

Detectores de Silicio del *SCT* de ATLAS

Carlos Escobar Ibáñez*

2 de julio de 2004

*IFIC / Universidad de València

Índice General

1	Detectores de Trazas de Silicio	3
1.1	Introducción	3
1.2	Utilidad en altas energías	3
1.3	Principio Operacional	4
1.4	Acoplamiento capacitivo (AC) y directo (DC)	5
1.5	Técnicas de Fabricación	7
1.5.1	Obtención y crecimiento del silicio	7
1.5.2	Construcción de los detectores	9
1.6	Parámetros de los detectores de trazas de Silicio	11
1.7	Resolución espacial	11
1.7.1	Espacio entre bandas	11
1.7.2	Difusión de portadores durante la deriva	13
1.7.3	Fluctuaciones de la pérdida de energía	13
1.7.4	Ruido	13
1.7.5	Efectos de la radiación sobre los detectores	15
1.7.6	Efectos del campo magnético	16
1.8	Módulos del <i>SCT</i> de ATLAS	17
1.8.1	Descripción de los detectores de trazas de Silicio de ATLAS	17
2	Bibliografía	20

1 Detectores de Trazas de Silicio

1.1 Introducción

Este trabajo pretende exponer el funcionamiento, la fabricación y las características de los detectores de trazas, en particular, los de silicio, centrandose en los detectores diseñados para el *SCT*. Durante el curso de *Instrumentación Nuclear* del *DEA* y en general, durante la carrera se ha cubierto la teoría de semiconductores y de estado sólido. Por este motivo el presente trabajo se centrará en los detectores directamente.

Empezando con un poco de historia, el primer detector de trazas que fue operativo se construyó en la década de los 70, para el estudio de partículas de vida media-corta en interacciones hadrónicas de alta energía. Fue en aquella época cuando se descubrió el leptón τ y partículas con *quarks* c y b . Fue construido por el grupo *CERN-MUNICH*. Desde ese momento se descubrió el gran potencial que tenían este tipo de detectores para los experimentos de altas energías.

1.2 Utilidad en altas energías

Desde la aparición del transistor en 1945 de la mano de un grupo de científicos de los *laboratorios Bell*¹, la electrónica y la física de semiconductores ha sufrido una revolución tremenda. A partir de ese momento una nueva y prometedora rama de la Física nacía, era la *Física de Semiconductores* y/o de *Estado Sólido*. Todo esto ha permitido la creación de circuitos impresos y la miniaturización de los componentes electrónicos. Hoy en día los semiconductores son los materiales más usados en electrónica.

Los detectores de trazas de silicio son una parte importante del detector ATLAS. Su papel es el de reconstruir las trazas de los sucesos. No obstante, no es en ATLAS donde se van a usar por primera vez. Este tipo de detectores tiene un largo *curriculum* ya que se han utilizado en experimentos como ALEPH, DELPHI, L3 y OPAL en LEP, CDF en Tevatron, etc... y se utilizan en ATLAS, CMS, LCHb en LCH, en AMS, en GLAST, en Babar, etc.

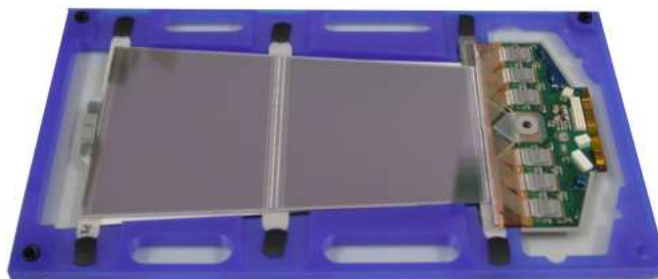


Figura 1: Ejemplo de un módulo con detectores de silicio construido en Valencia para el SCT de ATLAS

Las Física de partículas requiere de una gran resolución en la reconstrucción de trazas pero sin sacrificar otros aspectos importantes como por ejemplo no modificar el momento o la energía de la partícula, es decir, perturbando lo menos posible aquella magnitud que se mide. Las mediciones de interés en los experimentos de altas energías son el momento de la traza, su dirección y la posición del vértice para poder reconstruir vértices secundarios. Todas estas cantidades se modifican al interactuar con la materia (ionización, *bremstrahlung*, dispersión de *Coulomb*, etc), con lo cual cuando menos material mejor. La tecnología que nos permite hacer esto es la que tenemos gracias a los semiconductores. Un detector completamente construido de silicio

¹El equipo investigador de los laboratorios Bell estaba formado por 3 físicos John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley, siendo los dos primeros los que investigaban las propiedades de los semiconductores y el último un especialista en Física del Estado Sólido

nos daría los mejores resultados posibles con la presente tecnología. Por el momento esto es inviable por cuestiones económicas. Sin embargo, se está estudiando dicho terreno en el que detector y electrónica de lectura están integrados².

De todas formas debido al alto coste de los detectores de trazas de silicio actuales su utilización se restringe a las zonas donde es más necesaria una alta resolución espacial, es decir, cerca del punto de interacción.

1.3 Principio Operacional

Los detectores de silicio, como se dijo anteriormente, son un invento relativamente moderno, pero sin embargo se utilizan en todos los sitios desde que se tienen. Las razones por las cuales son tan usados son las siguientes:

- La energía necesaria para la creación de un par electrón-hueco es de 3.6 eV, es decir, un orden de magnitud por debajo de la energía necesaria para ionizar un gas (aprox. 30 eV). Con lo cual la partícula pierde 10 veces menos de energía para producir el mismo efecto.
- La alta densidad del silicio ($\rho = 2.33 \text{ g cm}^{-3}$) hace que la pérdida de energía por unidad de longitud sea muy grande, siendo posible la construcción de detectores muy delgados pudiendo obtener señal útil.
- A pesar de la alta densidad, los electrones y los huecos pueden moverse cuasi libremente en el semiconductor y de forma rápida, pudiéndose recoger la carga en menos de 20 ns. Esto nos dice que este tipo de detectores es muy rápido, cosa muy a su favor.
- Se puede integrar la electrónica con el material del detector lo que, además de ahorro en espacio, representa un ahorro en costes.

Los detectores de trazas de silicio se basan en las propiedades de los diodos polarizados inversamente. En una unión PN en polarización inversa se crea una zona desertizada o zona de depleción de portadores de carga libres. El paso de una partícula cargada por esta zona crea pares electrón-hueco ($e^- - h^+$) por ionización del material. Las cargas creadas se mueven en el campo eléctrico de la unión del diodo produciendo una corriente. Esta corriente creada será la señal que detectaremos en la electrónica de lectura. Esta señal será proporcional a la energía depositada por la partícula. Si aumentamos la anchura de la zona desertizada, incrementando el potencial de polarización, se crearán más pares electrón-hueco y la señal recogida será mayor.

