

Semiconductores y el acoplamiento Espín-Órbita del Electrón

<http://www.textoscientificos.com/fisica/articulos/semiconductores-acoplamiento-espin-orbita-electron>

Semiconductors and Electron Spectroscopy mesh.

Por Heber Gabriel Pico Jiménez MD

Resumen

Este trabajo gracias al acoplamiento espín-órbita del electrón, contundentemente demuestra que al igual que en los superconductores, los portadores de carga eléctrica de los semiconductores también son pares de electrones. Por ejemplo, si a un material como el cristal de silicio a quien se le haga un dopaje tipo N_{15} con fósforo, elemento este dopante que le aporta 5 electrones de valencia al dopaje, indiscutiblemente tributa al cristal de silicio un electrón adicional pero es precisamente solo delante del cristal de silicio intacto. Ahora si a un pedazo también de cristal de silicio por otra parte le hacemos un dopaje tipo P_{13} con átomos de aluminio, pues en este otro caso el aluminio con 3 electrones de valencia, indiscutiblemente en el dopaje le hace un aporte deficiente en un electrón al cristal de silicio, pero esa deficiencia es solamente con respecto también al mismo cristal de silicio virgen. Pero la cuestión cambia totalmente cuando ponemos por un lado al cristal de silicio dopado con fósforo, enfrente del material de cristal de silicio también dopado pero esta vez con el aluminio. Pues la situación entre ellos es distinta porque el dopado N_{15} de fósforo, tendrá entonces relativamente dos electrones más de diferencia con respecto al dopado P_{13} del aluminio. Este desnivel es quien nutre la fuerza que alimenta el flujo de un par de electrones libres desde N_{15} hacia P_{13} .

Palabras claves: Acoplamiento, Semiconductores, Espín-Órbita, Par de Cooper.

Abstract

This work thanks to the spectroscopy of electron coupling, conclusively shows that as in superconductors, semiconductors electrical charge carriers are also pairs of electrons. For example, if a material like Silicon Crystal to who have a doping type N_{15} with phosphorus, the dopant element that gives it 5 electrons from valencia to doping, unquestionably taxed to Silicon Crystal an extra electron, but it is precisely only in front of the intact Silicon crystal. Now if a piece of silica glass on the other hand we make a doping P_{13} type with aluminium atoms, as in this other case aluminum with 3 electrons of valencia, arguably in the doping he makes a poor contribution to an electron to Silicon Crystal, but this deficiency is only with regard also to the same Virgin Silicon

crystal. But the question changes completely when we put aside the Crystal of Silicon doped with phosphorus, opposite also doped Silicon crystal material but with aluminum. As the situation between them is different because the doped phosphorus N_{15} , will then have relatively two electrons more than difference with respect to the doped aluminum P_{13} . This unevenness is who draws strength feeding a couple of free electrons flow from N_{15} to P_{13} .

Keywords: Coupling, semiconductors, spectroscopy, Cooper pair.

1. Introducción

Iniciamos la introducción de este artículo precisando que todo su desarrollo estará siempre sostenido en los principios del anterior trabajo de la energía atómica Número cuántico magnético del electrón y el trabajo superconductividad y el acoplamiento espín-órbita del electrón.

Además es preciso decir que este trabajo anterior del número cuántico está basado en que a pesar de que el movimiento del electrón representa globalmente una trayectoria circular o elíptica alrededor del núcleo atómico, el momento angular intrínseco o espín del mismo electrón, describe siempre en su desplazamiento un ángulo cuántico construido en torno al respectivo núcleo atómico, ángulo cuántico que por resonancia magnética representa a una propiedad intrínseca de la relación que existe entre el espín del electrón y el orbital del mismo, ángulo θ que si se configura agudo con respecto al núcleo para los electrones con determinado espín de un orbital, pues sería suplementario y obtuso de $180-\theta$ para los electrones de la misma energía pero con espines contrarios y en el mismo orbital.

A pesar de que globalmente el electrón describe trayectorias circulares o elípticas según sea el subnivel alrededor del núcleo atómico, su momento angular cumple esa trayectoria pero configurando con respecto al núcleo atómico, distintos ángulos cuánticos de espín.

El orden en el valor de los ángulos cuánticos de espín en la tabla periódica, es que se incrementan de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha.

Es tan evidente el hecho de que el ángulo cuántico es una propiedad intrínseca que describe la relación espín-orbita que a medida que el ángulo cuántico se incrementa al ascender el electrón de niveles, los espines contrarios de los electrones están más ligados y están más cercas y más apareados, constituyendo así un par de Cooper más compacto, más unido, más ligado.

