

CNEA-AC 56/85

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
GERENCIA DE PROTECCION RADIOLOGICA Y SEGURIDAD

Curso Protección Radiológica y Seguridad Nuclear

Nivel Técnico

TEMA: DETECCION DE LA RADIACION

Ing. Roberto SEGADO

Buenos Aires

1985

DETECCION DE LA RADIACION

Apuntes recopilados por el Ing. Roberto SEGADO

DETECTORES GASEOSOS EN RADIOPROTECCION

1.- INTRODUCCION

En general, un monitor empleado en radio-protección puede ser visto como constituido por dos partes:

- el detector.
- la electrónica asociada.

La función del detector es la de servir de transductor (*) entre el campo de radiación a medir y el equipo electrónico asociado, el cual provee el sistema de presentación de la información al operador.

Se tiene entonces la necesidad de medir lo cual implica saber cómo hacerlo y además el hecho de saber "que" se está midiendo, o sea, interpretación correcta de la información presentada.

Si se clasifican los detectores de acuerdo al fenómeno físico en el cual se basa la transducción, se tienen:

- detectores gaseosos.
- detectores por centelleo.
- detectores semiconductores.
- detectores fotográficos.
- detectores de activación.
- detectores de excitación.
- detectores químicos.
- detectores calorimétricos.

1.1.- Detectores gaseosos:

Son recintos eléctricamente confinados entre dos electrodos entre los cuales se establece una diferencia de potencial. El campo de radiación a medir interactúa con el gas del recinto y lo ioniza de acuerdo a los fenómenos ya conoci-

dos. Si la diferencia de potencial (ddp) es igual a cero, los iones generados tienen una distribución de velocidades aleatorias y se recombinan entre sí, tal que la carga neta es nula.

Si la diferencia de potencial entre electrodos es diferente de cero, al campo de la carga espacial se le superpone el generado por la ddp tal que atrae a los iones generados a los electrodos respectivos.

Al aumentar la ddp. aumenta el campo eléctrico y disminuye la probabilidad de recombinación, con lo cual aumenta el número de iones recolectados.

Si se sigue aumentando la ddp llega un momento en que todos los iones generados por el campo de radiación son recolectados.

A los detectores gaseosos trabajando en esta zona se los denomina "cámara de ionización".

Si se sigue aumentando la tensión entre electrodos algunos iones adquirirán suficiente energía cinética como para interactuar en su trayectoria con átomos del gas y producir nuevos iones.

Se produce así una multiplicación de los iones primarios que aumenta con la ddp en forma proporcional pues un aumento del campo eléctrico produce un aumento proporcional en la probabilidad de producción de iones extras.

Se tienen así los "contadores proporcionales".

El mismo razonamiento se extiende hasta que la ddp es tan grande que por cada interacción con el detector se ionizan todos los átomos del recinto. A partir de este momento el número de iones colectados se mantiene constante aún si se sigue aumentando la ddp y se tienen los "detectores Geiger - Müller".

La limitación superior en el aumento de ddp está dada por la descarga disruptiva entre electrodos.

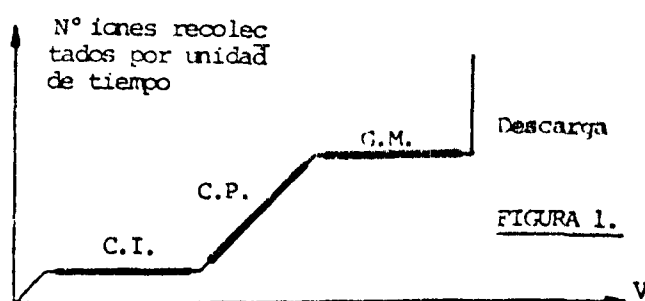


FIGURA 1.

(*) Un transductor es todo dispositivo que convierte una energía en otra más fácilmente procesable, p.e. eléctrica.

Por lo tanto un detector gaseoso puede teóricamente trabajar en tres zonas según la ddp entre electrodos.

2.- CAMARA DE IONIZACION

Cuando el número de iones colectados en un detector gaseoso es igual al número de iones generados por el campo de radiación incidente, se dice que el detector es un cámara de ionización.

Cada vez que se produce una interacción de una partícula ionizante con el detector, los electrodos colectan los iones formados apareciendo un pulso de carga, que se puede transformar en uno de corriente o tensión según el equipo electrónico empleado.

Este pulso es muy pequeño debido a la falta de multiplicación; por ello resulta casi imposible usar este detector como contador de eventos conviene medir el valor medio de la tasa de cargas colectadas o sea la corriente media que circula por el circuito exterior.

Para los flujos usuales de radiación y los volúmenes prácticos de cámara estos valores son muy pequeños, del orden del fempto al pico ampere, (ver Apéndice 1).

Hoy la tecnología electrónica permite medir con cierta facilidad corriente de 5×10^{-15} a 10^{-14} A.

Como idea de valores el ábaco siguiente da niveles de corriente en función del volumen de cámara para cada tasa de exposición.

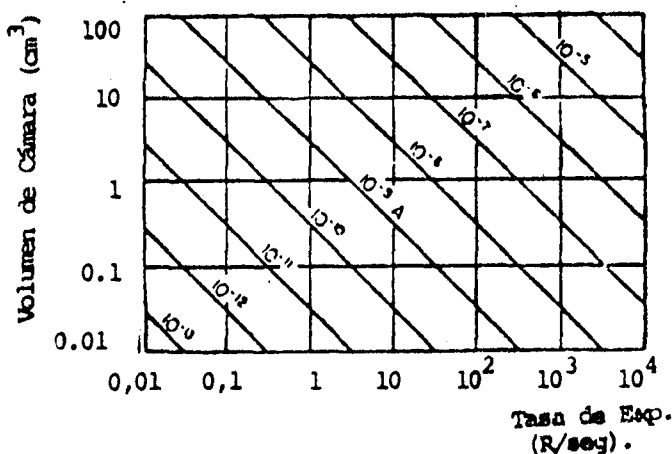


FIGURA 2.

$$\begin{matrix} Vol = 1 \text{ cm}^3 \\ x = 1 \text{ R/seg} \end{matrix} \Rightarrow I \approx 0,5 \times 10^{-10} \text{ A.}$$

Se hace notar que el volumen real de la cámara, o "volumen sensible" es aquel donde los iones pueden alcanzar el electrodo correspondiente; es menor que el geométrico y se lo define eléctricamente con electrodos o anillos de guarda.

3.- CONTADORES PROPORCIONALES

En este tipo de detector la carga total recolectada depende de la tensión aplicada (por el factor de multiplicación).

Si la partícula ionizante interacciona con un contador proporcional, para una dada tensión, el número de iones recolectados será proporcional al número de iones originados o sea, a su energía (a la energía que la partícula transfiere o cede al gas).

Por lo tanto es posible medir la energía de cada partícula que interacciona, obteniéndose un pulso de tensión proporcional a su energía. Al mismo tiempo contando el número de pulsos, se puede conocer el número de partículas que en un dado tiempo interaccionan con el contador (para ello es necesario que los pulsos no se superpongan).

El equipo electrónico de lectura y/o acumulación debe ser capaz de discriminar entre el ruido total del sistema, y los pulsos correspondientes a la información.

El contador proporcional presenta dificultades de orden práctico, pues se necesita: alta estabilidad de la tensión de alimentación (la que debe ser de alto valor para obtener pulsos de altura razonable); estabilidad de la respuesta a largo plazo; rigidez mecánica, etc.; problemas éstos superados parcialmente con los centelleadores y los detectores de estado sólido. En general se usan para mediciones de "contaminación" (caso de plutonio en pulmones, tritio en aire, etc.) lo cual se verá más adelante.

4.- CONTADORES GEIGER-MULLER

En este tipo de detectores basta que una sola partícula ionizante de cualquier tipo y

energía interactúe con el mismo para que se ionice todo el gas.

El pulso obtenido es el más grande para esa configuración y no depende del tipo de radiación ionizante incidente.

Sus desventajas son que es imposible discriminar energías y que el pulso de salida es mucho más ancho que en los otros detectores (lo cual aumenta el tiempo muerto).

Sus ventajas son su costo reducido y una electrónica asociada sencilla.

En principio sería imposible usar tubos Geiger en campos multienergéticos ya que el número de eventos por unidad de exposición depende del espectro de la radiación incidente.

En efecto, la curva de sensibilidad (cuentas/roentgen) en función de la energía es proporcional a la del coeficiente de absorción total en función de la energía, salvo para bajas energías donde pesa la absorción en las paredes del tubo; para solucionar ello se efectúan "ecualizaciones" que consisten en agregar blindajes optimizados, concéntricos al tubo, para las energías en que el tubo es más sensible.

La sensibilidad (cuentas/roentgen) que se pierde con estos blindajes es ampliamente compensada con la linealidad obtenida.

4.1.- Tiempo muerto de un tubo Geiger:

El tiempo de colección de los iones positivos es de gran importancia ya que el efecto de carga espacial durante su desplazamiento hacia el electrodo correspondiente consiste en "bloquear" el tubo ante la incidencia de una nueva partícula ionizante.

Esta característica temporal hace que el conteo medido y real difieran (debido al tiempo de resolución).

Se tiene así:

$$N = \frac{n}{1 - nT_2}$$

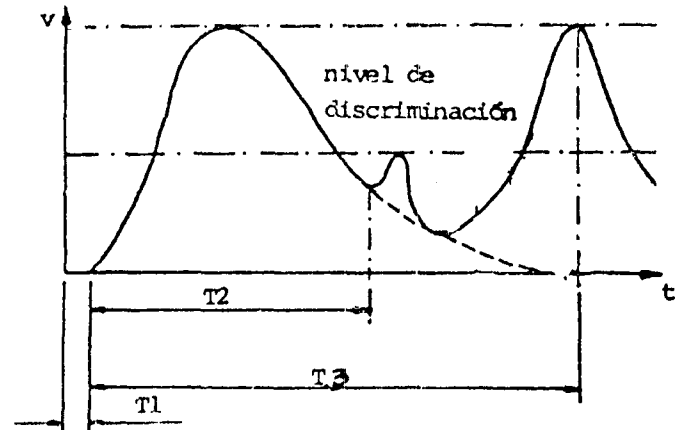
n: tasa de conteo medida.