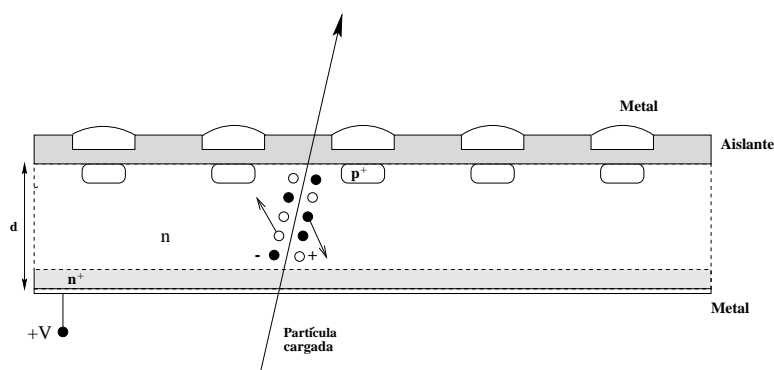


Figura 2: Paso de una partícula a través de un detector $p + n$ completamente desertizado.

²Puede que el grupo de *SCT* empiece a trabajar con estas ideas en próximos años

Para poder utilizar los diodos como detectores de trazas se construyen dispositivos que básicamente siguen el esquema de la figura 2. En la figura tenemos una oblea de material semiconductor tipo N (substrato), donde se han introducido zonas altamente dopadas de tipo P (implante). Sobre las zonas muy dopadas de tipo P se coloca un aislante, normalmente óxido de silicio (SiO_2), que tiene como función proteger la oblea. Encima del aislante y en la vertical del implante, se coloca un metal (Al en el caso de las obleas para los módulos del *SCT*) que es donde se recoge la carga y se realiza la conexión con la electrónica de lectura. De esta forma obtenemos uniones PN separadas una cierta distancia unas de otras.

El tener uniones PN separadas una cierta distancia es útil si lo que se quiere medir es la posición del paso de la partícula. Dividiendo el detector en bandas paralelas y polarizando cada banda inversamente se obtiene el efecto deseado. El paso de una partícula crea pares electrón-hueco, con el detector completamente desertizado, los huecos derivarán bajo la acción del campo hacia las bandas p^+ más cercanas, moviéndose los electrones en sentido contrario, hacia abajo en del detector de la figura. La carga que llega a las bandas p^+ genera una señal que deberá ser leída por la electrónica. La señal recogida en las bandas metálicas nos permite conocer el punto de paso de la partícula. En la figura 2 se ha dibujado un detector $p+n$. Esto significa que la zona de las bandas es altamente dopada de tipo P y el substrato es tipo N. También se tienen detectores de microbandas $n+n$ (bandas altamente dopadas de tipo N y el sustrato tipo N menos dopado). Se verá que la separación entre las bandas del implante nos marca la resolución del detector y la densidad del medio también influye. Por tener una alta densidad los electrones secundarios tendrán un corto alcance, cosa muy útil para la recolección de la carga.

En las bandas del implante tendremos siempre una corriente debida a las características de la unión PN polarizada en inversa. Para un detector de trazas esta corriente recibe el nombre de *corriente de fugas*.

En la figura 2 hemos considerado el detector completamente desertizado, por lo que las cargas podrán moverse libremente a lo largo del detector. El voltaje de desertización de un detector de este tipo viene dado por la expresión 1:

$$V_d = \frac{q}{2\epsilon_s} N_D d^2 = \frac{d^2}{2\epsilon\mu_e\rho} \quad (1)$$

Se ha considerado un detector $p+n$, como el de la figura 2, o lo que es lo mismo una unión PN con la concentración de aceptores N_A mucho mayor que la de dadores N_D . Para los detectores de trazas $n+n$, sustituiríamos N_D por N_A . ρ es la resistividad de la zona menos dopada de la unión. Como se ve de la expresión 1 para una misma anchura del detector d , la resistividad es inversamente proporcional al voltaje de desertización.

En la figura 3 hay un esquema eléctrico de un detector de trazas $p+n$. R_{bias} es la resistencia de alimentación. C_{inter} y R_{inter} son la capacidad y resistencia entre las bandas metálicas, respectivamente. C_a es la capacidad de acoplo.

1.4 Acoplamiento capacitivo (AC) y directo (DC)

La forma más directa de recoger la señal generada por el paso de la partícula a través de un detector de silicio es mediante la colocación de un preamplificador conectado a la banda metálica, situadas sobre las bandas de difusión del detector. Pero una situación de este tipo podría causar daños si se introduce la corriente de fugas a través del implante a la banda metálica y de esta a la electrónica de lectura. La colocación de un condensador de acoplo entre la banda del implante y el preamplificador se hace entonces necesario.

Dicho condensador nos define dos tipos de detectores que corresponde con dos formas de ponerlo. Los detectores de acoplo capacitivo (AC), figura 4(a), integran la capacidad de acoplo en la estructura del detector, entre la banda del implante y la del metal. Esto se hace separando la banda del implante de la banda de metal con una capa aislante, obtenemos así una capacidad, C_a en la figura 3, que será dependiente del aislante y nos permitirá conectar directamente el preamplificador. Por el contrario, los detectores de

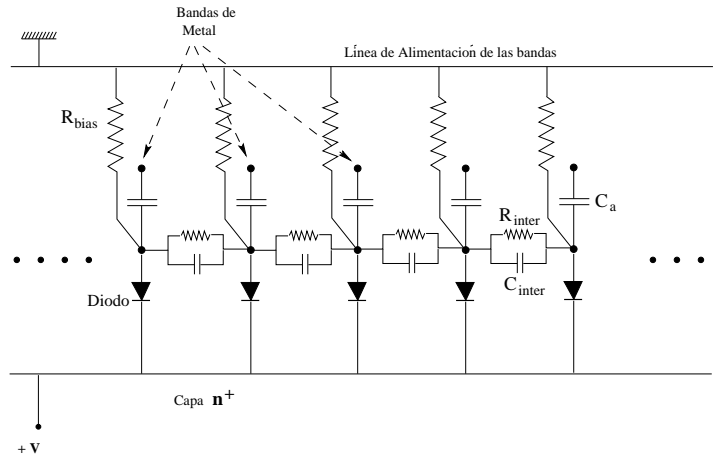


Figura 3: Esquema eléctrico de un detector $p+n$ con sus elementos principales

acoplo directo (DC), figura 4(b), son aquellos en que el condensador es externo al detector, se coloca el condensador entre la banda metálica de lectura y el preamplificador, el cual actúa como un circuito abierto para la corriente continua de fugas y cerrado para la señal alterna producida por la carga generada por la partícula.