El ángulo cuántico de espín es una medida que influye tanto en la cantidad de energía del electrón y el grado de acoplamiento o apareamiento que une a un par de electrones en un orbital cualquiera.

Este trabajo anterior propone una ecuación con quien se calcula la más alta energía de un electrón que permanece ubicado en un orbital electrónico existente, en cualquier nivel atómico, valor que dependería de la relación creada entre los cuatro números

cuánticos y el ángulo cuántico descrito por los espines en el momento angular del electrón. Es interesante la circunstancia de que el número de electrones de los niveles de energías incluso el último nivel, es exactamente el mismo número de estados disponibles en la banda electrónica y después incluso, después del último nivel de energía se presenta siempre una banda prohibida o **bandgap**, ubicada también por encima de la banda de valencia donde no hay estados electrónicos disponibles por lo tanto, al aplicar un campo eléctrico externo los electrones no podrían incrementar su energía y permanecer en el átomo moviéndose más rápido de lo que ya vienen haciéndolo, porque no hay estados electrónicos disponibles donde poder subsistir en movimiento dentro del respectivo átomo. Las anchuras y potencias de esas distintas bandas prohibidas pueden ser de diferentes tamaños y depende de varios factores entre ellos está de si el nivel está lleno o no, depende también de si los electrones se encuentran en el orbital por pares libres o no, depende también del grado de apareamiento entre electrones ya apareados que lo mide el ángulo cuántico de espín y otro es el tipo de subnivel de energía porque no todos ellos configuran un **bandgap** suficientemente y fuerte. El subnivel **s** es subnivel que alcanza a configurar el **bandgap** más contundente y más fuerte que el configurado por el subnivel **p** y el perteneciente a este último, es de mayor envergadura que el del subnivel **d** y así sucesivamente. Esta es la razón del gran tamaño que tienen las bandas prohibidas existentes después del último nivel de energía en los gases nobles y además el **bandgap** existente entre los niveles llenos de energía casualmente porque los pares del último nivel están completos. En el **Helio** a pesar de tener tan poca masa, tiene una gran carga nuclear efectiva, basta con un solo par de electrones **s** apareados, precisamente también cuenta con un gran ángulo cuántico de espín que es el más grande del período que los compacta, para saturar el único nivel de energía con un **bandgap** suficiente. Desde el Neón hasta el átomo sintético de **Ununoctio**, necesitan configurar **bandgap** que es distinto. Habrá siempre **bandgap** entre el primer y segundo nivel de energía que sería el más potente, existirá también entre el segundo y tercer nivel de energía de menor potencia que el anterior, habrá **bandgap** entre el 3º y 4º nivel más débil aun que el anterior, así sucesivamente irán por niveles configurándose **bandgap** de menor intensidad. El **bandgap** del **helio** será el de mayor potencia de todos los **bandgap** aunque el ángulo cuántico de espín allí sea regular, le seguirá en potencia el del **neón**, a este le seguiría el del **argón** y así sucesivamente aparecerán las configuraciones de **bandgap** menos intensas hasta llegar al **bandgap** de la valencia.

En este artículo aclaramos que el concepto de banda prohibida o **bandgap**, es de los conductores y superconductores eléctricos que es distinta a la banda prohibida de los semiconductores y aislantes, más no esperamos que esta intuición se confunda con el concepto de energía de enlace Δ entre los dos electrones o banda prohibida superconductora.

$$pc = E_c = \frac{m_e c^2 Z \alpha}{\sqrt{y_n^2 - Z^2 \alpha^2}} \quad (1)$$

Donde **p** es la cantidad de movimiento del electrón, **Ec** es la energía cinética del electrón, **me** es la masa del electrón, **Z** es el número atómico, **a** es la constante de

estructura fina, y_n es la relación entre n y el ángulo θ descrito por la cantidad de movimiento y el radio de la órbita del electrón y C es la velocidad de la luz en el vacío.

$$n = \frac{(n_1 - Z) + \sqrt{(n_1 + Z)^2 + 2l - 2} + 2\sqrt{(l+1)^2 + 4m}}{2} \quad (2)$$

Donde n es un número no entero, n_1 es el número cuántico principal, Z es el número atómico, l es el segundo número cuántico y m es el tercer número cuántico o número cuántico magnético.

$$y_n = \frac{n}{\tan^2 \theta} = \frac{(n_1 - Z) + \sqrt{(n_1 + Z)^2 + 2l - 2} + 2\sqrt{(l+1)^2 + 4m}}{2 \tan^2 \theta} \quad (3)$$

Donde y_n es la relación entre n y el ángulo θ descrito por la cantidad de movimiento y el radio de la órbita del electrón siendo n un número no entero, n_1 es el número cuántico principal, l es el segundo número cuántico y m es el tercer número cuántico o número cuántico magnético.