N: tasa de conteo real.

T₂: tiempo de resolución

Esta fórmula permite corregir las pérdidas de conteo.

La figura 3 presenta la "característica temporal" de los pulsos de un tubo Geiger.



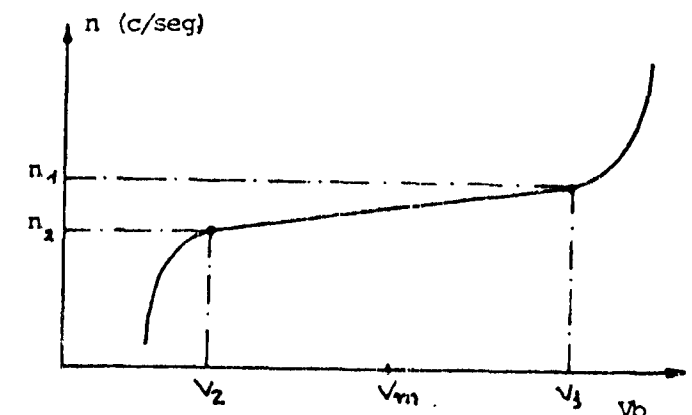
T1: tiempo de latencia (la partícula interacciona para t=0)

T2: tiempo muerto.

T3: tiempo de restitución.

4.2.- Plateau (palier) de un tubo Geiger:

La figura 4 presenta la curva (en la región Geiger cuando la intensidad del campo de radiación es constante) de la variación de la tasa de conteo en función de la ddp entre electrodos.



$$p \% = \frac{n_1 - n_2}{\frac{n_1 + n_2}{2}} \cdot \frac{1}{V_1 - V_2} \cdot 100$$

Se elige generalmente como tensión de funcionamiento el valor V_m a mitad de plateau.

La pendiente relativa del plateau da idea de la calidad del tubo, así como también la longitud de plateau.

$$h\nu = E_i - \Delta E$$

donde:

E_i : energía ionización gas.

ΔE : energía necesaria para extraer un electrón del cátodo.

Estos fotones pueden volver a originar foto-electrones que recomienzan avalanchas y el fenómeno se automantiene. Es necesario entonces detenerlo al fin de la primera avalancha.

Ello puede hacerse por reducción de la tensión de polarización en el momento adecuado con circuitos electrónicos, o agregando halógenos o vapores orgánicos que absorben los fotones emitidos, o "quenching".

Una de las aplicaciones más corrientes de los tubos Geiger es como detectores de monitoreo.

Para ello se los puede hacer trabajar en "pulsos" o en "corriente".

Se obtienen así monitores confiables, robustos y económicos.

5.- MEDICION DE NEUTRONES

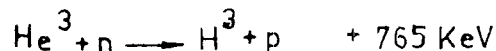
Para medición de neutrones se agregan elementos que interaccionen con los neutrones dando partículas que son las que se detectan.

Para neutrones térmicos se usan compuestos borados, como el BF_3



El boro tiene una sección eficaz considerable para neutrones térmicos, este método se usa en cámaras de ionización.

Para espectrómetros de neutrones rápidos se usan contadores proporcionales con hidrógeno dando una reacción (n,p) o con tritio dando



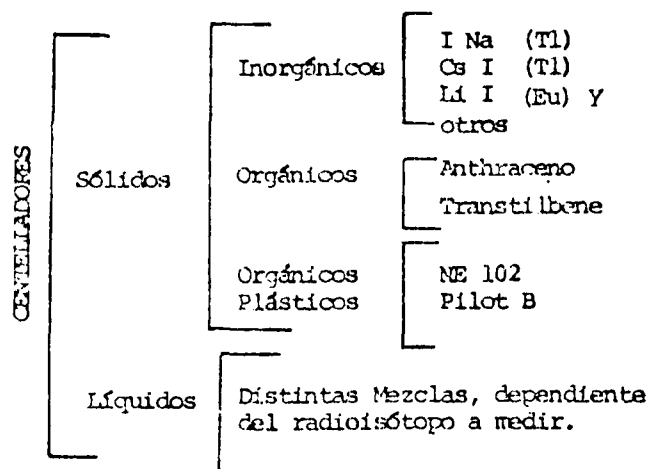
6.- DETECTORES INMEDIATOS: CENTELLADORES SOLIDOS Y LIQUIDOS

Introducción:

Su principio de funcionamiento se basa en la interacción que se produce entre la radiación y el material que constituye el cristal. Como consecuencia de esta interacción algunos de los átomos del cristal se excitan; al desexcitarse posteriormente se emite radiación electromagnética de longitud de onda visible o muy próxima a ésta. Estos pulsos luminosos pueden ser detectados por tubos fotomultiplicadores que los transducen en pulsos eléctricos, fácilmente manejables por los sistemas de instrumentación electrónica.

Al conjunto de cristal centellador y fotomultiplicador se lo conoce con el nombre genérico de detector de centelleo.

Los centelladores pueden clasificarse de la manera siguiente:



6.1.- Centelladores inorgánicos:

Forman este grupo algunos cristales inorgánicos a los que se le mejora notablemente su capacidad luminiscente con el agregado de activadores, por ejemplo el cristal de ioduro de sodio que no tiene una luminiscencia apreciable se convierte en un excelente centellador con el agregado de talio.

Por sus características se utilizan preferentemente los siguientes cristales inorgánicos:

- Na I (Tl): de uso muy corriente en espectrometría γ y X ; se pueden conseguir cristales muy grandes, hasta de 8" de diámetro por 8" de alto, obteniéndose detectores sumamente sensibles.
- SZn (Ag): se lo emplea en la detección de rayos
- Li I (Eu): se lo utiliza en la detección de neutrones aprovechando la reacción.



La siguiente tabla resume las características de los principales centelladores inorgánicos:

Centellador (activador entre parén.)	Densidad g/cm ³	Número Atóm.	Long. de onda Å.	Índice de Refrac.	Eficiencia referida al antraceno	Tiempo de decaim.	Principal Uso	Observaciones
Zn S (Ag)	4.1	27	4500	2.4	2.0	1	α	Cristales pequeños transparencia pobre
Cd S (Ag)	4.8	44	7600	2.5	2.0	1	α	Cristales muy pequeños amarillos
Na I (Tl)	3.67	50	4100	1.7	2.0	0.25	γ y X	Muy buenos cristales fáciles de obtener Higroscópicos.
K I (Tl)	3.13	49	4100	1.68	0.8	1	γ	Muy Buenos-fácil obtención - no Higroscópicos.
Na Cl (Ag)	2.17	16	2450	1.54	1.15	1	γ	Muy buenos cristales fáciles de obtener.
Cs I (Tl)	4.51	54	blanco	1.79	1.5	1	γ y Part. pes.	Muy buenos cristales fáciles de obtener No Higroscópicos
Li I (Tl Sn o Eu)	4.06	52	Azul o Verde	1.95	1.95	1	n	Problemas de activación - Higroscópicos

Se define como eficiencia a la relación $E = \frac{N}{N_0} \cdot 100$ donde N_0 es el número total de fotones gamma radiados por segundo por la fuente y N el número de interacciones en el cristal.

La relación inversa entre la eficiencia y la energía se debe a que cuando las partículas son muy energéticas pueden atravesar el cristal sin haber dejado en él su energía; al aumentar el grosor del cristal esta probabilidad disminuye, con lo cual aumenta la eficiencia con el espesor del centellador.

6.2.- Centelladores orgánicos:

Uno de los principales inconvenientes de los cristales inorgánicos consiste en que su fabricación es dificultosa, debido a que se emplea el proceso de enriquecimiento progresivo; una vez logrado el cristal, el maquinado es sumamente delicado y encarece notablemente el detector.

Todos los inconvenientes pueden ser obviados utilizando materiales centelladores orgánicos. Los costos se reducen notablemente y se pueden obtener en el mercado cristales de las más diversas formas y tamaños a precios razonablemente bajos.

Los cristales orgánicos más utilizados son:

- a) El antraceno: en mediciones de radiación de baja energía debido a la buena altura relativa del pulso.
- b) El estilbeno: en discriminaciones de partículas debido a la diferencia en el tiempo de decaimiento para interacciones de distintas partículas.
- c) El Pilot B: en mediciones de radiación de bajo fondo.
- d) El NE 102: en mediciones especiales con plásticos laminados planos, curvos o espiralados.

Los centelladores plásticos se fabrican en todo tipo de geometría, como ser espiralados, celdas de flujo (flow Cells), etc., que se emplean para realizar monitoreo continuo de emisores

de baja energía tales como el C^{14} y el H^3 , lográndose de esta manera mejorar sensiblemente la eficiencia de conteo.

6.3.- Centelladores líquidos:

Su utilización es de gran interés cuando la radiación que se pretende detectar es de tan baja energía que no llega a interactuar con ningún reactor sólido y/o por la presencia de la ventana de entrada; tal es el caso de la radiación β de 18,6 KeV del C^{14} .

Se lo emplea mezclado con un disolvente un corrector de longitud de onda y la muestra a medir; el "corredor de longitud de onda" se emplea debido a que la luz emitida por el centellador líquido no es la que corresponde a la máxima sensibilidad del fototubo, por ello se lo mezcla con el citado corredor de longitud de onda que consiste en un compuesto que se excita con la luz proveniente del centellador y se desexcita emitiendo luz de longitud de onda ubicada en el máximo de la respuesta espectral del fototubo.

Nuclear Enterprises ofrece varios tipos de centelladores líquidos (NE 216 - NE 220 - NE 26 - NE 250 y NE 221) que presentan distintas eficiencias y características técnicas que los hacen de gran interés en la práctica.