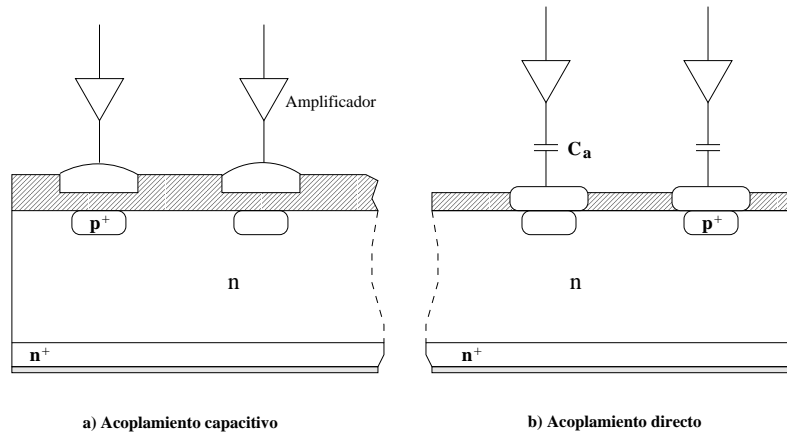


Figura 4: Tipos de acoplamiento de un detector con la electrónica de lectura

El acoplamiento capacitivo (AC) tiene la ventaja de que se tiene una estructura más compacta que con el acoplamiento directo, siendo más fácil su utilización cuando se tiene poco espacio disponible, cosa que ocurre en los experimentos de partículas, donde el sistema de detección de trazas está en las capas más internas del detector. Este tipo de detectores tienen los condensadores de acoplo integrados. La técnica para conseguir esto consiste en crear condensadores de acoplo separando las bandas de difusión de las metálicas a través de una capa de aislante. El SiO_2 es el material usado (el más común) para realizar las funciones de aislante. También se utiliza para la pasivación de los detectores. La permitividad eléctrica del éste es de $0.34 pF/cm$. Para una anchura de la banda de implante de $16 \mu m$ y para la capacidad de acoplo C_a de alrededor de $20 pF/cm$, la capa de SiO_2 debe tener un espesor menor de $270nm$, que es perfectamente compatible con un detector delgado. Una capacidad de acoplo alrededor de $20 pF/cm$ es suficientemente alta comparada con la capacidad entre bandas, C_{inter} en la figura 3, que tiene un valor que ronda $1.0 pF/cm$.

Una capacidad entre bandas de este valor (alrededor de 1.0 pF/cm) nos permite leer la señal de cada una de las bandas de forma independiente, evitando acoplos entre bandas.

Como las bandas de difusión no están directamente conectadas a la electrónica, sino que existe una capacidad se utilizan unas resistencias de polisilicio (silicio en estado amorfo) integradas en el detector para para aplicar el voltaje de alimentación inverso continuo a las bandas. En la figura ?? se pueden ver las resistencias de alimentación en un detector de bandas de silicio *Hamamatsu* que montan los módulos producidos en València para el *SCT* de ATLAS y en la figura 5 se pueden ver estas resistencias con algo más de detalle en un detector de otro fabricante.

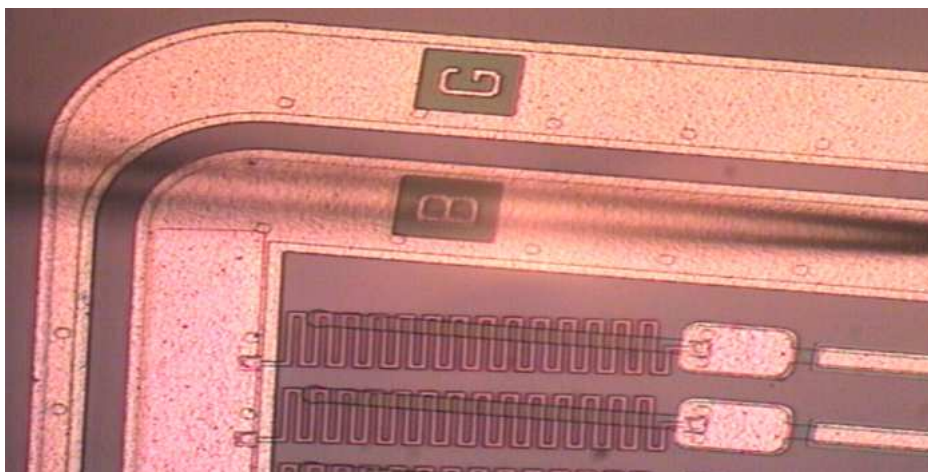


Figura 5: Detalle de las resistencias de alimentación

Todo esto es para detectores de una sola cara. Así podemos obtener la posición de un sólo punto. Pero cuando lo que interesa es leer dos coordenadas del punto del impacto de la traza de una partícula tenemos dos opciones. Podemos simplemente pegar dos detectores con bandas en una única cara, por el plano posterior (opción usada en los módulos del *SCT*) o utilizar un detector de doble cara.

1.5 Técnicas de Fabricación

La teoría de semiconductores es conocida e incluso puede que sean conocidos otros aspectos como los principios operacionales de los detectores basados en semiconductores, pero una cosa que no es tan conocida es la técnica de fabricación de las uniones y en general de los detectores de estado sólido. Existen diversas técnicas pero nos centraremos en las más usadas para la construcción y crecimiento de obleas de silicio con uniones PN. Estas técnicas permite construir los detectores que iran montados en los módulos del *SCT*, por ejemplo.

1.5.1 Obtención y crecimiento del silicio

El primer requisito para crecer las obleas de silicio es la obtención de silicio muy puro, cosa no extremadamente difícil hoy en día. El silicio es un material que se encuentra en abundancia en la corteza terrestre, de hecho es el segundo elemento más abundante (el primero es el oxígeno). Por ejemplo, el cuarzo o la arena de playa lo contienen y es de donde podemos sacar más fácilmente el silicio.

Centrándonos en el cuarzo (ya que la arena tiene demasiadas impurezas), se mezcla éste con material que contenga carbono, normalmente carbón y madera (materiales muy abundantes). Esta mezcla se calienta

hasta temperaturas alrededor de los 1780°C . A estas temperaturas se produce la reacción:



Con esto se consigue silicio con un 99% de pureza. Hasta aquí la cosa no parece muy difícil, ya que a partir de materiales bastante cotidianos y un gran horno tenemos un buen silicio, sin embargo necesitamos mucha más pureza. El siguiente paso es la exposición al HCl gaseoso. Éste se combina con el Si y se forma un líquido con un punto de ebullición a 31.7°C . Las impurezas que aun contiene el material tienen puntos de ebullición menores, separándose del líquido al calentarse éste. Como se ve la idea también es simple. Posteriormente se separa el Si del H y del Cl . Con este paso obtenemos un sólido compuesto por cristales de dimensiones menores que una micra, con orientaciones aleatorias y con una impureza cada 10^9 átomos de silicio.

