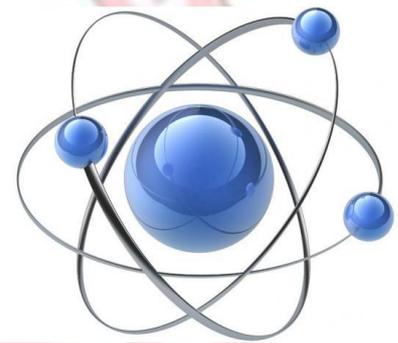


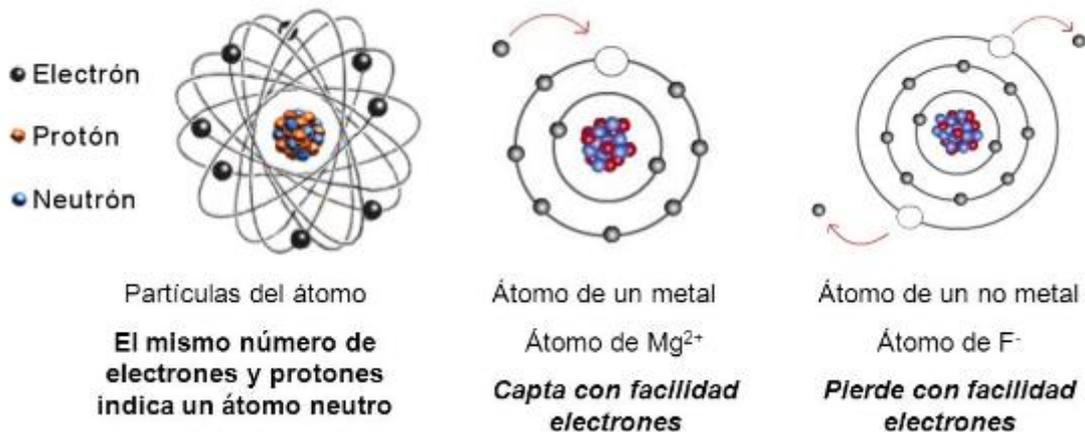
Energía Solar Fotovoltaica_ Principios fundamentales

1 EL ÁTOMO:

Un átomo es la unidad constituyente más pequeña de la materia que tiene las propiedades de un elemento. Cada sólido, líquido, gas y plasma se compone de átomos neutros o ionizados. Los átomos son muy pequeños; los tamaños típicos son alrededor de 100 pm (diez mil millonésima parte de un metro) No obstante, los átomos no tienen límites bien definidos y hay diferentes formas de definir su tamaño que dan valores diferentes pero cercanos. Los átomos son lo suficientemente pequeños para que la física clásica dé resultados notablemente incorrectos. A través del desarrollo de la física, los modelos atómicos han incorporado principios cuánticos para explicar y predecir mejor su comportamiento.

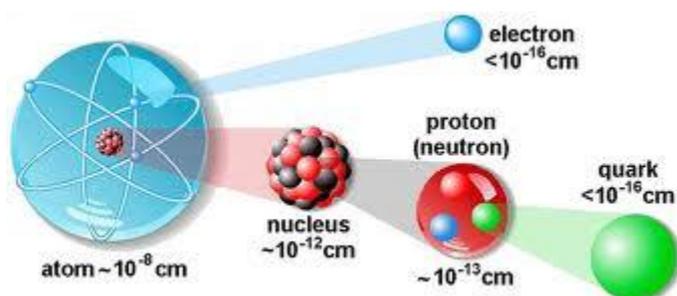


Cada átomo se compone de un núcleo y uno o más electrones unidos al núcleo. El núcleo está compuesto de uno o más protones y típicamente un número similar de neutrones (ninguno en el hidrógeno-1). Los protones y los neutrones son llamados nucleones. Más del 99,94 % de la masa del átomo está en el núcleo. Los protones tienen una carga eléctrica positiva, los electrones tienen una carga eléctrica negativa y los neutrones tienen ambas cargas eléctricas, haciéndolos neutros. Si el número de protones y electrones son iguales, ese átomo es eléctricamente neutro. Si un átomo tiene más o menos electrones que



protones, entonces tiene una carga global negativa o positiva, respectivamente, y se denomina ion.