En la realización de espectrometría con centelladores líquidos se presenta un problema que consiste en que ciertas muestras contienen compuestos que producen "quenching" es decir que interfieren con la generación o emisión de luz.

Se distinguen dos mecanismos de quenching: químico y de color.

Si el solvente absorbe energía de las partículas y no las transfiere al centellador se dice que se produce "quenching químico".

Si el solvente absorbe los fotones de luz emitidos por el centellador se produce "quenching de color".

Cuando se produce quenching disminuye el número de fotones emitidos y algunos de los pulsos se distorsionan en amplitud relativa con la consiguiente alteración de la medición.

7.- FOTOMULTIPLICADORES

El fotomultiplicador es una válvula electrónica multielectrónica compuesta de un cátodo fotosensible, varios electrodos llamados dinodos y un electrodo colector. Se polariza de manera que el primer dinodo sea positivo respecto del cátodo, cada dinodo positivo respecto del que le precede y el ánodo positivo respecto del último dinodo.

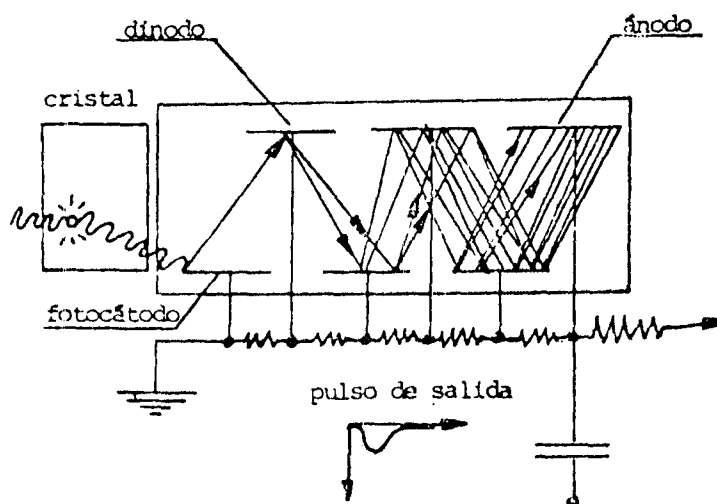
El proceso que se cumple en el sistema detector desde la interacción de la radiación con el cristal puede verse de la siguiente manera:

- 1) La radiación interacciona con el cristal produciendo radiación luminosa.
- 2) Los fotones luminosos, así formados, recorren el cristal y llegan al fotocátodo. Este electrodo que está asociado lumínicamente al cristal tiene como característica que la energía necesaria para arrancar un electrón por efecto fotoeléctrico es muy baja en la zona del espectro en la que está ubicada la emisión luminosa (4.000 a 6.000 Å)
- 3) Los fotones luminosos interaccionan con el fotocátodo arrancando electrones por efecto fotoeléctrico.
- 4) Los electrones se encuentran con el campo eléctrico existente entre el fotocátodo y el primer dinodo y son acelerados hacia el mismo.
- 5) Al llegar al dinodo interaccionan con el mismo arrancando en promedio más de un electrón por electrón incidente.
- 6) El nuevo grupo de electrones se encuentra en el campo eléctrico formado entre el 1er. y 2do. dinodo, donde se repite la aceleración interacción y arranque de nuevos electrones.
- 7) El proceso se repite en todos los dinodos del fotomultiplicador.

- 8) Los electrones primarios que se han multiplicado en su paso por el sistema de dinodos son colectados en el último electrodo llamado ánodo.
- 9) La corriente electrónica que llega al ánodo circula por una resistencia produciendo un pulso de tensión, cuya altura es directamente proporcional a la energía de la radiación incidente.
- 10) El pulso es recogido por el equipo electrónico para su análisis.

Un esquema clásico del circuito eléctrico se da en la figura 5.

- FOTOMULTIPLICADOR. -



Las ventajas de este tipo de detector son:

- a) La posibilidad que brinda de poder hacer espectrometría debido a la relación lineal entre la altura de los pulsos y la energía incidente.
- b) La buena sensibilidad del mismo.
- c) La razonablemente buena confiabilidad del conjunto.

La ganancia total de electrones a través de toda la estructura enfocada es función del número de dinodos y de la tensión aplicada,

según la siguiente expresión:

$$G = d \cdot V^n$$

con:

V: tensión aplicada.

n: número de dinodos.

d: constante (función del tipo de fototubo)

siendo generalmente $10^5 \leq G \leq 10^{10}$

Existen diversos tipos de estructuras enfocadas tales como el de ventana veneciana, estructura enfocada compacta, etc.

Los fotomultiplicadores se construyen en diámetros que varían desde 0,5 a 5 pulgadas de diámetros, y aún más en casos especiales.

Sus principales desventajas son:

- La resolución de los espectros está limitada por la pureza del cristal y las características del fototubo
- En mediciones largas se pueden producir variaciones en la calibración, debido a las modificaciones en las características del fotomultiplicador con variaciones de la temperatura.

Cuando se analizan espectros de bajas energías se emplean centelladores de muy poco espesor (≈ 1 mm), para disminuir de ésta forma la contribución del fondo.

NOTA: Se destaca que el concepto de resolución se aplica solo a las energías características de los picos de un espectro y su valor depende por lo tanto de dichas energías; en el Apéndice 4 se tiene para el pico de $E_1 = 1,17$ Mev una R_1 (%) = $100 \frac{\Delta E_1}{E_1}$ y para el pico de $E_2 = 1,33$ Mev una R_2 (%) = $100 \frac{\Delta E_2}{E_2}$ resultando $R_1 \neq R_2$.

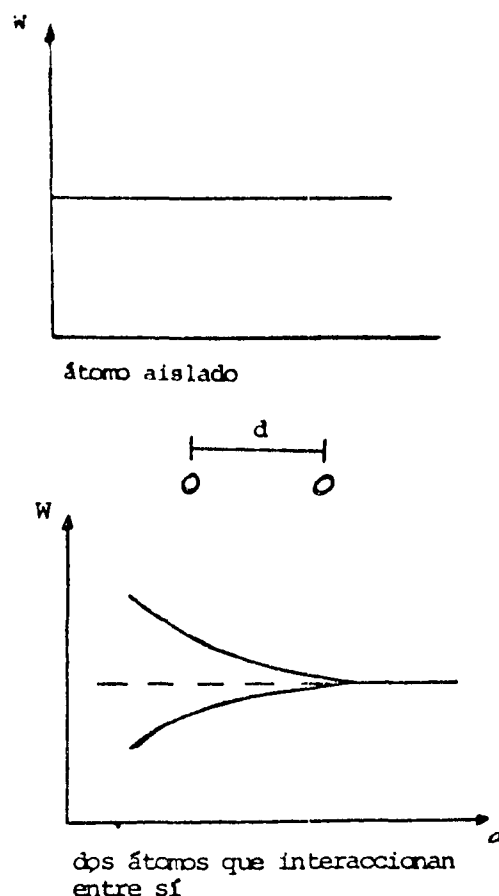
8.- CONCEPTOS BASICOS SOBRE SEMICONDUCTORES

De acuerdo con la mecánica cuántica, las energías de los electrones de un átomo aislado

poseen valores discretos. Se dice entonces que existe un número discreto de niveles de energía en el átomo aislado y que estos niveles pueden ser ocupados por electrones entendiéndose que lo que se quiere decir es que hay electrones cuyas energías son las de los niveles. Estos niveles vienen definidos por los cuatro números cuánticos. Por otra parte de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, los niveles que ocupan los electrones en un átomo aislado son todos diferentes.

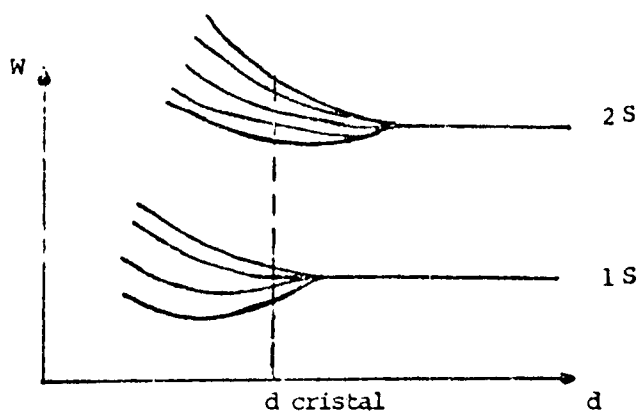
En los gases, los átomos están tan alejados entre sí que prácticamente no interaccionan por lo que pueden considerárselos aislados y aplicarles lo anterior.

En cambio, en los sólidos cristalinos la distancia entre los átomos es muy pequeña (del orden de algunos Å) por lo que la interacción entre ellos es considerable. En este caso los niveles de energía de los electrones de las capas interiores, prácticamente no son afectados, pero los niveles de las capas exteriores cambian considerablemente ya que los electrones externos son compartidos por varios átomos. Como consecuencia de esto el nivel original de un electrón externo se desdobra.

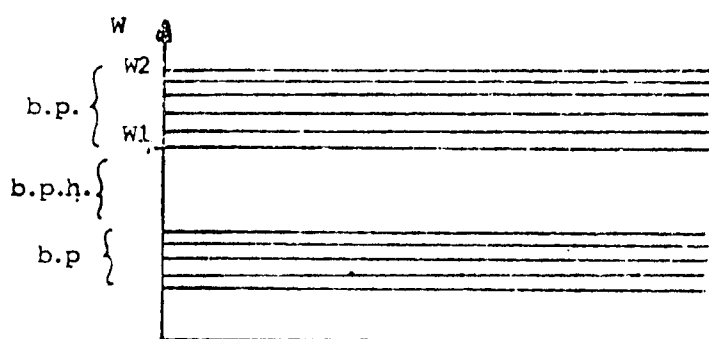


La separación entre niveles depende de la distancia interatómica de.