Una vez hemos obtenido el silicio de la pureza requerida es necesario obtener un cristal con una determinada orientación. Para ello se aplica alguno de los dos métodos de crecimiento siguientes:

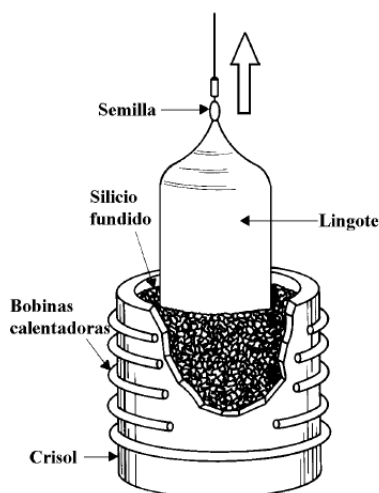


Figura 6: Método *Czochralski* para crecimiento de cristales de silicio puro

- El método *Czochralski* de crecimiento o *Pulling*. El esquema del proceso lo podemos ver en la figura 6. El método consiste en la formación de un cristal en forma de varilla de material muy puro, por contacto con un baño de mezcla en un crisol. Para obtener el cristal primero se funde el silicio (a temperaturas superiores de 1417°C). A continuación, se añade la cantidad precisa de dopante (impurezas), que dependerá del tipo de dopaje que se busque. Se introduce entonces la semilla de cristalización (un trozo de cristal perfecto) dentro del material fundido. Se hace girar y ascender lentamente, a medida que se vaya enfriando el silicio sobre su superficie irá cristalizando con la misma orientación que la semilla. Así, se obtiene un monocristal en forma de barra. Se utiliza un atmósfera oxidante. Esto es un proceso bastante curioso. Se obtiene así una barra de cristal de la que se obtendrán las obleas, que se utilizan en la construcción de dispositivos. Con este método se obtienen lingotes cilíndricos de Si de diámetros entre 10 y 15 cm, a una velocidad de 10 cm/hora y de longitud del orden de decenas de cm.
- El método de *Zona Flotante* o *FZ*. Este es el más utilizado para la fabricación de silicio para aplicaciones donde como es el caso de los detectores de partículas, se necesita una resistividad muy alta y uniforme. Además se obtiene un silicio más puro debido a que no se contamina en el crisol. Se posiciona una barra de polisilicio en contacto con una semilla de gran pureza y cristalización deseada. La barra

está sobre la semilla, y ligeramente en contacto con ésta. Una bobina induce un campo magnético, calentando la barra y fundiendo la interface entre la semilla y el material. A medida que se desplaza la bobina alejándose de la semilla, el silicio solidifica con la misma estructura de la semilla. Se consigue así que vaya creciendo con la orientación de la semilla, pasando el silicio de la barra hacia la semilla. Este método también es curioso.

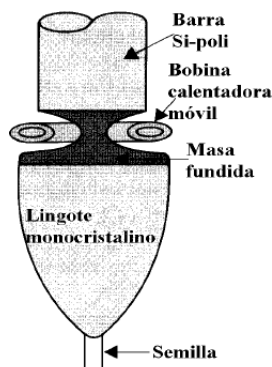


Figura 7: Método *FZ* para crecimiento de cristales de silicio ultrapuro

1.5.2 Construcción de los detectores

Una vez tenemos el sustrato con una determinada orientación y pureza el paso siguiente es el corte en obleas. Después la construcción de los diodos mediante la unión de silicio con diferentes dopajes. Hay diferentes formas de realizar las uniones, a continuación se exponen algunas:

- Crecimiento Epitaxial

Se calienta el sustrato entre 1050°C y 1300°C y se introduce en una corriente de gas de tetracloruro de silicio (SiCl_4) e hidrógeno y clorosilano SiHCl_3 e hidrógeno. El silicio se va depositando en la oblea, si al gas se le han añadido las impurezas adecuadas. Se consigue entonces una capa p o n sobre el sustrato anterior. El crecimiento epitaxial nos crea uniones abruptas PN.

Las reacciones que resuelven este procedimiento son:



- Difusión

Las impurezas son introducidas, directamente por difusión, las uniones que conseguimos no serán, como si lo hacia el método anterior, uniones abruptas sino que obtendremos un gradiente en el número de impurezas siendo mayor la concentración en la superficie. Se introduce el cristal en una atmósfera formada por el elemento que queramos difundir y un gas inerte, la concentración obtenida dependerá del tiempo de exposición. Un ejemplo de creación de esta forma es el SiO_2 que es utilizado como protector (pasivador) en multitud de dispositivos por sus propiedades impermeabilizantes a la humedad y a otros contaminantes. Esta técnica es utilizable en un margen amplio de frecuencias en el proceso de fabricación, lo que favorece

la capacidad de potencia. Se subdivide en los de difusión única (hometaxial), doble difusión, doble difusión planar y triple difusión planar. No se entrará en profundidad en cada uno de ellos.

- Implantación de iones

Se introducen las impurezas bombardeando el material para lo cual, se aceleran los iones entre 1 y 300 KeV , dependiendo de la profundidad donde queramos introducirlos y se barre entonces toda la zona a la que se quiere modificar el dopaje.

- Fotolitografía

La fotolitografía es el procedimiento mediante el cual se controla la geometría de las uniones que se realizan en los dispositivos. El primer paso para obtener el diseño deseado para un dispositivo es la oxidación de la oblea, con lo que logramos una capa de SiO_2 que protege el silicio. A partir de aquí empieza el proceso de revelado. Se reviste el SiO_2 con una capa fotoresistente, impermeable al ácido pero sensible a la luz ultravioleta. La elección de las zonas que van a ser reveladas se realiza mediante la utilización de máscaras. Se expone a través de la máscara la oblea a luz ultravioleta, y se limpia la parte que no ha sido expuesta, quedando al descubierto el SiO_2 . Se aplica sobre estas zonas un ácido hidrofluórico que no ataca el Si y si lo hace con el SiO_2 . A continuación se aplica alguno de los procesos anteriores creando zonas dopadas de forma diferente a la del sustrato y por último se retira el revestimiento fotosensible. En la figura 8 podemos ver el proceso completo de fabricación de una oblea de silicio.