Los electrones de un átomo son atraídos por los protones en un núcleo atómico por esta fuerza electromagnética. Los protones y los neutrones en el núcleo son atraídos el uno al otro por una fuerza diferente, la fuerza nuclear, que es generalmente más fuerte que la fuerza electromagnética que repele los protones cargados positivamente entre sí. Bajo ciertas circunstancias, la fuerza electromagnética repelente se vuelve más fuerte que la fuerza nuclear y los nucleones pueden ser expulsados del núcleo, dejando tras de sí un elemento diferente: desintegración nuclear que resulta en transmutación nuclear.



El número de protones en el núcleo define a qué elemento químico pertenece el átomo: por ejemplo, todos los átomos de cobre contienen 29 protones. El número de neutrones define el isótopo del elemento. El número de electrones influye en las propiedades magnéticas de un átomo. Los átomos pueden unirse a otros u otros átomos por enlaces químicos para formar compuestos químicos tales como moléculas. La capacidad de los átomos de asociarse y disociarse es responsable de la mayor parte de los cambios físicos observados en la naturaleza y es el tema de la disciplina de la química.

En esencia la constitución del átomo, refiriéndonos a su aspecto eléctrico, consta de un determinado número de protones con carga positiva en el núcleo y una cantidad igual de electrones, con carga negativa, girando en diferentes órbitas del espacio, denominada envoluta.

El número máximo de electrones que se pueden alojar en cada órbita es de $2n^2$, siendo "n" el número de órbitas.

Los electrones giran en órbitas casi elípticas, en cada una de las cuales y según su proximidad al núcleo, solo pueden existir un número máximo de electrones.

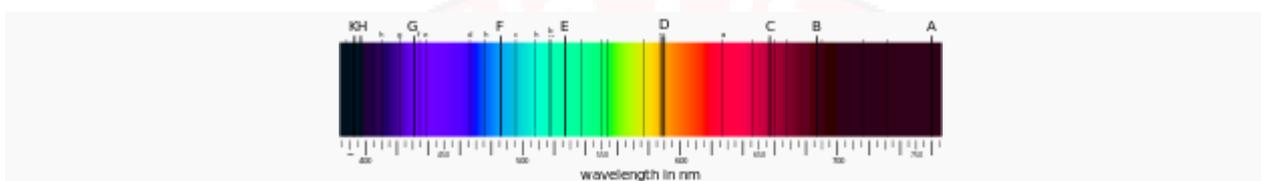
Atendiendo a la carga eléctrica como inicialmente mencionábamos, los átomos, se pueden clasificar en positivos, negativos y neutros.

Los átomos de elementos simples, cuando están completas sus órbitas son neutros, hay igual cantidad de electrones que de protones; pero dado que los electrones de la última órbita son los más alejados del núcleo y por tanto, perciben menos su fuerza de atracción, pueden salirse de dicha órbita denominada de valencia, dejando al átomo cargado positivamente por contener más protones que electrones, si por el contrario en el último orbital del átomo hubiese alojado un electrón libre exterior al átomo habría adquirido carga negativa, a estas dos situaciones se les denomina iones.

1.1 Niveles de energía

Un electrón ligado en el átomo posee una energía potencial inversamente proporcional a su distancia al núcleo y de signo negativo, lo que quiere decir que esta aumenta con la distancia. La magnitud de esta energía es la cantidad necesaria para desligarlo, y la unidad usada habitualmente para expresarla es el electronvoltio (eV). En el modelo mecanocuántico solo hay un conjunto discreto de estados o niveles en los que un electrón ligado puede encontrarse —es decir, enumerables—, cada uno con un cierto valor de la energía. El nivel con el valor más bajo se denomina el estado fundamental, mientras que el resto se denominan estados excitados.

Cuando un electrón efectúa una transición entre dos estados distintos, absorbe o emite un fotón, cuya energía es precisamente la diferencia entre los dos niveles. La energía de un fotón es proporcional a su frecuencia, así que cada transición se corresponde con una banda estrecha del espectro electromagnético denominada línea espectral.