2. Desarrollo del Tema.

CATIÓN DIHIIDROGENO

Nos referiremos a este ión como un ejemplo para tratar de describir con mayor claridad al enlace covalente de un electrón, que es un enlace de orden formal de $\frac{1}{2}$. Dicho enlace del catión dihidrógeno o ión molecular dihidrógeno H_2^+ , es un enlace covalente especial de un electrón con orden de enlace formal de $\frac{1}{2}$, es el mismo enlace que hace virtualmente el **boro** con los dos hidrógenos centrales en el **diborano** y con frecuencia este mismo enlace, surge en los conductores y semiconductores dopados tanto con los materiales **tipo N** como en los materiales **tipo P**. Se dice en los textos que los hidrógenos centrales del diborano, hacen enlaces de 3 centros con 2 electrones, sí eso es así pero, si tenemos en cuenta que esos electrones del diborano están desapareados, entonces son enlaces tipo H_2^+ de 2 centros con la presencia de un electrón desapareado entre ellos.

SEMICONDUCTORES INTRINSECOS

Los semiconductores intrínsecos son cristales tetraédricos tal como los del diamante en el carbono, los cristales de silicio o de **germanio** u otros. Configuran cuatro enlaces covalentes compartidos entre electrones apareados, conformando cuatro orbitales moleculares que en los campos eléctricos y en condiciones especiales, se desplazan con mucha facilidad en la red cristalina como si fueran pares moleculares de Cooper a través de la diferencia de potencial. El **bandgap** final que rodea y circunda al **germanio**, a

pesar de que es distinta al **bandgap** de los orbitales moleculares en semiconductores intrínsecos, es de mucha menor contundencia que la del **silicio** y aunque esta a la vez es más débil que la del carbono, la del germanio sin embargo es más fuerte que la del **estaño**. Sin embargo, el **bandgap** atómico entre los distintos niveles de energía es distinto al de los **pares moleculares de Cooper** en los cristales de germanio, enfrente de los cristales de carbono y de silicio que responden mejor que ellos y de forma más eficaz a la radiación infrarroja y pueden ser usados en amplificadores de baja intensidad. Los cristales tetraédricos formados por los átomos del grupo catorce (14) son quizá los compuestos químicos sólidos que en condiciones estándares, configuran la mayor cantidad disponible de **pares moleculares de Cooper** o los concernientes a pares de electrones que forman orbitales moleculares que funcionan como pares de cooper, que son los portadores de carga que utilizan los semiconductores intrínsecos, es por eso que la semiconductividad intrínseca es inmune al **efecto isotópico** y es más, se incrementa a medida que aumenta la temperatura del semiconductor.

Si se somete el cristal de un semiconductor intrínseco a una diferencia de potencial, si se quiere ver así se producen dos flujos de direcciones contrarias, en un sentido la debida al movimiento de los pares de electrones que le pertenecen a los orbitales moleculares, en sentido contrario fluyen los huecos que van dejando dichos pares de electrones, es decir, el concepto de bandas le pertenece es a la cantidad de energía necesaria para que un par de electrones moleculares se desplace por la red cristalina del semiconductor intrínseco. Se dice un par de electrones moleculares porque los pares de electrones libres son usados en los semiconductores dopados tipo N, los llamados pares solitarios o pares de electrones no compartidos.

Los pares de electrones moleculares de Cooper en los semiconductores intrínsecos, se mueven desde los propios sitios donde se encuentran ubicados como orbitales moleculares del espacio interatómico y si son removidos, pues son inmediatamente reemplazados por otros pares, es por eso que a una determinada temperatura, las velocidades en creación de pares **electrón-huecos** y su recombinación, se igualan, de modo que la concentración intrínseca global de **electrones** y **huecos** en un semiconductor intrínseco, permanece constante y es función exclusiva de la temperatura en ese tipo de elemento y presión.