En un cristal son muchísimos los átomos que interactúan por lo que un dado nivel se desdobla en muchos dando origen a lo que se denomina banda de energía.



Para un cristal dado, la distancia d es constante y las bandas se pueden representar así:



Se ve que entre las bandas permitidas (bp) existen las llamadas bandas prohibidas (bph) o sea niveles de energía que los electrones de los átomos del cristal no pueden ocupar. Se demuestra:

- 1) Que el ancho de la banda ($W_2 - W_1$) depende sólo del espaciado interatómico y no del número de átomos que interactúan.
- 2) Que el número total de niveles en que se desdobla cada nivel original es igual al número de átomos que interactúan.

Los niveles más altos se desdoblan antes que los más bajos, pues los niveles más altos son los de mayor energía que a su vez son los correspondientes a los electrones de órbitas más alejadas.

Una bp puede estar totalmente llena, totalmente vacía o parcialmente llena.

La mecánica cuántica demuestra que un electrón que ocupa un nivel superior de la banda tiene masa negativa; si ocupa un nivel inferior tiene masa positiva y si ocupa el nivel central tiene masa infinita. Cuando un electrón dentro de un cristal es sometido a la acción de un campo eléctrico, su movimiento se puede hallar con las siguientes ecuaciones:

$$\vec{F} = -e \vec{E}$$

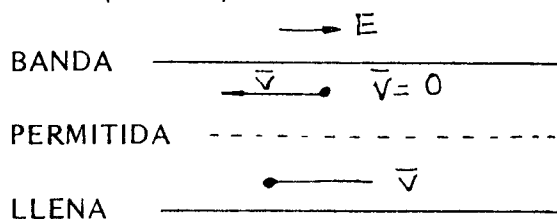
$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{m} \vec{F}$$

Si $m = \infty$ $\frac{d\vec{v}}{dt} = 0$ ∴ el electrón no se mueve

Si $m > 0$ el electrón se mueve en sentido opuesto a E .

Si $m < 0$ el electrón se mueve en sentido igual a E .

Esto se puede esquematizar así:



Por lo tanto los electrones que están en una banda totalmente llena no contribuyen a la corriente eléctrica en un cristal; brevemente se dice que la banda no contribuye a la corriente eléctrica. Obviamente una banda totalmente vacía tampoco contribuye a la corriente eléctrica. En cambio si la banda está parcialmente llena, entonces si contribuye a la corriente en un cristal pues hay un transporte neto de cargas en un dado sentido. Un cristal que está a $0^\circ K$ posee en ausencia de cualquier agente excitador, (tal como un campo eléctrico, una radiación ionizante, etc.), un conjunto de bandas totalmente llenas y otro conjunto de bandas

totalmente vacías. La banda llena de mayor energía se denomina banda de valencia (bv) porque sus niveles son los de los electrones de valencia. La primera banda vacía se denomina banda de conducción (bc) porque los electrones que pueden eventualmente ocuparla son electrones libres que contribuyen a la corriente eléctrica del cristal. La bph que separa la bv de la bc tiene un ancho ΔE que es la energía de activación o sea la mínima energía que un electrón necesita para saltar de la bv a la bc.

8.1.- Conductores, semiconductores y aisladores:

Usando los conceptos anteriores se puede ver la diferencia entre conductores, semiconductores y aisladores.

- 1) Un conductor es todo cristal en el cual la bv y la bc se superponen parcialmente por lo que a los electrones que originalmente estaban en la bv les es muy fácil pasar a la bc con muy pequeña energía de activación. En consecuencia a temperatura ambiente son muchísimos los electrones que están en la bc que a su vez se encuentra parcialmente llena y así el cristal conduce muy fácilmente la electricidad.
- 2) Los semiconductores son cristales en los cuales la energía de activación es $\Delta E \cong 1 \text{ eV}$.
- 3) Los aisladores son cristales en los cuales la energía de activación es $\Delta E \cong 6 \text{ eV}$

8.2.- Semiconductores:

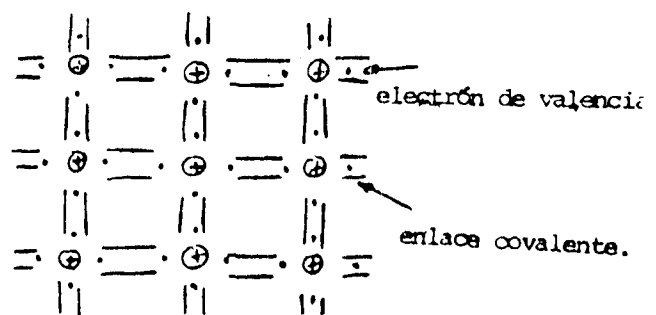
Los semiconductores más importantes son el germanio y el silicio. Un semiconductor a 0° K tiene todas sus bandas llenas o vacías, por lo tanto se comporta como un aislador. Pero a temperatura ambiente es considerable el número de electrones que adquirieron energía suficiente como para pasar de la bv a la bc por lo que el

cristal tiene a estas bandas parcialmente llenas y en consecuencia es capaz de conducir la corriente eléctrica.

8.2.1.- Semiconductores intrínsecos:

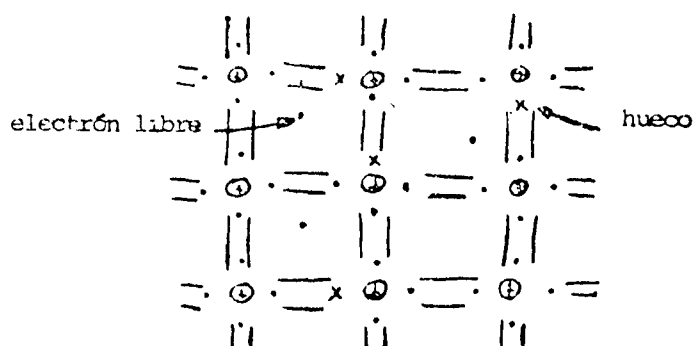
Los semiconductores intrínsecos son semiconductores que desde el punto de vista cristalográfico son absolutamente puros y además sin ningún tipo de imperfección en su estructura cristalina. También se los llama semiconductores homogéneos. En un semiconductor intrínseco la única causa de su conductibilidad es la temperatura.

Considérese por ejemplo un cristal de Ge.



El Ge es tetravalente por lo que cada átomo comparte cuatro electrones con 4 átomos vecinos de la estructura cristalina. Estos electrones están fuertemente ligados al núcleo y sus niveles están dentro de la bv. A 0° K el cristal es un aislante pues todos los electrones de valencia llenan completamente la bv y la bc está totalmente vacía.

A temperatura ambiente, algunos electrones de valencia adquieren suficiente energía como para pasar a la bc o sea que se transforman en electrones libres. La estructura cristalina se puede representar ahora así:



La ausencia de un electrón en un enlace covalente correspondiente se denomina hueco y se lo puede asimilar a un portador libre de carga positiva cuyo nivel energético está en la bv .

Esto es así, pues el átomo al perder un electrón queda ionizado positivamente con una carga $+e$ y el electrón que fugó a la bc deja el nivel vacío en la bv .

El hueco es fácilmente llenado por otro electrón de valencia pues sus niveles energéticos están muy próximos ya que ambos están dentro de la bv ; pero entonces el hueco aparece en otro lugar del cristal y como el átomo correspondiente queda ionizado positivamente todo ocurre como si dicho hueco fuese un portador libre de carga $+e$.

En resumen, a temperatura ambiente se tienen electrones libres y huecos libres que bajo la acción de un campo eléctrico forman una corriente eléctrica.

Como a cada electrón libre le corresponde un hueco surge que:

$$n_i = p_i$$

en donde:

n_i : concentración de electrones.

p_i : concentración de huecos.

8.2.2.- Generación y recombinación:

Debido a la agitación térmica, continuamente hay electrones que saltan de la bv a la bc dejando un hueco en la bv .

Se dice que cuando ocurre esto que se generan pares de electrón - hueco.

De igual manera un electrón libre puede perder parte de su energía y por lo tanto caer a la bv llenando un hueco. Desaparece entonces un par electrón-hueco y se dice que se ha efectuado una recombinación. En equilibrio, el número de generaciones por unidad de tiempo es igual al número de recombinaciones por unidad de tiempo, en promedio.

Se demuestra que la conductividad σ del cristal, vale:

$$\sigma = (n_i \mu_n + p_i \mu_p) e$$

siendo:

n_i, p_i : las concentraciones de electrones y huecos.

μ_n, μ_i : las movilidades de los electrones y huecos.

e : la carga del electrón (en valor absoluto)

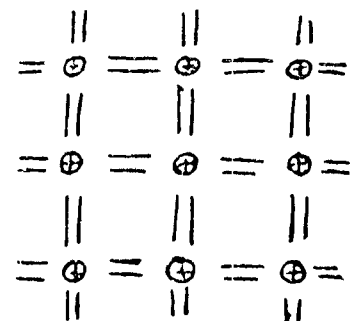
Las movilidades dan idea de la mayor o menor facilidad con que los portadores pueden moverse dentro del cristal. Dichas movilidades dependen de la temperatura y del gradiente de potencial.

8.2.3.- Semiconductores Extrínsecos:

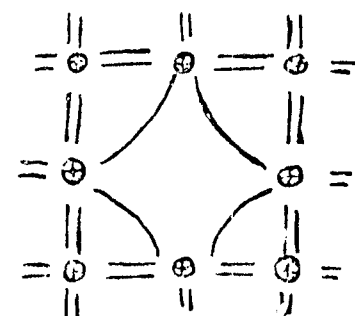
Los semiconductores extrínsecos son semiconductores en los cuales existen impurezas y/o fallas estructurales. Las fallas estructurales pueden ser:

1) Vacancia o defecto de Shottky.

En este caso, existen ausencia de átomos en lugares de la red cristalina donde deberían estar.