Un ejemplo de líneas de absorción en un espectro

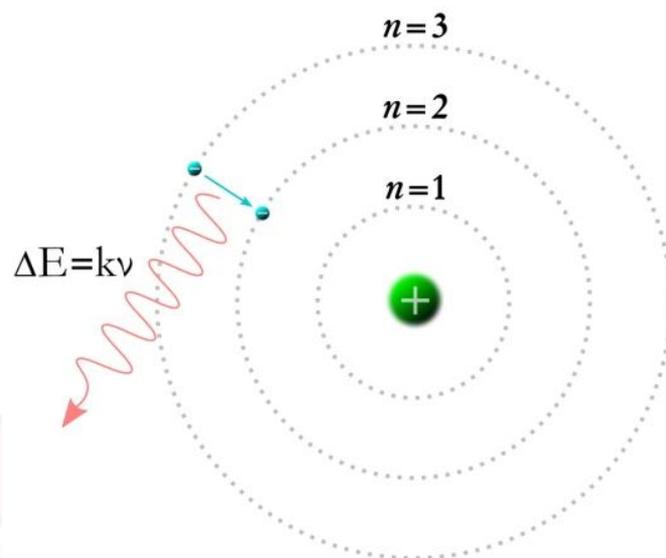
Cada elemento químico posee un espectro de líneas característico. Estas se detectan como líneas de emisión en la radiación de los átomos del mismo. Por el contrario, si se hace pasar radiación con un espectro de frecuencias continuo a través de estos, los fotones con la energía adecuada son absorbidos. Cuando los electrones excitados decaen más tarde, emiten en direcciones aleatorias, por lo que las frecuencias características se observan como líneas de absorción oscuras. Las medidas espectroscópicas de la intensidad y anchura de estas líneas permite determinar la composición de una sustancia.

Algunas líneas espectrales se presentan muy juntas entre sí, tanto que llegaron a confundirse con una sola históricamente, hasta que fue descubierta su subestructura o estructura fina. La causa de este fenómeno se encuentra en las diversas correcciones a considerar en la interacción entre los electrones y el núcleo. Teniendo en cuenta tan solo la fuerza electrostática, ocurre que algunas de las configuraciones electrónicas pueden tener la misma energía aun siendo distintas. El resto de pequeños efectos y fuerzas en el sistema electrón-núcleo rompe esta redundancia o degeneración, dando lugar a la estructura final. Estos incluyen las correcciones relativistas al movimiento de electrón, la interacción de su momento magnético con el campo eléctrico y con el núcleo, etc.

Además, en presencia de un campo externo los niveles de energía se ven modificados por la interacción del electrón con este, en general produciendo o aumentando la división entre los niveles de energía. Este fenómeno se conoce como efecto Stark en el caso de un campo eléctrico, y efecto Zeeman en el caso de un campo magnético.

Las transiciones de un electrón a un nivel superior ocurren en presencia de radiación electromagnética externa, que provoca la absorción del fotón necesario. Si la frecuencia de dicha radiación es muy alta, el fotón es muy energético y el electrón puede liberarse, en el llamado efecto fotoeléctrico.

Las transiciones a un nivel inferior pueden ocurrir de manera espontánea, emitiendo la energía mediante un fotón saliente; o de manera estimulada, de nuevo en presencia de radiación. En este caso, un fotón «entrante» apropiado provoca que el electrón decaiga a un nivel con una diferencia de energía igual a la del fotón entrante. De este modo, se emite un fotón saliente cuya onda asociada está sincronizada con la del primero, y en la misma dirección. Este fenómeno es la base del láser.



1.2 Átomos estables e inestables:

Se llama átomo estable al que tiene completa de electrones su última órbita o al menos dispone en ella de ocho electrones. Los átomos inestables, que son los que no tienen llena su órbita de valencia ni tampoco ocho electrones en ella, tienen una gran propensión a convertirse en estables, bien desprendiéndose de los electrones de valencia o bien absorbiendo del exterior electrones libres hasta completar la última órbita; en cada caso realizaran lo que menos energía suponga.