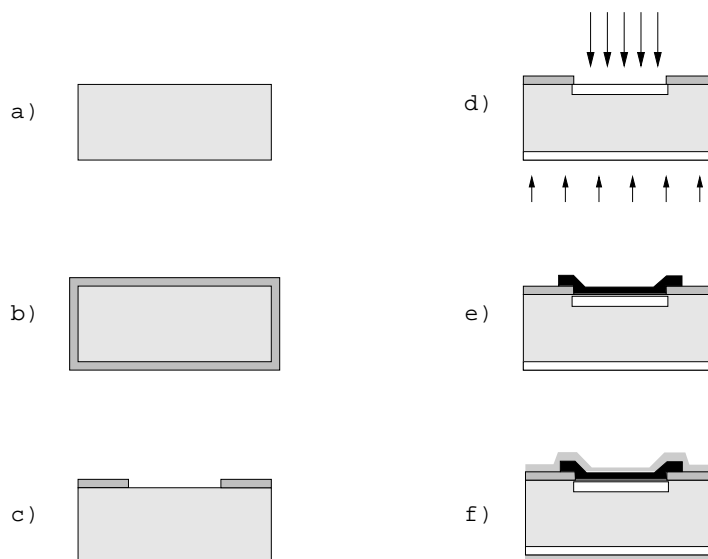


Figura 8: a) Substrato de silicio de tipo n, b) oxidación del sustrato creando una capa de SiO_2 , c) apertura de ventanas, d) implantación de dopantes a través de las ventanas, e) deposición de la capa de aluminio, f) pasivación con SiO_2 de toda la oblea.

1.6 Parámetros de los detectores de trazas de Silicio

Conocer los parámetros que definen este tipo de detectores es básico para poder utilizarlos. Algunos de estos parámetros (los más relevantes) se comentan a continuación y son parámetros como: la resolución espacial, el ruido, el efecto de la radiación en el detector y la influencia del campo magnético sobre la medida de la posición de la partícula. En realidad lo que se espera de este tipo de detectores es que tengan una buena resolución espacial ya que se utilizan básicamente para *tracking* y para reconstrucción de vértices secundarios. Es por eso por lo que se pueden englobar todos los parámetros en el estudio de la resolución espacial.

1.7 Resolución espacial

La resolución espacial se define como la desviación estándar de la diferencia entre posición de paso de la partícula y la que realmente mide el detector cuando dicha partícula está en el mínimo de ionización (mip) e incide perpendicularmente a la superficie del detector. Para tener un detector con buena resolución espacial es necesario tener en cuenta los factores de que depende ésta. Fundamentalmente tenemos la siguiente agrupación.

- Parámetros externos
 - Espaciado entre bandas
 - Ruido
 - Efectos de un campo magnético
- Procesos físicos
 - Fluctuaciones de la pérdida de energía
 - Difusión de portadores durante la deriva

La optimización de estos parámetros del detector consigue aumentar la resolución espacial del mismo llegando a resoluciones de alrededor de micras. La mayor resolución que se ha conseguido es de $\sigma = 1.4\mu m$ con un detector de $300\mu m$ de espesor y con un espaciado entre bandas de $25\mu m$.

1.7.1 Espacio entre bandas

Es lógico pensar que cuanto mayor sea la distancia de separación, o *pitch*, entre bandas menor será la resolución que obtendremos al recoger la señal. Se verá que esto no es del todo así debido a que en el silicio no se produce multiplicación de carga y la relación señal-ruido no sería suficientemente buena en todas las bandas.

La anchura a media altura, *FWHM*, de la distribución de carga es de unas $10\mu m$, por lo tanto para tener señal en varias bandas (siempre que la incidencia sea perpendicular), el *pitch* debería ser inferior. En los detectores del *SCT* el *pitch* es de $20\mu m$. La resolución espacial viene dada por $\sigma = pitch/\sqrt{12}$ para una distribución de partículas incidentes uniforme. No obstante, si se tienen varias bandas se puede llegar a mayor precisión mediante algunos algoritmos siempre y cuando la lectura sea analógica.

Como se ha comentado, la resolución espacial también dependerá del sistema de lectura utilizado. Se comentará brevemente los dos tipos existentes, la lectura analógica y la lectura digital.

- Lectura analógica

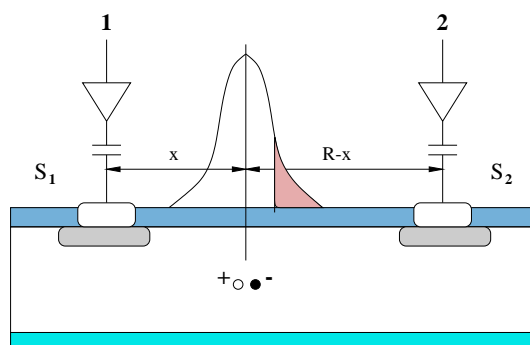


Figura 9: Lectura analógica de un detector. S_1 y S_2 son las señales en las bandas x es la posición de paso de la partícula y R el *pitch*

La lectura analógica es aquella en que se recoge la señal recibida en la electrónica de lectura independientemente del valor de la señal. Cuando la partícula pasa entre dos bandas detectamos señal en ambas. En la figura 9 se puede ver esto. En la banda 1 (izquierda) se recoge la señal S_1 y en la banda 2 la señal S_2 (derecha), x es la posición de paso de la partícula y R es la distancia entre las bandas (variable en los detectores para módulos *forward*³). Podemos expresar la posición en función de las señales en las bandas como:

$$x = \frac{S_2}{S_1 + S_2} R \quad (5)$$

donde se ha supuesto una distribución gaussiana uniforme de carga entre las bandas. Podemos calcular el error en la posición, de la forma usual, obteniendo:

$$\langle \Delta x^2 \rangle = \frac{R^2}{(S_1 + S_2)^2} \left[\langle \Delta S_a^2 \rangle \left(1 - 2\frac{x}{R} + 2\frac{x^2}{R^2} \right) \right] \quad (6)$$

Siendo $\langle \Delta S_a^2 \rangle$ el error en la electrónica de lectura, que hemos supuesto igual para ambos canales. Como vemos las formas de reducir el error pasan por un aumento de la señal total y/o la utilización de un espacio entre bandas menor. Además, la resolución es mayor para sucesos cercanos al punto central del espacio entre bandas ($x = R/2$). El resultado de la ecuación (6) supone que la distribución de carga es uniforme, y no la gaussiana real.

- Lectura digital

En la lectura digital sólo se considera que se ha tenido señal si esta supera un cierto valor, *threshold*. Las señales inferiores a la señal mínima no se tienen en cuenta. Si la señal recogida en una banda supera cierto umbral diremos que la partícula ha pasado por la banda i . Si tenemos más de una banda con señal, entonces el punto de paso de la partícula será el punto medio de las bandas. El método de lectura digital tiene un error asociado de:

$$\langle \Delta x^2 \rangle = \frac{1}{p} \int_{-\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} x^2 dx = \frac{p^2}{12} \quad (7)$$

³Existen 2 clasificaciones de módulos según su posición en ATLAS. Existen los *barrel* que van montados en forma de barril y los *forward* que van montados en las ruedas *endcaps*

Si el espacio entre bandas es de $80 \mu\text{m}$, obtenemos que $\sigma \approx 23\mu\text{m}$, como es el caso del detector de trazas de silicio de ATLAS, donde se ha adoptado la lectura digital.