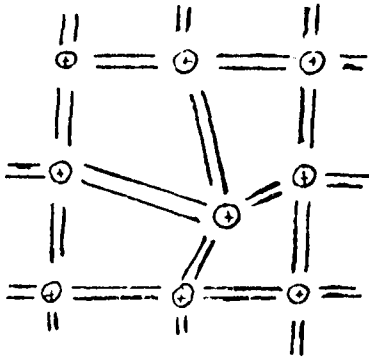
cristal perfecto



vacancia

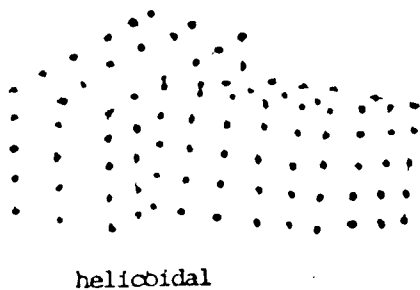
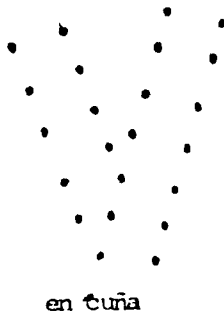
2) Defectos intersticiales o de Frenkel.

En este caso el átomo no ocupa el lugar que le correspondería en la red simétrica del cristal.

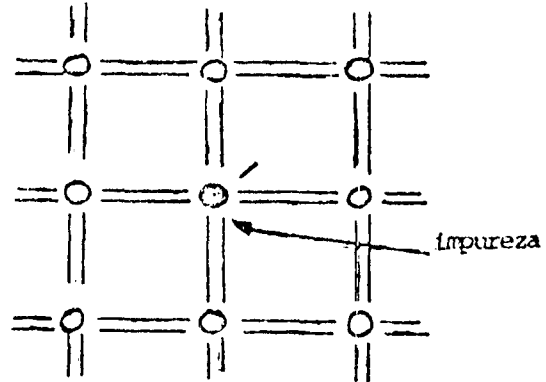


3) Dislocaciones

Existen varias como por ejemplo en cuña y helicoidal.



En este caso algunos átomos de la red básica son reemplazados por átomos extraños.



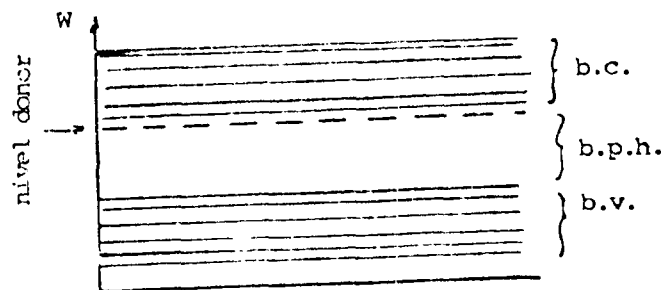
Las impurezas que interesan en semiconductores son las trivalentes llamadas impurezas aceptadoras y las pentavalentes llamadas impurezas donoras.

Todos estos defectos se traducen en la aparición de nuevos niveles de energía permitidos en la banda prohibida y además actúan como centros de generación y recombinación de portadores.

Lo que interesa desde el punto de vista de los semiconductores son las impurezas tri y pentavalentes que permiten lograr semiconductores electrónicos y en detección de radiaciones.

8.2.4.- Semiconductores tipo P y tipo N:

Si en un semiconductor intrínseco de Ge o Si se introducen deliberadamente impurezas pentavalentes, el átomo pentavalente intercambia cuatro de sus cinco electrones de valencia con los átomos vecinos del cristal básico. Los niveles de energía de los cuatro electrones intercambiados se sitúan en la bv del Ge pero el quinto electrón tiene un nivel de energía que se sitúa en la bph del Ge cerca de la bc llamado nivel donador.

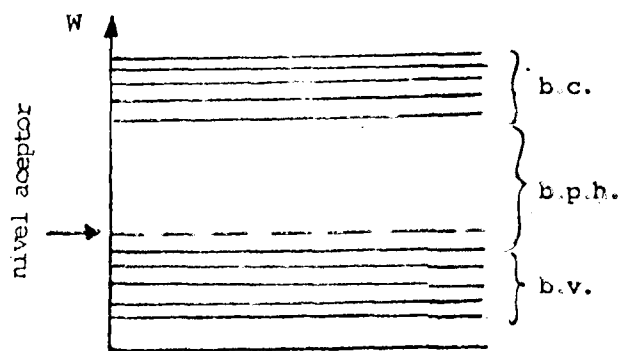


Por lo tanto con muy pequeña energía, el quinto electrón pasa a la bc y se tiene un portador libre. El átomo pentavalente queda ionizado positivamente pero no es un hueco, ya que al intercambiar cuatro electrones queda firmemente ligado a la red cristalina.

Todo ocurre como si el átomo pentavalente hubiese donado el quinto electrón y por esto se lo llama impureza donora. El dopaje es de un átomo donador por cada 10^5 a 10^7 átomos de Ge o Si. Como impurezas donoras se usan el fósforo, arsénico, antimonio y bismuto. El semiconductor así formado se denomina tipo N porque hay un exceso de portadores negativos. En efecto, en el Ge se crean los pares electrón-hueco como en el caso de un semiconductor intrínseco, pero además existen los electrones libres donados.

Los electrones libres reciben el nombre de portadores mayoritarios pues están en exceso en el material N y los huecos se denominan portadores minoritarios pues están en menor cantidad con respecto a los electrones.

Si ahora al semiconductor intrínseco se le agregan impurezas trivalentes como ser boro, aluminio, galio o indio, la impureza capta un electrón de valencia de un átomo de material base para completar los enlaces covalentes con lo que se transforma en un ión negativo fijo; pero a su vez crea un hueco por la captación anterior y debido a esto recibe el nombre de impureza aceptadora. Se tiene ahora excesos de huecos y estos son los portadores mayoritarios, siendo los electrones libres los minoritarios. Se tiene un nivel de energía permitido en la bph que se sitúa muy cerca de la bv.



El material se llama semiconductor tipo P pues existen exceso de portadores positivos. Se puede demostrar que:

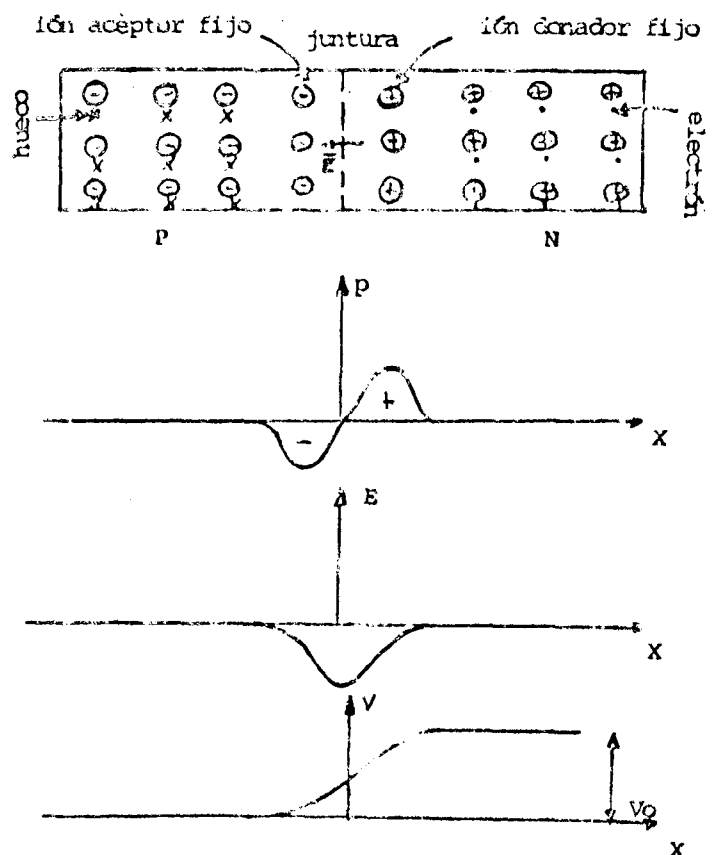
$$n_p \cdot p_p = n_i^2 = p_i^2 = n_n \cdot p_n$$

- n_p : Concentración de electrones en el semiconductor tipo P.
- p_p : Concentración de huecos en el semiconductor tipo P.
- n_i : Concentración de electrones en el semiconductor intrínseco.
- p_i : Concentración de huecos en el semiconductor intrínseco.
- n_n : Concentración de electrones en el semiconductor tipo N.
- p_n : Concentración de huecos en el semiconductor tipo N.

En un semiconductor P, los huecos son los portadores principales cuando circula una corriente y en el semiconductor N lo son los electrones.

8.3.- Juntura PN:

Si en un semiconductor inicialmente intrínseco, se introducen en un extremo impurezas donoras y en el otro impurezas aceptoras, se obtiene una juntura PN. La juntura PN suele llamarse también unión PN.



p : densidad de carga.
 E : campo eléctrico.
 v : potencial electrostático.
 X : distancia a la juntura.

Al producirse la juntura, existe inicialmente en la región P una alta concentración de huecos y en la región N una alta concentración de electrones. Por lo tanto por difusión pasan huecos de la región P a la N y electrones de la región N a la P cruzando la juntura. Los portadores dejan tras de sí a los iones fijos respectivos y por lo tanto aparece un campo eléctrico E como el indicado.

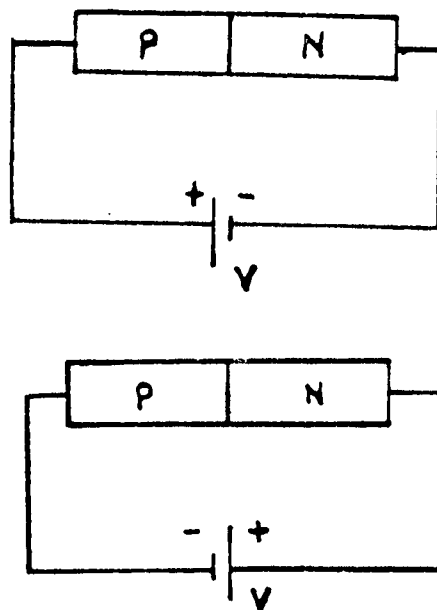
A medida que los portadores se difunden, E aumenta por lo que llegará un momento en que el campo es lo suficientemente grande como para detener la difusión de portadores. Como los huecos provenientes de la región P son minoritarios en la región N, se recombinan en ésta última región y lo mismo ocurre con los electrones que parten de la región N y llegan a la P.