1.3 Cuerpos conductores y aislantes:

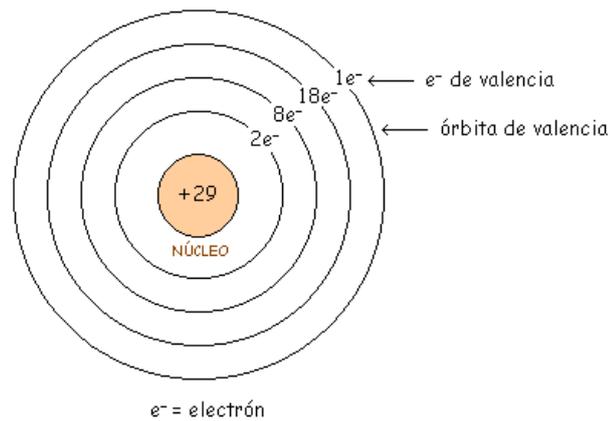
Los cuerpos conductores son aquellos cuyos átomos permiten fácilmente el paso de electrones a su través. Un buen ejemplo de conductor es el Cobre (Cu) que dispone de un electrón inestable en su cuarta órbita con una gran tendencia a desprenderse.

1.3.1 Material Conductor

Un conductor es un material que, en mayor o menor medida, conduce el calor y la electricidad. Son buenos conductores los metales y malos, el vidrio, la madera, la lana y el aire.

NOTA: Definimos la unidad de carga +1 como $+1,6 \cdot 10^{-19}$ culombios. Así un electrón tiene una carga -1 equivalente a $-1,6 \cdot 10^{-19}$ culombios.

El conductor más utilizado y el que ahora analizaremos es el Cobre (valencia 1), que es un buen conductor. Su estructura atómica la vemos en la siguiente figura.

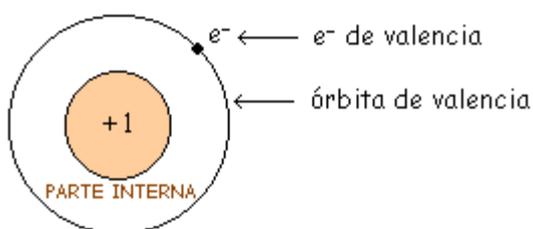


Su número atómico es 29. Esto significa que en el núcleo hay 29 protones (cargas positivas) y girando alrededor de él hay 29 electrones girando en diferentes órbitas.

En cada órbita caben $2n^2$ siendo n un número entero $n = 1, 2, 3, \dots$. Así en la primera órbita ($n = 1$) caben $2 \cdot 1^2 = 2$ electrones. En la segunda órbita $2 \cdot 2^2 = 8$ electrones. En la tercera órbita $2 \cdot 3^2 = 18$ electrones. Y la cuarta órbita solo tiene 1 electrón aunque en ella caben $2 \cdot 4^2 = 32$ electrones.

Lo que interesa en electrónica es la órbita exterior, que es la que determina las propiedades del átomo. Como hay + 29 y - 28, queda con + 1.

Por ello vamos a agrupar el núcleo y las órbitas internas, y le llamaremos parte interna. En el átomo de cobre la parte interna es el núcleo (+ 29) y las tres primeras órbitas (- 28), con lo que nos queda la parte interna con una carga neta de +1.



Como el electrón de valencia es atraído muy débilmente por la parte interna, una fuerza externa puede liberarlo fácilmente, por eso es un buen Conductor. Nos referiremos a ese electrón de valencia, como electrón libre.

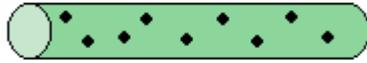
Lo que define a un buen conductor es el hecho de tener un solo electrón en la órbita de valencia (valencia 1).

Así, tenemos que:

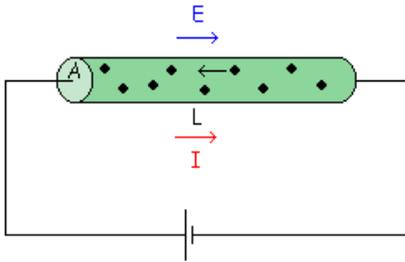
- A 0 °K (-273 °C) un metal no conduce.
- A Temperatura ambiente 300 °K ya hay electrones libres debidos a la energía térmica.

- Si tenemos un campo eléctrico aplicado los electrones libres se mueven en todas direcciones. Como el movimiento es al azar, es posible que muchos electrones pasen por

unidad de área en una determinada dirección y a la vez en la dirección opuesta. Por lo tanto la corriente media es cero.