Los pares de Cooper en la superconductividad, están ubicados orbitando en pares a los propios orbitales s atómicos originales. En conductores eléctricos también los portadores de carga, son electrones apareados tipo s mientras que en semiconductores intrínsecos por una parte, son electrones apareados que cumplen en la red función de orbitales moleculares y por otra parte, en semiconductores extrínsecos son pares de electrones libres.

TEORIA DE BANDAS

Queremos referirnos a esta teoría intentando demostrar que el hecho de que nosotros sostengamos que siempre los electrones, tanto los de la conducción eléctrica en conductores, superconductores, semiconductores intrínsecos o dopados, siempre esas partículas se moverán es por pares de electrones, esto no se contradice en nada con la **teoría de bandas** es más, al contrario, ambos postulados se sustentan en cuanto a

semiconductores se trata, ya que si un par de electrones en un semiconductor quiere alcanzar la banda de conducción, debe adquirir mucho más energía que si es solamente un electrón desapareado solitario y la conductividad en semiconductores es directamente proporcional a la temperatura. Claro que tenemos diferencia con esta teoría en dos puntos y el primero de ellos es en el hecho de que nosotros sostenemos que el origen de los pares de electrones en superconductores y conductores eléctricos, no es el mismo molecular de los semiconductores que es del orden tipo **p** o híbrido **sp**, pero sostenemos que son electrones apareados procedentes del átomo original y es más, son nativos de los orbitales atómicos tipo **s** puros de los conductores eléctricos. Además la conductividad en conductores y superconductores tiene una relación inversamente proporcional a la temperatura. Otra diferencia que tenemos con esta teoría es que así como los diferentes tipos de semiconductores tienen su **bandgap**, los conductores y superconductores también tienen el suyo y es precisamente el mismo **bandgap** original entre niveles de energía que tienen contruidos los átomos en el cero absoluto entre sus niveles de energía.

La **teoría de bandas** es aquella teoría según la cual se describe la estructura electrónica de un material molecular, como una estructura de bandas electrónicas o bandas de energía. La teoría se basa en el hecho de que en una molécula los orbitales según la teoría, se solapan produciendo un número discreto de orbitales moleculares.

La **teoría de bandas** acepta que la **banda de valencia**, esté ocupada por los electrones que forman los enlaces moleculares entre los átomos pero que no intervienen en la conducción eléctrica. Es bien claro que los electrones cuando constituyen a los orbitales moleculares, abandonan inmediatamente a los átomos originales ya que le quedan perteneciendo es a la molécula en sí más no al átomo. Además sostiene esa teoría que la **banda de conducción** está ocupada por los mismos electrones, pero ya libres de sus átomos es decir, aquellos electrones que se han desligado totalmente de sus átomos originales pero pueden moverse fácilmente por toda la red cristalina, entonces ellos en realidad se desprenden es de la molécula más no de los átomos en sí porque ellos ya no le pertenecen a ellos sino a las moléculas.

Entre la banda de valencia que es una banda de energía y la banda de conducción, que es otra banda de energía, podría haber una brecha o un intervalo en la cantidad de energía, que sería el **bandgap** pues, es seguro que existirá en semiconductores y tendrá un valor mínimo de un par de electrones.

ELEMENTOS DEL GRUPO 14 DE LA TABLA PERIODICA DOPADOS CON ATOMOS DEL GRUPO 15. N₅.

A este tipo de dopaje lo vamos a identificar como **dopaje tipo N₅**. El propósito del **dopaje tipo N**, es el de producir en el material considerado, una abundancia de electrones portadores de carga eléctrica. Escojamos a un cristal del grupo 14 como el del **silicio**. Los átomos de la red en un cristal del elemento silicio, establecen cuatro enlaces covalentes compartidos entre ellos. Si un átomo como el **fósforo** que tiene 5 electrones de valencia, lo incorporamos a la red cristalina en el lugar de un átomo de silicio, entonces ese átomo de fosforo también está obligado a establecer los 4 enlaces covalentes compartidos pero se le presenta un problema, que si lo hace le restaría con