Una vez detenido el proceso de difusión, queda una zona donde sólo existen iones fijos, esta zona se llama región de carga espacial o zona de deflexión. El espesor es del orden de 1μ . La densidad de carga ρ varía como se indica. Se ve que el campo eléctrico E está confinado en la región de carga espacial siendo nulo en el resto del semiconductor.

Ahora bien, los portadores minoritarios de ambas regiones son favorecidos en su movimiento por el campo E por lo que se tendrá otra corriente de sentido opuesto a la anterior (de difusión) llamada corriente de corrimiento. La corriente de corrimiento tiende a compensar la corriente de difusión por lo que en la última instancia en equilibrio la corriente total es nula.

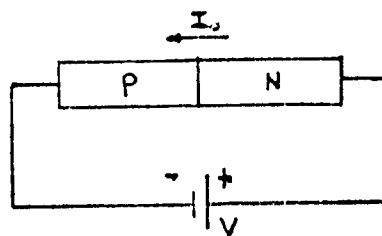
8.3.1.- Juntura PN polarizada:

Hasta ahora se trató a la juntura PN como un ente aislado es decir no inserto en un circuito eléctrico. Para usar sus propiedades convenientemente la juntura PN debe ser polarizada. Polarizar una juntura significa conectarla a una batería de las maneras que se indican:



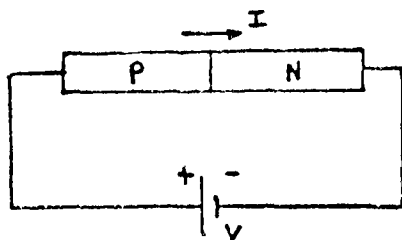
La característica eléctrica básica de la juntura PN, es que permite que la corriente circule fácilmente en un sentido y muy difícilmente en el sentido opuesto. O sea actúa como un diodo. Hay dos formas de polarizar una juntura:

1) Polarización inversa:



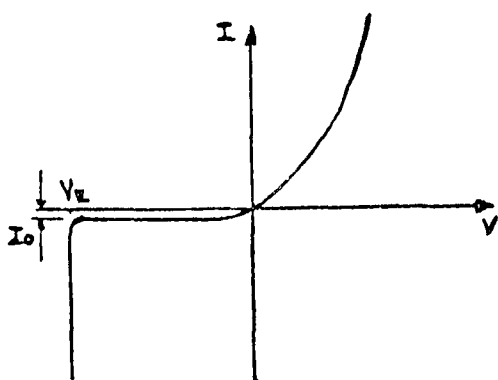
Con esta polarización, los huecos y electrones se alejan de la juntura y por lo tanto la región de carga espacial aumenta de espesor o sea sube la barrera de potencial. Por lo tanto a los portadores mayoritarios les cuesta mucho poder pasar de una zona a otra pues E es muy intenso, tanto es así que prácticamente se puede considerar que no pasan; en cambio los portadores minoritarios no tienen ningún problema en pasar pues el campo les es favorable y de esta manera se tiene una pequeña corriente I_0 llamada corriente inversa de saturación.

2) Polarización directa:



En este caso la región de carga espacial disminuye su espesor por lo que los portadores mayoritarios al disminuir el valor de E pueden pasar fácilmente de una región a la otra y se tiene así una gran corriente de mayoritarios.

En general resulta:



$$I = I_0 \left(e^{\frac{V}{V_Z}} - 1 \right)$$

Con:

$m \approx 1$ para el Ge

$n \approx 2$ para el Si

$$V_Z = \frac{T}{11.600}$$

siendo:

V_Z = tensión termodinámica

T = temperatura absoluta de la juntura

En la fórmula anterior cuando V es positiva se tienen elevadas corrientes llamadas también corrientes directas mientras que cuando V es negativa el valor de la corriente es el de corriente de saturación I_0 .

De acuerdo con la fórmula cualquiera sea el valor de la tensión negativa siempre se tendría la corriente de saturación; sin embargo se puede demostrar que llegado a cierta tensión V_Z , llamada tensión de Zener, la corriente aumenta bruscamente creciendo teóricamente sin lí-

mites. Normalmente esta situación debe ser evitada pues implica la destrucción de la juntura. En cambio existen dispositivos llamados diodos Zener que utilizan expresamente este fenómeno para lo cual obviamente deben ser diseñados apropiadamente.

Como regla nemotécnica para recordar como se efectúa la polarización directa o inversa se tiene:

1) Polarización inversa:

En este caso el positivo de la batería se debe conectar a la región tipo N y el negativo de la batería a la región tipo P.

2) Polarización directa:

En este caso el positivo de la batería se debe conectar a la región tipo P y el negativo de la batería a la región tipo N.

9.- DETECTORES SEMICONDUCTORES

En los detectores semiconductores se usa un semiconductor como medio para detectar una radiación ionizante. El uso de sólidos como medio ionizado tiene varias ventajas sobre otros tipos de medios tales como gases o centelladores que son:

1) La alta densidad del medio ionizado; esto implica una considerable eficiencia de detección por unidad de volumen efectivo del detector.

2) La energía necesaria para producir un par de portadores de carga en los semiconductores es aproximadamente 10 veces menor que en los gases y 100 veces menor que en un centellador. Por lo tanto para una misma energía transferida, la cantidad de portadores de carga producidos son mucho mayores en semiconductores que en gases o centelladores. Esto se traduce en fluctuaciones estadísticas mucho menores por lo que se tiene un mayor poder de resolución en la determinación de las energías de la radiación a detectar.

3) La movilidad de los electrones y huecos es elevada y por otra parte el volumen efectivo

del medio detector es muy pequeño; todo esto se traduce en un tiempo de recolección de cargas muy corto del orden del nano segundo, en consecuencia el poder de resolución en tiempos es elevado.

4) Pueden realizarse fácilmente detectores muy delgados de manera que absorban una muy pequeña parte de la energía de las partículas incidentes con lo que se puede medir la ionización específica, (dw/dx) .

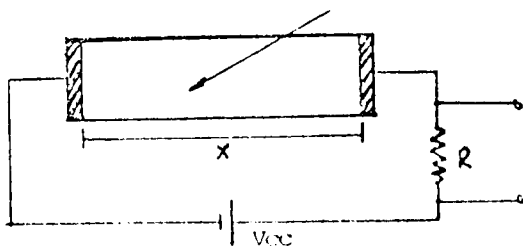
Ahora bien: para lograr estas ventajas hubo que sortear mediante técnicas apropiadas los siguientes inconvenientes:

- 1) La alta conductividad de los semiconductores en comparación con los gases. Esto se traduce en ruido que tiende a enmascarar las mediciones.
- 2) Los defectos en la estructura cristalina del semiconductor es decir las vacancias y dislocaciones. Estos defectos producen recombinaciones de los portadores y por lo tanto pérdida de algunos de ellos por lo que se restan posibilidades de detección.

En resumen: la gran ventaja de los detectores de semiconductores sobre otros tipos es su excelente poder de resolución que se puede obtener con técnicas relativamente simples. Se entiende por poder de resolución a la capacidad de un detector para diferenciar las distintas energías de las partículas incidentes de un haz dado.

9.1.- Distintos tipos de detectores semiconductores

9.1.1.- Detector homogéneo:



Se tiene un semiconductor intrínseco entre dos placas metálicas formando contactos óhmicos,

o sea contactos no rectificantes y se lo conecta a una f.e.m. y a una resistencia en serie R. Una partícula nuclear cargada al atravesar el cristal, crea abundantes pares electrón-hueco lo que se traduce en un pulso de corriente y por ende en un pulso de tensión sobre R.

La amplitud del pulso de tensión (o corriente) es proporcional a la energía perdida por la partícula en el volumen del detector, siempre y cuando toda la energía de la partícula sea entregada en el volumen del mismo. Por otra parte para que dicha proporcionalidad tenga lugar, los portadores deben ser recogidos antes de que se recombinen apreciablemente; o sea que en tiempo de recolección debe ser despreciable frente al tiempo de vida media de los portadores. Entonces:

- 1) La energía de la partícula debe ser totalmente disipada en el volumen del cristal.
- 2) El tiempo de recolección debe ser mucho menor que la vida media de los portadores.

Estas dos condiciones son antagónicas en cierto modo por las siguientes razones:

Para lograr la primera hay que aumentar las dimensiones del cristal, o sea hay que aumentar x . Esto trae aparejado el aumento del tiempo de recolección t_c pues:

$$t_c = \frac{x}{\mu \cdot E}$$

siendo E: campo eléctrico y μ la movilidad de los portadores.

Puede aumentarse μ , purificando todo lo posible al cristal y bajando su temperatura; pero esto tiene un límite. Así en Si puro a $T = 300^\circ K$, $\mu_n = 1900 \text{ cm}^2/\text{Vseg.}$ y $\mu_p = 550 \text{ cm}^2/\text{Vseg.}$

como máximo.

Si ahora se pretende aumentar L para bajar t_c aumentan las corrientes parásitas y se produce un enmascaramiento del pulso a detectar. Además se produce un calentamiento en el cristal que puede llegar a destruirlo. Para dismi-

nuir estas corrientes parásitas a valores razonables, se necesitan resistividades del orden de $10^8 \Omega \text{cm}$ u el silicio tiene $\rho \approx 2 \times 10^4 \Omega \text{cm}$.

Se ve entonces que los detectores homogéneos presentan muchos inconvenientes por lo que han sido prácticamente abandonados.