- Veamos ahora como cambia la situación, si se aplica al metal un campo eléctrico.



Los electrones libres se mueven ahora en una dirección concreta. Y por lo tanto ya hay carga (en culombios) que cruza la sección del metal en un segundo, o sea ya existe una corriente.

Como ya conocemos, el electrón tiene una carga negativa ($-1,6E-19$ culombios) y por tanto el convenio tomado para definir la corriente (contrario al movimiento de las cargas negativas) nos indica que la corriente toma el sentido indicado en la figura.

El electrón se mueve dentro de la red cristalina del metal con una velocidad media.

$$v = \mu \cdot E$$

v = velocidad media del electrón
 μ = movilidad del electrón libre en el metal
 (mayor o menor facilidad para moverse dentro de la red cristalina)
 E = intensidad del campo eléctrico

La resistencia que opone la barra de metal al paso de la corriente la podemos calcular de la siguiente forma:

$$\sigma = n \cdot \mu \cdot e$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

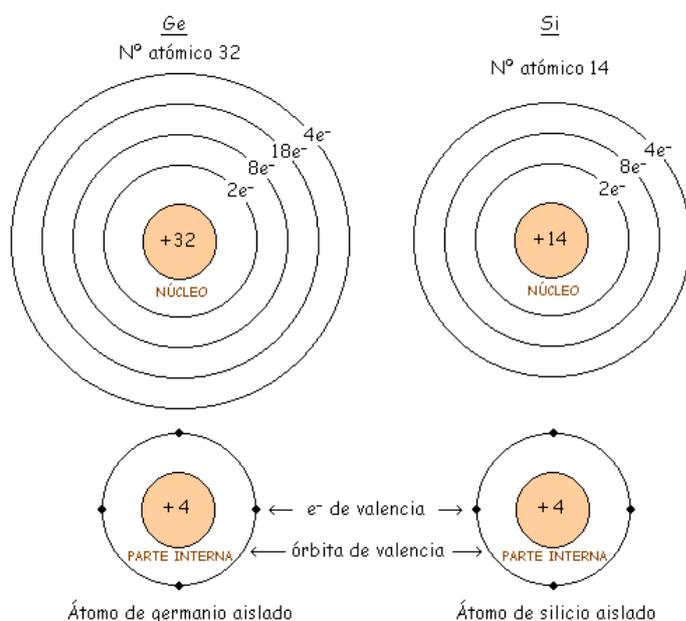
n = nº de electrones libres por m^3
 e = carga del electrón ($-1,6 \times 10^{-19}$ Cul)
 σ = conductividad del metal
 ρ = resistividad del metal
 R = resistencia del metal
 L = longitud de la barra
 A = sección de la barra

2 SEMICONDUCTORES

Son elementos, como el germanio y el silicio, que a bajas temperaturas son aislantes. Pero a medida que se eleva la temperatura o bien por la adición de determinadas impurezas resulta posible su conducción. Su importancia en electrónica es inmensa en la fabricación de transistores, circuitos integrados, etc...

Los semiconductores tienen valencia 4, esto es 4 electrones en órbita exterior ó de valencia. Los conductores tienen 1 electrón de valencia, los semiconductores 4 y los aislantes 8 electrones de valencia.

Los 2 semiconductores que veremos serán el Silicio y el Germanio:



Como vemos los semiconductores se caracterizan por tener una parte interna con carga + 4 y 4 electrones de valencia.

2.1 Semiconductores intrínsecos

Es un semiconductor puro. A temperatura ambiente se comporta como un aislante porque solo tiene unos pocos electrones libres y huecos debidos a la energía térmica.

En un semiconductor intrínseco hay flujos de electrones y huecos, aunque la corriente total resultante sea cero. Esto se debe a que por acción de la energía térmica se producen los electrones libres y los huecos por pares, por lo tanto hay tantos electrones libres como huecos con lo que la corriente total es cero.

Mientras que los cuerpos buenos conductores ofrecen escasa resistencia al paso de electrones, los aislantes la ofrecen elevadísima, y entre ambos extremos, se encuentran los semiconductores que presentan una resistencia intermedia.