1.7.2 Difusión de portadores durante la deriva

Los pares electrón-hueco que se producen en un detector de silicio por el paso de una partícula cargada se crean en un cilindro de $1 \mu\text{m}$ de diametro alrededor de la traza de la partícula. Durante la deriva la difusión por colisiones multiples que tanto los electrones como los huecos sufren, es una gaussiana con la anchura, σ , definida como:

$$\sigma = \sqrt{2Dt} \quad (8)$$

siendo D el coeficiente de difusión y t el tiempo de recolección de la carga. El coeficiente de difusión está relacionado con la movilidad de la forma::

$$D = \frac{kT}{q}\mu \quad (9)$$

siendo k la constante de Boltzmann, T la temperatura, q el valor de la carga del electrón y μ la movilidad de los portadores. D es proporcional a μ , y t es inversamente proporcional a μ a través de la velocidad, los electrones son casi tres veces más rápidos que los huecos. Por tanto, el valor de la dispersión σ , que es proporcional al producto $D \times t$, es independiente de μ y es el mismo para los dos tipos de portadores. La dispersión de las cargas es del orden de $10 \mu\text{m}$. Para una separación entre canales mayor de $20 \mu\text{m}$, se hace difícil el reparto de cargas entre las bandas. Lo que se espera es que en la mayoría de los sucesos se recoja la carga en un solo canal, y por tanto la lectura digital sería suficiente. Los módulos SCT son digitales.

1.7.3 Fluctuaciones de la pérdida de energía

Idealmente, considerando la sección eficaz de un electrón libre, la distribución de energía perdida al atravesar el medio sería una curva de Landau. Sin embargo, en el silicio, no tenemos electrones libres. La distribución de energía perdida en el silicio es más ancha que la distribución de Landau, provocando que la media de la energía perdida en silicio sea mayor que la predicha por la teoría, llegando a ser cerca del 50% más alta que el valor de más probable de la distribución de Landau.

La asimetría de la distribución de energía perdida es causada por los electrones primarios de alta energía. Los electrones primarios altamente energéticos introducen un error que puede llegar a desviar la medida de la posición en varias micras, ya que aunque son poco probables, su desviación de la trayectoria de la partícula es muy grande, dando señal en la banda incorrecta. Podemos ver hasta que punto tiene influencia los electrones primarios con algunos datos. Para una partícula mínimamente ionizante la pérdida de energía más probable es 26 KeV en $100 \mu\text{m}$. La pérdida media es de 39 KeV para $100 \mu\text{m}$ de anchura del detector⁴. Tenemos una diferencia de 13 KeV debida a los electrones de alta energía, su influencia no es pues despreciable en la medida.

1.7.4 Ruido

Un concepto necesario para entender el ruido es la carga de ruido equivalente (ENC), expresado en número de electrones. El valor de ENC nos dice la cantidad de carga que recibimos no debida a la señal. En la

⁴Considerando que la energía necesaria para crear un electrón-hueco es de 3.6 eV , tenemos que para el valor de la energía perdida más probable creamos $72 e - h/\mu\text{m}$ y $108 e - h/\mu\text{m}$ para la media de la energía. Lo que nos da como resultado para la anchura del detector de $300 \mu\text{m}$, 22000 y 32000 pares e-h respectivamente.

caracterización y tests eléctricos el ruido se mide en ENC.

El paso de una partícula cargada, en particular un mip, a través de un detector de $300 \mu\text{m}$ crea alrededor de 22.000 pares electrón-hueco depositando una carga de 3.5 fC , esta será nuestra señal, la carga que tendremos que recoger. Cuando se diseña un detector es importante conocer la relación señal/ruido⁵ que se desea obtener, ya que esta nos dirá como va a ser de bueno nuestro detector y las medidas que podremos realizar con él.

Los 22.000 pares electrón-hueco pueden no ser recogidos en su totalidad, o ser dispersados entre canales, con lo cual la relación señal/ruido también disminuye. La única forma de aumentar la relación es disminuyendo el ruido.

La electrónica de lectura (preamplificadores, etc) y el detector, son los elementos que contribuyen al ruido. El ENC para un detector de trazas de acoplo capacitivo se calcula como la suma de:

$$ENC = ENC_{pr} \oplus ENC_{lc} \oplus ENC_{br} \oplus ENC_{ms} \quad (10)$$

con ENC_{pr} el ruido del preamplificador, ENC_{lc} el ruido debido a la corriente de fugas, la contribución a la carga equivalente de la resistencia de alimentación de las bandas es ENC_{br} y ENC_{ms} , el término de ruido de la resistencia debido a la banda metálica. En la mayoría de los casos la mayor contribución nos vendrá dada por el ENC del preamplificador, que se expresa como:

$$ENC_{pr} = a + b \times C_{load}[\text{pF}] \quad (11)$$

C_{load} es la capacidad de carga de las bandas (es la capacidad que ve el preamplificador). La capacidad de carga depende de la capacidad entre bandas y la capacidad entre la banda y la cara inferior del detector. Los valores a y b de la ecuación (11), dependerán de la electrónica utilizada y deben ser calculados experimentalmente para cada caso. C_{load} suele ser del orden de 1 pF/cm , tomando un valor de alrededor de 6 pF para los detectores de ATLAS. La característica fundamental que nos definirá el ruido de la electrónica, es el tiempo necesario para que la señal amplificada en el preamplificador alcance su máximo T_p (*peaking time*), el valor de T_p para ATLAS es especialmente pequeño 25 ns .