9.1.2.- Detectores de juntura (o de unión)

Están formados básicamente por una juntura PN polarizada inversamente. La zona útil de detección es la región de carga espacial. En esta zona se tiene un campo E intenso y una alta resistividad pues está exenta de portadores libres por lo que se tienen las condiciones apropiadas para la detección de una partícula cargada que atraviese dicha zona.

Una partícula ionizante que atraviese la zona de carga espacial crea pares electrón-hueco cuyos movimientos bajo la acción del campo eléctrico da lugar al pulso de corriente que permite la detección. Si la radiación incidiese sobre la zona alejada de la región de carga espacial, también crea pares electrón-hueco. Pero como el campo eléctrico en esta región es prácticamente nulo el pulso que se obtiene es despreciable.

Prácticamente toda la tensión V externa aplicada, aparece en la zona de carga espacial y puede demostrarse que el espesor x de esta zona vale:

$$x = \left(\frac{2eV}{e} \cdot \frac{N_p + N_n}{N_p \cdot N_n} \right)^{\alpha}$$

ϵ : Constante dieléctrica del cristal.

V : Tensión externa aplicada.

e : Valor absoluto de la carga del electrón.

N_p : Concentración de átomos aceptores.

N_n : Concentración de átomos donores.

α : Coeficiente de valor 1/2 para junturas abruptas y 1/3 para junturas graduales.

En la práctica uno de los bloques que forman la juntura se dopa mucho más que el otro; por ejemplo: se hace $N_n \ll N_p$, $\therefore N_p + N_n \approx N_p$ y $N_n \approx N_p$

$$x \approx \left(2 \frac{eV}{e} \cdot \frac{1}{N_n} \right)^{\alpha}$$

El campo E en la zona de carga espacial es prácticamente uniforme y vale

$$E = \frac{V}{x}$$

El espesor x varía entre decenas de micrones y uno a dos milímetros para detectores ordinarios; las tensiones exteriores son del orden de centenares de volts; el campo eléctrico es del orden de varios miles de $\left(\frac{V}{\text{cm}} \right)$ y los tiempos de recolección son de algunos nanos-segundos.

La zona de carga espacial es de alta resistividad o sea se comporta como un dieléctrico y tiene a cada lado zonas de baja resistividad o sea conductores; todo esto conforma un capacitor pero cuya capacidad no es constante pues x varía con V. Se puede demostrar que para $N_n \ll N_p$, la capacidad vale:

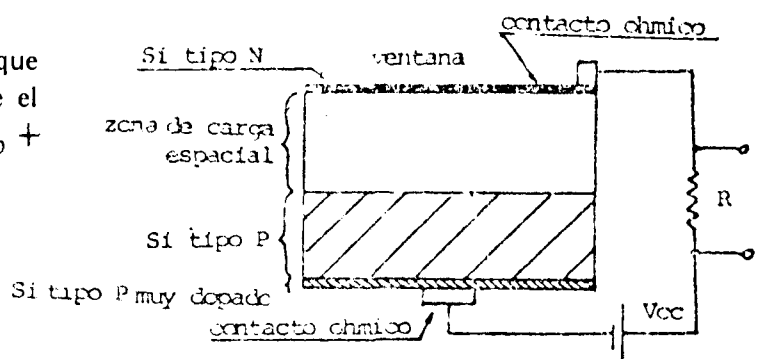
$$C_d = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\epsilon e N}{V} \right)^{\alpha} S$$

con S: superficie total de la juntura.

El hecho de que variando V se modifique x permite poner el detector en condiciones óptimas, lo que representa una gran ventaja pues permite facilitar notablemente la discriminación entre partículas de distintas clases y energías.

Por ejemplo si se desean detectar partículas α de 4 MeV. en presencia de protones, se hace a x aproximadamente igual al alcance de las partículas alfa en el medio semiconductor, variando V convenientemente; bajo estas condiciones, la relación entre las amplitudes de los pulsos de las partículas alfa y de los protones es máxima con lo que se tiene una buena discriminación.

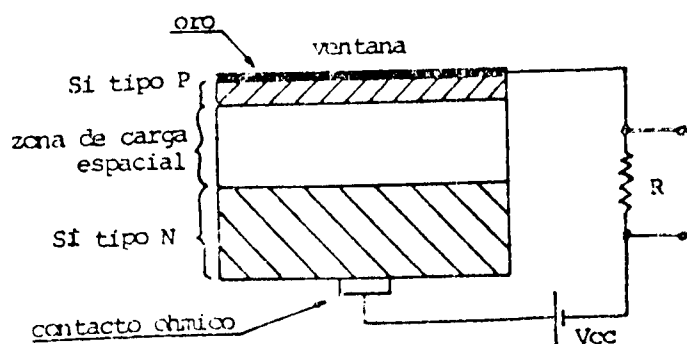
9.1.2.1.- Detectores de unión difusa:



Para obtener estos detectores se parte de una lámina de silicio tipo p moderadamente contaminada. Mediante evaporación al vacío se obtiene sobre una de sus caras una capa de aluminio y luego por difusión a temperaturas de 700°C se logra una capa P fuertemente contaminada que proporciona un buen contacto para el electrodo de base del detector.

Por la otra cara, se difunde fósforo a 100°C y se forma una capa N también intensamente contaminada para lograr un espesor fino del orden de 0,5 a 0,8 μ . Debe ser delgada pues la capa N es la ventana por la cual penetra la radiación y por ende, las partículas no deben perder prácticamente energía en esta capa.

9.1.2.2.- Detectores de barrera de superficie:



En este caso se parte de un disco de material tipo N y por acción de un agente oxidante que actúa sobre la superficie del material a temperatura ambiente, se crea una delgada capa tipo P altamente dopada. Se logra así una zona de carga especial extendida prácticamente en la zona tipo N.

Una vez formada la barrera de superficie tipo P, se deposita sobre ella una finísima capa de oro mediante evaporación al vacío.

Se logra así un contacto óhmico y simultáneamente una ventana muy fina de 2 a 3 centésimas de μ de espesor.

Sobre el material tipo N se hace el otro contacto óhmico con aluminio también evaporado al vacío.

Los detectores de barrera de superficie tienen mayor poder de resolución que los unión difusa pero son más ruidosos y frágiles; además la técnica para construirlos es más sencilla que la usada para los unión difusa, pues

se evitan los inconvenientes propios de las altas temperaturas involucrados en los procesos de difusión.

9.1.2.3.- Detectores compensados con litio:

El ancho de la zona de carga espacial en los detectores de unión difusa y de barrera de superficie, (y por tanto el volumen de detección) está limitado por la resistividad del material base (Germanio o Silicio) y por la máxima tensión de polarización inversa que se puede aplicar sin producir la ruptura.

La resistividad del Germanio (o Silicio) depende del grado de pureza con que puede ser obtenido el material; éste grado está limitado por razones tecnológicas; así por ejemplo la resistividad máxima que se ha podido lograr para el Silicio temperatura ambiente es del orden de $10^4 \Omega\text{cm}$. Si se pudiese aumentar la resistividad de los semiconductores, sería posible a su vez aumentar el ancho de la región de carga espacial y por ende el volumen de detección; de esta forma pueden ser detectadas radiaciones (rayos x y gamma) que no lo son con detectores de unión difusa o de barrera de superficie.

El método de la compensación con Litio permite aumentar la resistividad en la región de la juntura y por ende su espesor, con lo que el volumen de detección aumenta.

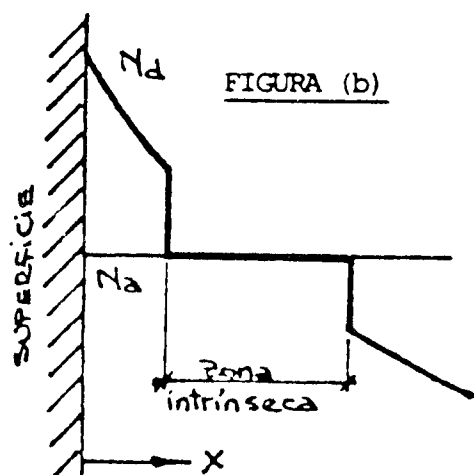
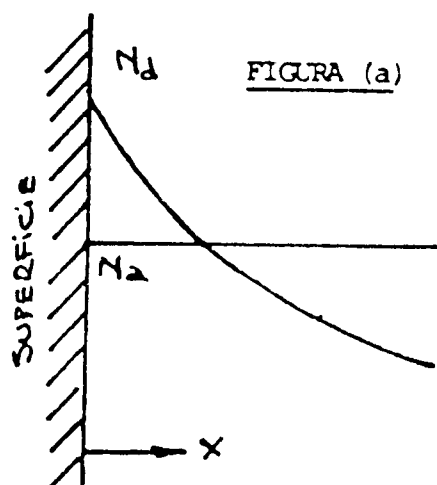
Este método consta de lo siguiente: se parte de un Germanio (o Silicio) tipo P y se lo contamina con una impureza opuesta a la del material base; como la impureza del material P es aceptora se debe usar una impureza donora. Se elige al Litio por las siguientes razones:

- 1) Su potencial de ionización es muy reducido (0,33 eV) por lo que se ioniza fácilmente con débil aporte de energía térmica, comportándose así como una impureza donora.
- 2) Los iones de Litio se difunden muy fácilmente en el Germanio (o Silicio) con lo que se puede obtener grandes espesores de Germanio (o Silicio) compensado.

Entonces para obtener Germanio (o Silicio) compensado se forma inicialmente una juntura PN por difusión de Litio en Germanio (o Silicio) tipo P. Después se hacen emigrar los iones de Litio a través de Germanio (o Silicio) polarizando en sentido inverso la juntura PN y elevando su temperatura. De ésta forma el Litio ocupa posiciones intersticiales en la malla cristalina del material base (Germanio o Silicio) produciendo la compensación y haciendo así aparecer una zona de alta resistividad.

El dispositivo formado de esta manera se llama detector N—I—P (o sea una zona N, otra intrínseca y otra P).