respecto al **silicio**, un electrón sobrante que no lo puede guardar de forma desapareada, además tampoco lo puede liberar para que deambule solitario en la banda interatómica de valencia. El fósforo Soluciona este problema guardando no a uno sino a un par de electrones apareados, como un par de electrones solitarios libres y cumpliendo la ley del octeto establece 3 enlaces covalentes compartidos con los silicios adyacentes y deja que uno solo de los 4 enlaces de la red, quede como aquel enlace covalente del H_2^+ con un solo electrón ajeno, que tiene un orden de enlace formal de $\frac{1}{2}$ con uno de los átomos de **silicios**. Este par de electrones libres del fósforo, serían los **portadores mayoritarios** de la red y con las mismas funciones del par de Cooper pues estarían disponibles para la conducción eléctrica. Nótese que a pesar de que el par de electrones libres no compartidos los pone el ión dopante, los pierde el átomo porque ya no le pertenecen, ellos permanecen en orbitales moleculares y pertenecen a la molécula. A éste fósforo debido a un enlace fraccionario de $\frac{1}{2}$, lo hace ser parcialmente negativo e inmóvil y como el silicio adyacente adopta una carga compensatoria también parcialmente positiva, por esto el material dopado **tipo N** generalmente tiene una carga eléctrica neta final de cero. Nótese también la importancia que tiene en los semiconductores dopados, el enlace de $\frac{1}{2}$ del H_2^+ . La presencia de un par solitario en el fósforo, provoca una fuerte repulsión electrostática sobre los electrones que se encuentran formando enlaces, forzando a que estos enlaces traten de aproximarse entre sí, como consecuencia los ángulos de enlaces se alteran produciendo, una asimetría estructural de la molécula y en la distribución de carga que causa una polaridad adquirida.

Nótese también que a pesar de que en este **dopaje tipo N₅** el fósforo guarda un par de electrones libres, a él solo le sobra es un electrón, sí, le sobra un solo electrón, pero solamente le sobra es con respecto al cristal de silicio que el dopa más no con otro tipo de dopaje **tipo P**.

ELEMENTOS DEL GRUPO 14 DE LA TABLA PERIODICA DOPADOS CON ATOMOS DEL GRUPO 13. P₃.

A este tipo de dopaje lo vamos a identificar como **dopaje tipo P₃**. El propósito en el **dopaje tipo P**, es el de crear abundancia de huecos. En el caso del cristal de **silicio** que tiene un átomo tetravalente, que se le une un átomo como el **aluminio** que tiene solo 3 electrones de valencia y se incorpora a la red cristalina, tal como si fuera un átomo de silicio. Ese átomo de aluminio que tiene allí la obligación de cumplir con los 4 enlaces covalentes compartidos del silicio pero cuenta con solo tres electrones disponibles. Entonces igual que el **fósforo** en el dopaje **tipo N₅**, configura a 3 enlaces covalentes compartidos y uno de los 4 enlaces lo deja como un enlace covalente de un solo electrón ajeno de un silicio, con un orden de enlace formal de $\frac{1}{2}$ y además, no necesita guardar electrones porque ni siquiera le restan. El enlace de $\frac{1}{2}$ también tiene efectos importantes sobre la simetría de la carga estructural y polaridad de la molécula. Nótese que en esta red cristalina los huecos del material dopado son relativos con respecto al fósforo y serían los **portadores mayoritarios** que presenta el ión parcial dopante fraccionariamente negativo de aluminio.

No debe pasar nunca por desapercibido el hecho de que al aluminio en el **dopaje tipo P3**, le queda el hueco es solo para un electrón, si pero es solo con respecto al silicio más no con respecto a un **dopaje tipo N5**.

ELEMENTOS DEL GRUPO 14 DE LA TABLA PERIODICA DOPADOS CON ATOMOS DEL GRUPO 16. N₆.

A este tipo de dopaje lo vamos a identificar como **dopaje tipo N6**. El propósito del **dopaje tipo N**, es el de producir en el material considerado, una abundancia de electrones portadores de carga eléctrica. Consideremos para esto el caso del **silicio**. Los átomos de la red en un cristal del elemento silicio que establecen cuatro enlaces covalentes entre ellos. Si un átomo como el **azufre** de 6 electrones de valencia, lo incorporamos a la red cristalina en el lugar de un átomo de silicio, entonces ese átomo de azufre también está obligado a establecer los 4 enlaces covalentes pero se le presenta un problema con la ley del octeto y porque le restan dos electrones sobrantes. Soluciona este problema guardando a dos pares de electrones como pares solitarios libres apareados y establece que los 2 electrones restantes sean utilizados en dos enlaces covalentes compartidos en la red con los **silicios**, además configuraría dos enlaces covalentes especiales de un electrón ajeno de orden formal de $\frac{1}{2}$. Estos dos pares de electrones libres del átomo donador de **azufre**, serían los **portadores mayoritarios** de la red y con las mismas funciones del par molecular de Cooper. Nótese que a pesar de tener un par de electrones libres el ión dopante del semiconductor, éste átomo sigue siendo totalmente neutro e inmóvil y el material dopado tipo N igualmente tiene una carga eléctrica neta final de cero.