Un ejemplo de elemento semiconductor es el Silicio (Si), la característica fundamental de los cuerpos semiconductores es la de poseer cuatro electrones en su órbita de valencia. Con esta estructura el átomo es inestable, pero para hacerse estable se le presenta un dilema: y es que le cuesta lo mismo desprenderse de cuatro electrones y quedarse sin una órbita, que absorber otros cuatro electrones para hacerse estable al pasar a tener ocho

electrones. En estas especiales circunstancias, ciertos elementos como el Silicio y el Germanio (Ge) agrupan sus átomos de manera muy particular, formando una estructura reticular en la que cada átomo queda rodeado por otros cuatro iguales, propiciando la formación de los llamados **enlaces covalentes**. En estas circunstancias, la estructura de los cuerpos semiconductores, al estabilizarse, debería trabajar como buen aislante, pero no es así a causa de la temperatura. Canto mayor es la temperatura aumenta la agitación de los electrones y por consiguiente enlaces covalentes rotos, dando lugar a electrones libres y huecos (falta de electrón).

2.2 Semiconductores extrínsecos:

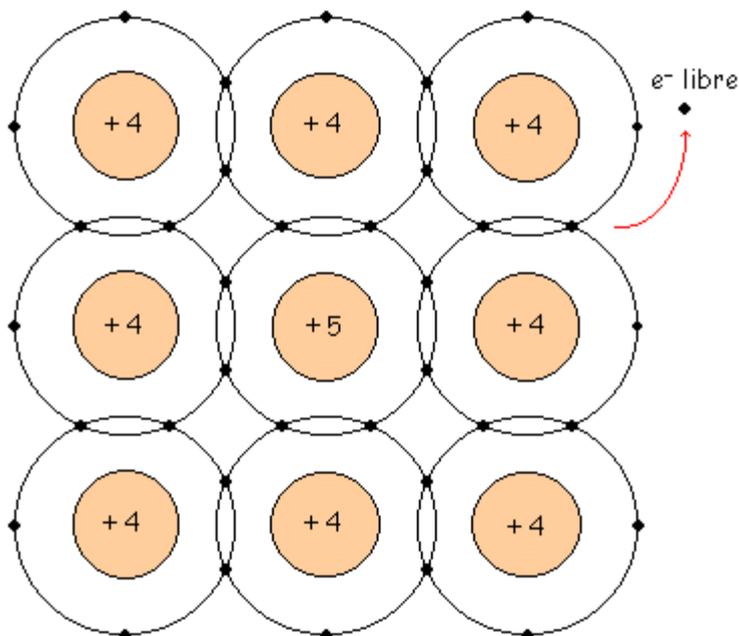
Comoquiera que las corrientes que se producen en el seno de un semiconductor intrínseco a la temperatura ambiente son insignificantes, dado el bajo valor de portadores libres, para aumentarlos se les añaden otros cuerpos, que se denominan impurezas. De esta forma es como se obtienen los semiconductores extrínsecos tan importantes en la energía solar fotovoltaica

2.3 Dopado de un semiconductor

Para aumentar la conductividad (que sea más conductor) de un SC (Semiconductor), se le suele dopar o añadir átomos de impurezas a un SC intrínseco, un SC dopado es un SC extrínseco.

Caso 1

Impurezas de valencia 5 (Arsénico, Antimonio, Fósforo). Tenemos un cristal de Silicio dopado con átomos de valencia 5.



Los átomos de valencia 5 tienen un electrón de más, así con una temperatura no muy elevada (a temperatura ambiente por ejemplo), el 5º electrón se hace electrón libre. Esto es, como solo se pueden tener 8 electrones en la órbita de valencia, el átomo pentavalente suelta un electrón que será libre.

Siguen dándose las reacciones anteriores. Si metemos 1000 átomos de impurezas tendremos 1000 electrones más los que se hagan libres por generación térmica (muy pocos).

A estas impurezas se les llama "Impurezas Donadoras". El número de electrones libres se llama n (electrones libres/ m^3).