El ruido de la corriente de fugas, ENC_{lc} , depende de T_p y de la corriente de fugas del detector, y toma la forma:

$$ENC_{lc} = \frac{e}{q} \sqrt{\frac{qI_{lc}T_p}{4}} \quad (12)$$

Con e la base del logaritmo natural, q la carga del electrón e I_{lc} la corriente de una banda (típicamente del orden del nA). Por otro lado, ENC_{br} toma la expresión:

$$ENC_{br} = \frac{e}{q} \sqrt{\frac{T_p kT}{2R_p}} \quad (13)$$

donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura y R_p es la resistencia en paralelo de las resistencias de alimentación (R_{bias}) del detector (del orden de $1 \text{ M}\Omega$) y la resistencia del preamplificador. Esta última normalmente es mucho mayor que la anterior, por lo que podemos considerar R_p de forma aproximada como igual a R_{bias} . El valor de la resistencia de alimentación se escoge para que la carga equivalente ENC_{br} sea pequeña. La última contribución al ruido es la de la resistencia de la banda, ENC_{ms} y viene dada como:

⁵Señal/Ruido se calcula como la fracción entre el número máximo de electrones que seríamos capaces de detectar dividido por los electrones que detectamos en ausencia de señal (ENC), en nuestro caso $22.000/ENC$.

$$ENC_{ms} = \frac{C_{load}e}{q} \sqrt{\frac{R_{ms}kT}{6T_p}} \quad (14)$$

donde R_{ms} es la resistencia del metal de las bandas, que dependerá de la anchura y grosor del aluminio. Esta parte será tanto mayor cuanto mayor sea la longitud de la banda, llegando a ser dominante para longitudes mayores de 40 cm dependiendo de la resistividad del aluminio, para *SCT*, es de 15 Ω/cm .

Considerando todas la contribuciones y aplicándolas al caso del *Silicon Tracker* de ATLAS, la relación Señal/Ruido, es alrededor de 15 para un detector no irradiado.

Para un detector tenemos que los parámetros que condicionarán el ruido son: la capacidad de carga (C_{load}) que es básicamente el valor de la capacidad entre bandas del detector C_{inter} (figura 3), la corriente de fugas de la banda, que es el valor de la corriente del diodo, ecuación (?), la resistencia de alimentación del detector (R_{bias}) que toma un valor alrededor de $10^6 \Omega$ y la resistencia de la banda de metal R_{ms} . Todos estos parámetros se determinarán en el capítulo 4.

1.7.5 Efectos de la radiación sobre los detectores

Los detectores del SCT de ATLAS van a estar inmersos en un ambiente de alta radiación. La dosis de radiación esperada sobre los detectores tras los 10 años de funcionamiento de ATLAS es de alrededor de $3 \cdot 10^{14}$ neutrones/ cm^2 . Será, por tanto, importante conocer los efectos de la radiación sobre los detectores. Esto es debido a la alta luminosidad de funcionamiento de LCH.

La radiación tiene dos efectos sobre los detectores, cambios en el sustrato y cambios en la capa aislante ó dieléctrica. Es decir, el equivalente a mutaciones en el tejido orgánico. Los daños en el sustrato tienen dos consecuencias, por una parte cambio en el número efectivo de dopantes N_{eff} ($N_{eff} = N_D - N_A$). La capa de tipo N se va convirtiendo gradualmente en capa tipo P. La variación de la figura 10 se puede parametrizar como:

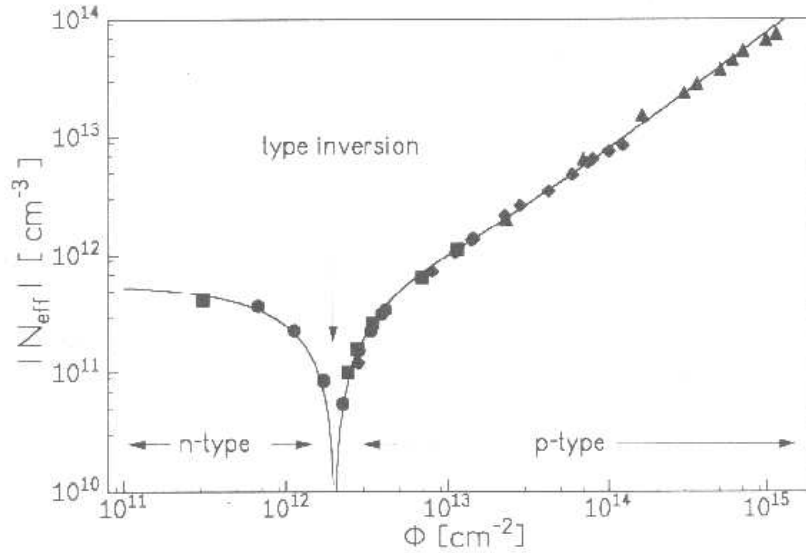


Figura 10: Curva de inversión del tipo de un mismo semiconductor por efectos de la radiación

$$N_{eff}(\phi) = N_{eff}(0)e^{-c\phi} - \beta\phi \quad (15)$$

siendo $N_{eff}(0)$ la concentración efectiva antes de irradiar, β y c son constantes que han de ajustarse. El primer término corresponde a la destrucción de donantes y el segundo a la creación de aceptores.

Además, una vez irradiado, aunque no se este irradiando al detector, N_{eff} sigue cambiando dependiendo de la temperatura de almacenamiento, a este efecto se lo conoce como *annealing*. En la ecuación (15) no hemos tenido en cuenta la influencia del *annealing*. El voltaje de desertización en función del tiempo y la temperatura de *annealing* puede escribirse como:

$$V_d = V_Z + V_S \times e^{-\frac{t}{\tau_S}} + V_A \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau_L}}) \quad (16)$$

Esto se conoce como parametrización de Ziocck, con $\tau_S[dias] = 70 \times \exp(-0.175T)$ y $\tau_L[dias] = 70 \times \exp(-0.152T)$ con T la temperatura en grados Celsius. V_Z, V_S, V_A son constantes proporcionales a la dosis estando relacionadas con el daño inducido. τ_S es la constantes de tiempo del *annealing* beneficioso, durante el tiempo que predomina este término disminuye el voltaje de desertización. τ_L es la constante de tiempo del *annealing* inverso, que tiene como consecuencia el aumento de V_d . Estos parámetros son muy dependientes de la temperatura. Las temperaturas negativas, del orden de -10° C, suprimen enormemente el *annealing* inverso, comparado con la temperatura ambiente.

Otro efecto importante de la radiación es el aumento de la corriente de fugas del detector. Se puede parametrizar el incremento de corriente como:

$$\Delta I = \alpha\phi \times V_{det} \quad (17)$$

donde ΔI es el incremento de la corriente, α es la constante de daño, ϕ es la dosis y V_{det} es el volumen activo del detector, volumen de la zona desierta. La radiación tiene otros efectos sobre el sustrato, como son: la disminución de la movilidad de los portadores, incremento en la resistividad del sustrato, etc.

Por otro lado, tenemos los efectos en la capa aislante. Un detector en su mayor parte está recubierto de una capa aislante. En los límites entre esta capa y las zonas altamente dopadas tenemos unos campos muy intensos. La radiación crea pares por ionización en el óxido aislante (SiO_2), la diferencia en las movilidades hace que los huecos sean atrapados entre el óxido y el semiconductor. Se crea lo que se conoce como una capa de acumulación de cargas entre óxido-semiconductor, una capa completamente irregular debida a la no uniformidad del óxido. La capa de acumulación de cargas puede crear un camino entre las bandas, de forma que cuando tengamos la señal del paso de una partícula en una banda, la carga se reparta entre las bandas adyacentes. Si ocurre esto, tendremos señal en más de una banda, y reconstruiremos la posición de paso de la partícula incorrectamente. Tendremos más bandas con señal de las que esperaríamos cuando el detector no estuviese irradiado, es decir tendremos un ruido mayor.