Téngase cuidado que a pesar de que el átomo de **azufre** como ión dopante, en el **dopaje tipo N6** le sobran dos electrones libres con respecto al silicio, en este **tipo de dopaje tipo N6**, sin embargo, a pesar de eso le sobran 3 electrones con respecto a un **dopaje tipo P3** y 4 electrones con respecto a un dopaje **tipo P2**.

ELEMENTOS DEL GRUPO 14 DE LA TABLA PERIODICA DOPADOS CON ATOMOS DEL GRUPO 12. P₂.

A este tipo de dopaje lo vamos a identificar como **dopaje tipo P2**. El propósito en el **dopaje tipo P**, es el de crear abundancia de huecos. En el caso del cristal de **silicio** con un átomo tetravalente, que se le une un átomo como el **magnesio** o el **cadmio** que tienen solo 2 electrones tipo s de valencia y se incorpora a la red cristalina, tal como si fuera un átomo de silicio. Ese átomo de magnesio que tiene allí la obligación de cumplir con 4 enlaces covalentes pero cuenta con solo dos electrones disponibles. Entonces configura, igual que el **azufre** en el dopaje **tipo N**, a dos de los 4 enlaces como enlaces covalentes compartidos y a los dos enlaces restantes, como enlaces covalentes de un solo electrón ajeno, con orden de enlace formal de $\frac{1}{2}$ y además, tampoco necesita guardar electrones porque no le restan. Nótese que en esta red cristalina los huecos serían los **portadores mayoritarios** que presenta el ión parcial dopante elementalmente negativo de magnesio.

Nótese que a pesar de que a un **dopaje tipo P₂** le quedan dos huecos para dos electrones con respecto al **silicio**, también le restan 3 huecos para 3 electrones con respecto a un dopaje **tipo N₅**, además le quedan 4 huecos con respecto a un dopaje **tipo N₆** y 5 huecos con respecto a un dopaje **tipo N₇**.

ELEMENTOS DEL GRUPO 14 DE LA TABLA PERIODICA DOPADOS CON ATOMOS DEL GRUPO 17. N₇.

A este tipo de dopaje lo vamos a identificar como **dopaje tipo N₇**. El propósito del **dopaje tipo N**, es el de producir en el material considerado, una abundancia de electrones portadores de carga eléctrica. Consideremos para esto el caso del **silicio**. Los átomos de la red en un cristal del elemento silicio, establecen cuatro enlaces covalentes entre ellos. Si un átomo como el **bromo** o el **yodo** de 7 electrones de valencia, lo incorporamos a la red cristalina en el lugar de un átomo de silicio, entonces ese átomo de **bromo** también está obligado a establecer los 4 enlaces covalentes pero se le presenta un problema, que si quiere cumplir la ley del octeto le restarían 3 pares de electrones sobrantes que no lo puede guardar de forma desapareada, además tampoco los puede liberar a que deambulen en la banda interatómica de valencia. Soluciona este problema guardando 3 pares de electrones libres, solitarios, que para poderlos guardar necesariamente deben estar apareados en el átomo de **bromo**. Le restaría un solo electrón al bromo, con él establece un enlace covalente compartido con un **silicio** y 3 enlaces de $\frac{1}{2}$ con un solo electrón ajeno. Quedando así 3 pares de electrones libres y serían los **portadores mayoritarios** de la red y con las mismas funciones del par de Cooper pues estarían disponibles para la conducción eléctrica semiconductor. Debido a los 3 enlaces fraccionarios de $\frac{1}{2}$ que lo hace ser parcial y fraccionariamente negativo e inmóvil y el silicio adyacente adopta una carga compensatoria parcialmente positiva, por esto el material dopado **tipo N** generalmente tiene una carga eléctrica neta final de cero.

Nótese que a pesar de que el material con **dopaje tipo N₇**, le sobran 3 electrones libres con respecto al silicio, aun le subsisten 4 electrones libres con respecto al **dopado P₃** y 5 electrones sobrantes con respecto al **dopado P₂**.

ELEMENTOS DEL GRUPO 14 DE LA TABLA PERIODICA DOPADOS CON ÁTOMOS DEL GRUPO I. P₁.