En la zona intrínseca la resistividad es del orden de $10^5 \Omega \text{ cm}$. El proceso se puede visualizar así:



N_d : concentración de iones de Litio en función de la profundidad X en un cristal de Germanio (o Silicio)

N_a : concentración de impurezas reductoras.

La figura (a) muestra la concentración de iones de Litio después de la difusión a través de la superficie del cristal.

La figura (b) muestra la concentración N_d después de la migración de los iones de Litio. Se advierte en ésta última figura la formación de la zona intrínseca por la compensación aludida.

Por el proceso indicado, se han podido hacer detectores N—I—P con espesores de la zona de carga espacial de uno 10 mm y volúmenes de detección de unos 120 cm³.

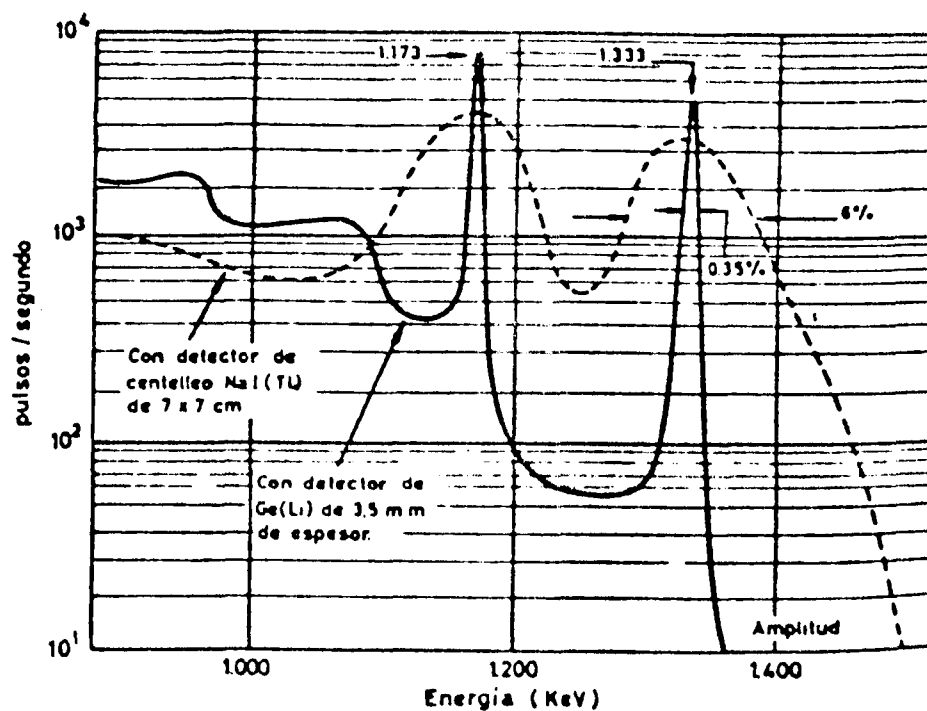
Como semiconductores básicos se pueden emplear el Germanio o el Silicio obteniéndose así detectores de Germanio compensados con Litio, identificados comercialmente con el símbolo Ge (Li), y detectores de Silicio compensado con Litio, identificados comercialmente con el símbolo Si (Li). Los detectores de Si (Li) se emplean en algunos casos para la detección de electrones y partículas pesadas muy energéticas tales como protones y partículas alfa. Sin embargo su campo de aplicación fundamental es la espectrometría X. En cambio los Ge (Li) se aplican básicamente en espectrometría gamma.

Los Si (Li) no son adecuados para espectrometría gamma debido al bajo número atómico del Silicio con respecto al del Germanio, lo que hace que los coeficientes de absorción para efecto fotoeléctrico, Compton y formación de pares sean bastante menores (de algunas unidades hasta decenas) para el Germanio respecto del Silicio.

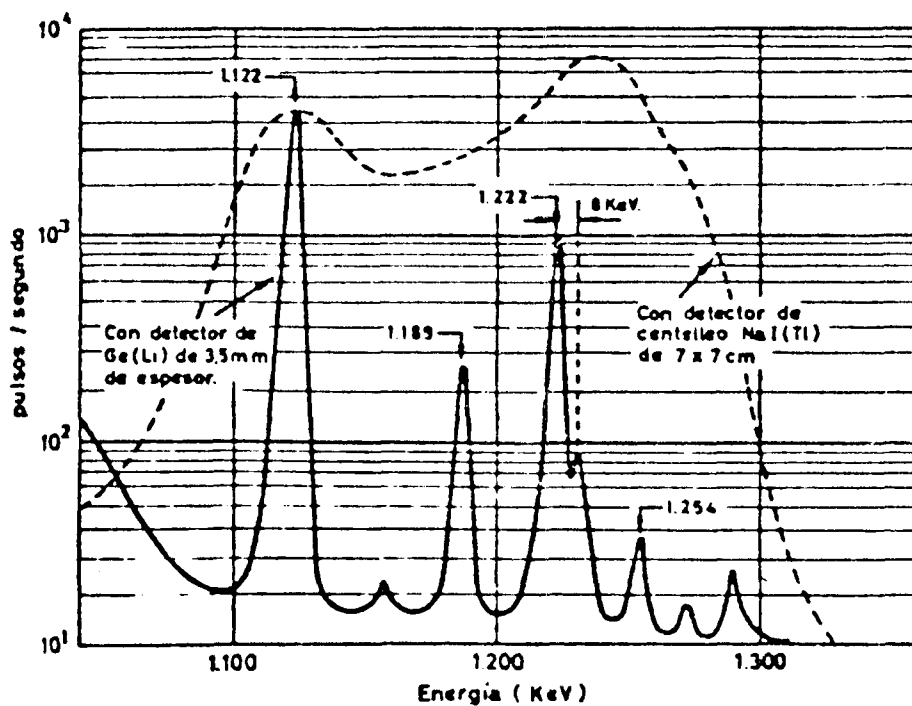
Todo esto se traduce en la menor eficiencia de los Si (Li) respecto de los Ge (Li) para la radiación gamma.

Las resoluciones que se logran con los Si (Li) o Ge (Li) son notables con respecto a otros tipos de detectores.

Así por ejemplo en las siguientes figuras se comparan los espectros de una muestra de Co^{60} y Ta^{182} obtenidos con Ge (Li) y un detector de centelleo.



Espectros gamma de una muestra de Co^{60} obtenidos con un detector de Germanio compensado y con un detector de centileo



Espectros gamma de una misma muestra de Ta^{182} obtenidos con un detector de germanio compensado y con un detector de centileo.

Las características fundamentales del Ge (Li) usado se dan en la tabla siguiente:

Características fundamentales de un detector p-i-n de Germanio, de 2 cm de diámetro y con zona de carga de espesor de 3,5 mm de espesor

Energía de radiación (KeV)	Eficiencia intrínseca para el fotopico	Resolución obtenida (KeV) ¹	Resolución teórica $2,35 \sqrt{W}$ (KeV)
122	35%	3,3	1,38
661	0,7 %	4,3	3,2
1.333	0,16%	5	4,5
3.918	0,35%	7,8	6,8
7.639	0,20%	9,8	10,2

¹ La resolución se expresa, como es costumbre, por la anchura del pico a mitad de su altura.

El detector de centelleo utilizado está equipado con un buen cristal de I Na (TI) de 7 x 7 cm.

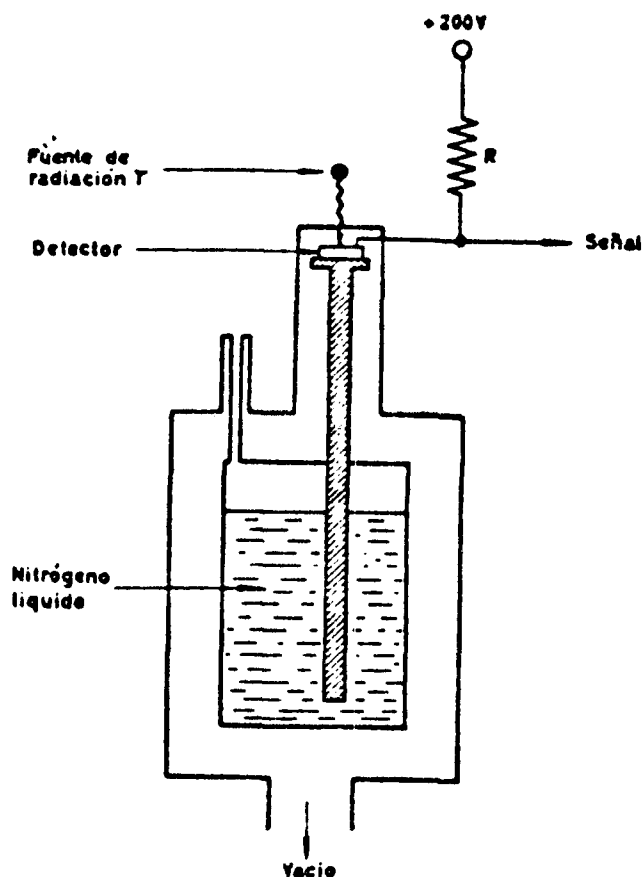
Se observa la notable resolución del Ge (Li) respecto al centellador.

La resolución de los detectores semiconductores es la ventaja fundamental que presentan respecto a otros tipos de detectores.

Tanto los Ge (Li) como los Si (Li) deben ser operados a temperaturas criogénicas (se usa comúnmente el Nitrógeno líquido, 77°K) para disminuir el ruido y aumentar la velocidad de respuesta.

También deben ser almacenados a temperaturas criogénicas y en el vacío o en atmósfera inerte, para evitar la redistribución de los iones de Litio y por lo tanto la destrucción del detector.

El esquema general para mantener los Ge (Li) a bajas temperaturas es como sigue:



Esquema del montaje de un detector n-i-p de germanio a la temperatura del nitrógeno líquido y en vacío para la espectrometría de radiación gamma