , asumiendo que el flujo de corriente existe solamente en dirección x . Si cada portadora tiene una carga q , y el semiconductor tiene una sección A , la Ec. (2.39) se puede expresar como

$$I \propto Aq \frac{dn}{dx}. \quad (2.40)$$

Por lo tanto,

$$I = AqD_n \frac{dn}{dx}, \quad (2.41)$$

donde D_n es un factor de proporcionalidad conocido como *constante de difusión*, expresado en cm^2/s . Por ejemplo, para el silicio intrínseco, $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$ (para los electrones), y $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$ (para los huecos).

Del mismo modo que ocurre con la deriva, se normaliza la corriente de difusión al área de la sección, obteniendo así la expresión de la densidad de corriente

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}. \quad (2.42)$$

De forma equivalente, un gradiente en la concentración de huecos se expresa como

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}. \quad (2.43)$$

En presencia de gradientes tanto de electrones como de huecos, la densidad total de corriente se expresa como

$$J_{tot} = q \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right). \quad (2.44)$$

Ejemplo 2.9

Considere de nuevo el escenario representado en la Fig. 2.11. Asuma que la concentración de electrones es igual a N en $x = 0$ y cae linealmente hasta cero en $x = L$ (Fig. 2.13). Determine la corriente de difusión.

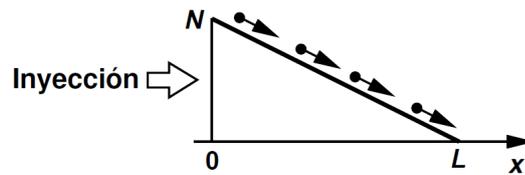


Figura 2.13 Corriente resultante de un perfil de difusión lineal.

Solución

Se obtiene:

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2.45)$$

$$= -qD_n \cdot \frac{N}{L}. \quad (2.46)$$

La corriente es constante a lo largo del eje x , es decir, todos los electrones que entran en el material en $x = 0$ alcanzan el punto $x = L$. Aunque parece obvia, esta observación sirve de preámbulo para el siguiente ejemplo.

Ejercicio

Repita el ejemplo anterior para el caso de los huecos.

Ejemplo 2.10

Repita el ejemplo anterior, pero en esta ocasión suponga que el gradiente es exponencial (Fig. 2.14):

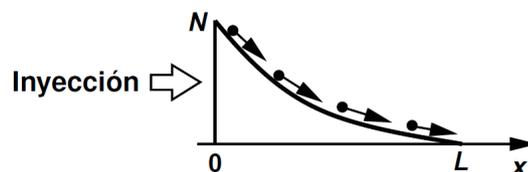


Figura 2.14 Corriente resultante de un perfil de difusión exponencial.

$$n(x) = N \exp \frac{-x}{L_d}, \quad (2.47)$$

donde L_d es una constante⁷.

Solución

Se obtiene que:

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2.48)$$

$$= \frac{-qD_n N}{L_d} \exp \frac{-x}{L_d}. \quad (2.49)$$

Resulta interesante observar que la corriente no es uniforme a lo largo del eje x . Es decir, algunos electrones desaparecen al viajar de $x = 0$ hacia la derecha. ¿Qué ocurre con estos electrones? ¿Incumple este ejemplo la ley de conservación de las cargas? Estas cuestiones son de gran importancia y se resolverán en la siguiente sección.

Ejercicio

¿Para qué valor de x cae la densidad de corriente al 1 % de su valor máximo?

Relación de Einstein Nuestro estudio de la deriva y la difusión ha introducido un factor para cada una: μ_n (o μ_p) y D_n (o D_p), respectivamente. Se puede demostrar que μ y D guardan la siguiente relación:

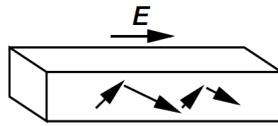
$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}. \quad (2.50)$$

Se puede encontrar la demostración de este resultado, conocido como relación de Einstein, en la literatura sobre física de semiconductores, por ejemplo, en [1]. Tenga en cuenta que $kT/q \approx 26$ mV a $T = 300$ K.

La Figura 2.15 resume los mecanismos de transporte de cargas estudiados en esta sección.

⁷El factor L_d es necesario para convertir el exponente a una magnitud adimensional.

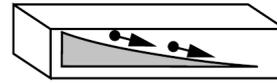
Corriente de deriva



$$J_n = q n \mu_n E$$

$$J_p = q p \mu_p E$$

Corriente de difusión



$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

Figura 2.15 Resumen de los mecanismos de deriva y difusión.