A este tipo de dopaje lo vamos a identificar como **dopaje tipo P₁**. El propósito en el **dopaje tipo P**, es el de crear abundancia de huecos. En el caso del cristal de **silicio** con un átomo tetravalente, que se le une un átomo monovalente como el **sodio** o el **potasio** que tiene solo 1 electrón de valencia y se incorpora a la red cristalina, tal como si fuera un átomo de silicio. Ese átomo de sodio que tiene allí la obligación de cumplir con los 4 enlaces covalentes compartidos pero cuenta con solo un electrón disponible. Entonces igual que el **bromo** en el dopaje **tipo N**, configura a un enlace covalentes compartidos y 3 enlaces covalente de un solo electrón ajeno de un silicio, con un orden de enlace formal de $\frac{1}{2}$ y además, no necesita guardar electrones porque ni siquiera le restan. Los enlace de $\frac{1}{2}$ también tiene efectos importantes sobre la simetría de la carga estructural y

polaridad de la molécula. Nótese que en esta red cristalina los huecos del material dopado son relativos con respecto al bromo o al yodo y serían los **portadores mayoritarios** que presenta el ión parcial dopante fraccionariamente negativo.

Nótese que a pesar de que a un **dopaje tipo P₁** le quedan 3 huecos para 3 electrones con respecto al **silicio**, también le restan 4 huecos para 4 electrones con respecto a un dopaje **tipo N₅**, además le quedan 5 huecos con respecto a un dopaje **tipo N₆** y 6 huecos para 6 electrones con respecto a un dopaje **tipo N₇**.

Nótese también que las respectivas configuraciones estructurales de la red cristalina **tipo N** y **tipo P**, cuando los átomos dopantes pertenecen a los grupos vecinos inmediatos de la tabla periódica, las estructuras cristalinas son totalmente idénticas y del mismo signo, a medida que alejan los grupos dopantes de la tabla periódica, van siendo más negativos.

3- Conclusiones:

1- LA PRIMERA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta la estructura predictiva que tendría un cristal de silicio sucio con un **dopaje tipo N₇**, a través del dopaje hecho con un halógeno tal como el **cloro**, **yodo** o el **bromo**.

2- LA SEGUNDA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta la estructura predictiva que tendría un cristal de silicio sucio con un **dopaje tipo N₆**, a través del dopaje con un elemento tal como el **azufre** que pertenece al grupo del **oxígeno**.

3- LA TERCERA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta la estructura predictiva que tendría un cristal de silicio sucio con un **dopaje tipo N₅**, a través del dopaje con un elemento tal como el **fósforo** del grupo del **nitrógeno**.

4- LA CUARTA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta la estructura predictiva que tendría un cristal de silicio sucio con un **dopaje tipo P₃**, a través del dopaje con un elemento tal como el **aluminio** del grupo del **boro**.

5- LA QUINTA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta la estructura predictiva que tendría un cristal de silicio sucio con un **dopaje tipo P₂**, a través del dopaje con un elemento tal como el **cadmio** de los elementos de transición o un alcalinotérreo tal como el **magnesio**.

6- LA SEXTA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta la estructura predictiva que tendría un cristal de silicio sucio con un **dopaje tipo P₁**, a través del dopaje con un elemento alcalino tal como el **potasio** o también podría ser el mismo **cobre**.

7- LA SEPTIMA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta un diseño predictivo ejemplar que tendría una **unión PN** con dos electrones de diferencia entre un cristal de silicio sucio con un **dopaje tipo N₅**, enfrente de un cristal de silicio puro que tenga esta vez un **dopaje tipo P₃**.

8- LA OCTAVA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta un diseño predictivo ejemplar que tendría un semiconductor que tendría un (1) solo electrón de diferencia y por lo tanto jamás habría un rendimiento electrónico adicional al intrínseco entre un cristal de silicio con un **dopaje tipo N₅**, enfrente de un cristal de silicio intacto sin dopar es decir, con un **dopaje tipo P₄** o si se quiere también podríamos señalar que tiene un **dopaje tipo N₄**. Como los portadores de la carga eléctrica en los semiconductores, son por lo menos un par de electrones apareados, entonces un transistor formado entre **N₅-N₄** o si se quiere decir **N₅-P₄**, entre ellos no hay flujo electrónico adicional al intrínseco ya que el dopaje no alcanza de llegar a tener un par de electrones de diferencia.