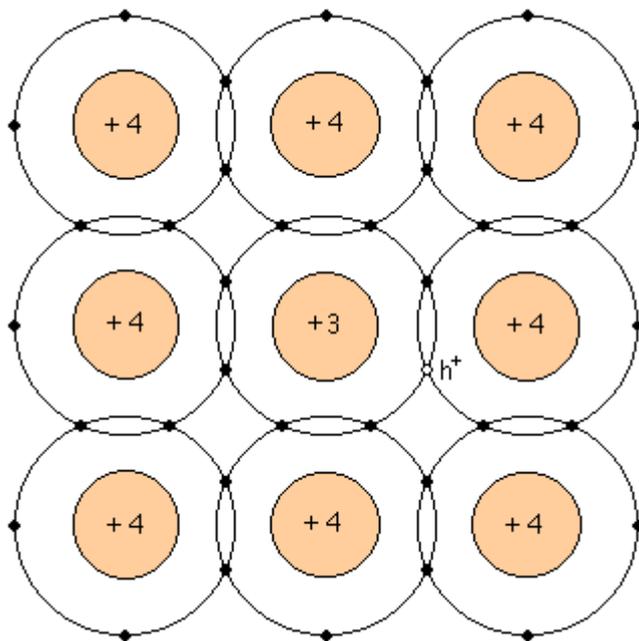
$$N_D = \frac{\text{átomos de impurezas Donadoras}}{m^3}$$

$$n = N_D + \text{electrones de generación térmica}$$

$$n \approx N_D$$

Caso 2

Impurezas de valencia 3 (Aluminio, Boro, Galio). Tenemos un cristal de Silicio dopado con átomos de valencia 3.



Los átomos de valencia 3 tienen un electrón de menos, entonces como nos falta un electrón tenemos un hueco. Esto es, ese átomo trivalente tiene 7 electrones en la órbita de valencia. Al átomo de valencia 3 se le llama "átomo trivalente" o "Aceptor".

A estas impurezas se les llama "Impurezas Aceptoras". Hay tantos huecos como impurezas de valencia 3 y sigue habiendo huecos de generación térmica (muy pocos). El número de huecos se llama p (huecos/ m^3).

$$N_A = \frac{\text{átomos de impurezas Aceptoras}}{m^3}$$

$$p = N_A + \text{huecos de generación térmica}$$

$$p \approx N_A$$

2.4 Semiconductores extrínsecos tipo N:

En la figura se presenta la estructura cristalina del Silicio (Si) dopado con Antimonio (Sb) al introducirse un átomo de impurezas de este elemento, hecho por el que recibe el nombre de semiconductor extrínseco.

Como se aprecia el átomo de Sb no solo cumple con los cuatro enlaces covalentes, sino que aún le sobra un electrón, que tiende a salirse de su órbita para que quede estable el átomo de Sb. Por cada átomo de impurezas añadido aparece un electrón libre en la estructura. Aunque se añadan impurezas en relación de uno a un millón, en la estructura del silicio además de los 10^{10} electrones y 10^{10} huecos libres que existen por cm^3 , a la temperatura ambiente, hay ahora que sumar una cantidad de electrones libres equivalente a la de átomos de impurezas. En estas condiciones el Si con impurezas de Sb alcanza 10^{16} electrones libres y 10^{10} huecos libres por cm^3 , siendo en consecuencia el número de portadores eléctricos negativos mucho mayor que el de los positivos, por lo que los primeros reciben la denominación de portadores mayoritarios y los segundos la de portadores minoritarios y, por el mismo motivo, se le asigna a este tipo de semiconductores extrínsecos la clasificación de **SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO TIPO N**.



2.5 Semiconductores extrínsecos tipo p



En la figura se presenta la estructura cristalina del Silicio (Si) dopado con Aluminio (Al). Por cada átomo de impurezas trivalente que se añade al semiconductor intrínseco aparece en la estructura un hueco, o lo que es lo mismo, la falta de un electrón.

Añadiendo un átomo de impurezas trivalente por cada millón de átomos de semiconductor existen: 10^{16} huecos libres y 10^{10} electrones libres por cm^3 , a la temperatura ambiente. Como en este semiconductor hay mayor número de cargas positivas o huecos, se les denomina a estos, portadores mayoritarios; mientras que los electrones libres, únicamente propiciados por los