9- LA NOVENA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta un diseño anunciado de una **unión PN** que contaría predictivamente con **dos (2) pares de electrones libres** de diferencia, formado por un cristal de silicio que

tenga un **dopaje tipo N₇** a través de las impurezas de un halógeno tal como el **yodo** o el **bromo** enfrente, de un cristal de silicio con **dopaje tipo P₃** contaminado con un elemento tal como el **aluminio**. Esto sería un semiconductor con **dopaje tipo N₇-P₃**. No es lo mismo ni tiene el mismo rendimiento utilizar esta **unión PN** anterior, que las aleaciones directas ya conocidas entre los elementos del grupo VII y el grupo III por ejemplo, el **bromuro de talio**.

10- LA DECIMA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta un diseño anunciado de las llamadas **uniones PN** que contarían predictivamente con **(2,5) dos pares y medio de electrones libres** de diferencia entre los dos cristales, el primero de ellos formado por un cristal de silicio que tenga un **dopaje tipo N₇**, a través de las impurezas de un halógeno tal como el **yodo** o el **bromo** enfrente de otro, el cristal de silicio con **dopaje tipo P₂**, contaminado con elementos tales como el **magnesio**, el **cadmio** o el **zinc**. Esto sería una **unión PN** con **dopaje tipo N₇-P₂**. Tiene más rendimiento esta **unión PN** descrita anteriormente, que las aleaciones directas entre cualquier elemento del grupo VII y el grupo II como el **cloruro de cadmio** o el **cloruro magnesio**. Nótese que como esta **unión N₇-P₂**, no puede mover sino hasta solo dos pares de electrones libres y tiene 2,5 pares, entonces a ella se le pierde un electrón que no puede mover.

10- LA DECIMOPRIMERA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica son pares de electrones libres, presenta un diseño anunciado de las llamadas **uniones PN** que contarían predictivamente con **tres (3) pares de electrones libres** de diferencia entre dos cristales, el primero de ellos formado por un cristal de silicio que tenga un **dopaje tipo N₇**, a través de las impurezas de un halógeno tal como el **yodo** o el **bromo** enfrente de otro, el cristal de silicio con **dopaje tipo P₁**, contaminado con elementos tales como el **sodio**, **potasio** o el **rubidio**. Esto sería una **unión PN** con **dopaje tipo N₇-P₁**. Tiene más rendimiento esta **unión PN** descrita anteriormente, que las aleaciones directas entre los elementos del grupo VII y el grupo I como el **cloruro de cobre** o el **cloruro potásico**.

11- LA DECIMOSEGUNDA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es que partiendo de su postulado de que siempre los portadores de carga eléctrica serían pares de electrones libres, sugiere la posibilidad de poder diseñar dispositivos semiconductores, capaces de soportar mayores niveles de tensión y corriente que los actuales.

13- LA DECIMOTERCERA GRAN, PERO GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo, es que para poder construir o diseñar la estructura de un buen semiconductor **extrínseco**, es necesario construirlo alrededor de un eje central de un semiconductor **intrínseco** del grupo IV de la tabla periódica. Esto permite poder importar extrínsecamente, una diferencia de potencial que amplifica el flujo de electrones libres entre los cristales

dopados. No más quedaría dependiendo de que la cantidad de portadores mayoritarios que sería función directa de la cantidad de los átomos de impurezas introducidos.

14- LA DECIMOCUARTA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo es la observación de que la mayoría de los materiales semiconductores compuestos a quienes se les ha observado resultados alentadores, son aquellos compuestos formados por los elementos que están a la misma distancia electrónica del grupo IV por ejemplo, compuestos creados por átomos del grupo III y del grupo V como el **nitruro de aluminio**, los formados por partículas procedentes del grupo II y VI como el **telururo de cadmio** y finalmente los compuestos creados a partir de elementos propios del grupo I y VII como el **cloruro de cobre**.

15- LA DECIMOQUINTA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo sería la de proponer a la comunidad académica que se reemplace la película delgada de telururo de cadmio en las células solares, por una estratégica **unión NP** que conste por un lado de un semiconductor **tipo N₆** construido con silicio ampliamente dopado de **telurio** y por el otro, la presencia también de silicio pero esta vez que sea lo suficientemente dopado con impurezas de **cadmio**, quedando diseñado el semiconductor como un transistor **tipo N₆-P₂**.

16- LA DECIMOSEXTA GRAN CONCLUSIÓN de este trabajo sería la de proponer a la comunidad académica, que se reemplace finalmente a ese dispositivo **tipo N₆-P₂** de telurio y cadmio, por un idéntico dispositivo de silicio **típico N₇-P₁** diseñado exclusivamente de un halógeno tal como el **yodo** o el **bromo** y un metal como el **rubidio** o la **plata**.