1.7.6 Efectos del campo magnético

Para conseguir reconstruir el momento de la partícula es necesario que los detectores de trazas estén en una zona con un campo magnético intenso, veremos cuales son las consecuencias de este campo sobre los detectores.

Si sometemos a un detector de trazas de silicio a un campo magnético paralelo a las bandas (la dirección utilizada para la reconstrucción del momento de las partículas), los electrones y huecos que se muevan a una velocidad $\vec{v} = \mu\vec{E}$ notarán una fuerza $\vec{F} = q(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{H})$. Como resultado de esta fuerza los portadores sufrirán un cambio de dirección, con un ángulo que depende de la movilidad y del campo magnético aplicado. El ángulo Θ correspondiente al cambio de dirección lo obtendremos como:

$$\tan \Theta = \mu^H H \quad (18)$$

con H el campo magnético aplicado y μ^H la movilidad de Hall, está movilidad es diferente de la movilidad de deriva. Se han estudiado para los detectores de trazas de ATLAS las dependencias de las movilidades de Hall y de deriva con el campo aplicado H , el voltaje de alimentación V_a obteniéndose cierta dependencia con el voltaje aplicado, y se ha medido el ángulo Θ obteniéndose valores compatibles con los teóricos. El valor de las movilidades de Hall para electrones y huecos es $\mu_n^H = 1670 \text{ cm}^2/V \cdot s$ y $\mu_p^H = 370 \text{ cm}^2/V \cdot s$, indicando que el ángulo de inclinación para electrones es un factor $\mu_n^H/\mu_p^H = 4.5$ mayor que para huecos. Para el campo de 2 Tesla de ATLAS, obtenemos una desviación para los electrones de alrededor de 3.5° .

La acción del campo magnético sobre los portadores deforma la señal esperada, desplazándola y modificando la distribución de la carga recogida. Sin embargo este es un error sistemático que puede ser corregido en el diseño de los experimentos modificando la orientación de los detectores respecto a la dirección del campo H , como en el caso de ATLAS.

1.8 Módulos del *SCT* de ATLAS

Dependiendo del entorno en que van a ser utilizados los detectores, las características de estos se modifican ligeramente para conseguir realizar su función del mejor modo posible. A continuación se intentará proporcionar una visión del tipo de detectores que se necesitan y utilizan en ATLAS.

1.8.1 Descripción de los detectores de trazas de Silicio de ATLAS

En el proyecto *SCT* de ATLAS se van a utilizar alrededor de 20.000 obleas de silicio $p + n$ de $285 \mu\text{m}$ de espesor, distribuidas en cerca de 10.900 detectores rectangulares en la zona barril y 8.700 detectores trapezoidales en la zona hacia delante. Debido a las características de la región a cubrir se necesitan 6 geometrías diferentes (los tipos W12, W21, W22, W31, W32 y Barril).

En la tabla 1 se han resumido las dimensiones de los 6 tipos de detectores. Para los detectores de la zona hacia delante, la longitud será la altura del trapecio y las anchuras las bases, siendo la anchura #1 la base mayor. También se muestran las distancias entre las 768 bandas que forman los detectores. Sólo para los detectores Barril la separación entre bandas es constante, variando en los detectores de la zona hacia delante alrededor de $10 \mu\text{m}$ a lo largo del detector. En los detectores de la zona hacia delante es constante la separación angular entre las bandas debido a su disposición en abanico (en la figura 11 se puede ver esta forma). Podemos ver la separación angular entre bandas en la última fila de la tabla 1.

Medidas	Barril	Middle			Outer	
		W12	W21	W22	W31	W32
Longitud (mm)	64.000	61.060	65.085	54.435	65.540	57.515
Anchura #1 (mm)	63.360	55.488	66.130	74.847	64.636	71.810
Anchura #2 (mm)	63.360	45.735	55.734	66.152	56.475	64.653
Distancia entre bandas (μm)	80	57-69	70-83	83-94	71-81	81-90
Ángulo entre bandas (μrad)	0	207	207	207	161.5	161.5

Tabla 1: Medidas de los detectores para los 6 tipos de geometrías existentes

Como se citó anteriormente en el extremo de la banda se encuentra la resistencia de alimentación, su función es limitar la corriente que va a la electrónica de lectura. El valor de la resistencia se escoge de forma que la contribución al ruido sea muy pequeña en comparación con el resto de términos de ruido. Un buen



Figura 11: Vista de una sección de un *EndCap*

orden de magnitud para las resistencias es el de $10^6 \Omega$. Las resistencias se las crea mediante implante directo en el silicio o con una estructura de polisilicio dependiendo del fabricante, encima de estas se deposita una capa de SiO_2 aislante, que además sirve como protección. En la figura 12 vemos la estructura de capas entre la banda de aluminio y el anillo de alimentación de las bandas, en el centro se puede ver la estructura de la resistencia.

Tenemos dos tipos de *pads* diferentes los *pads* AC , acoplo capacitivo, y los *pads* DC, acoplo directo. Hay cuatro *pads* AC en cada banda, dos en un extremo y otros dos en el otro extremo, siendo dos de ellos redundantes. Estos *pads* son los utilizados para comprobar el estado de las bandas y conectar la banda a la electrónica de lectura. Sólo existe un *pad* DC en cada banda, por estar conectados directamente con el implante, se utilizarán para medir independientemente la corriente de fugas de cada banda.

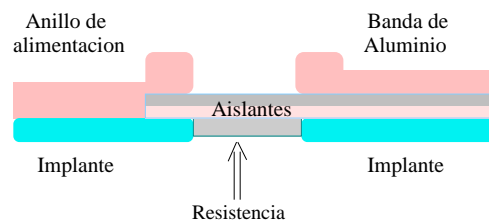


Figura 12: Proceso de integración de las resistencias del bias en un detector p+n. En el dibujo se han señalado las distintas partes que forman una banda

En todos los tipos de detectores tenemos 768 bandas que sirven para determinar la posición de la partícula, más dos en las esquinas para conseguir que en las 768 bandas de lectura el campo sea homogéneo. Las anchuras de la banda de aluminio y de la banda del implante, ver la figura 13 , se han escogido en los rangos de 16 a 22 μm y de 16 a 20 μm respectivamente, entre ambas bandas hay una diferencia de anchuras de

algunas micras con el objetivo de evitar micro-descargas entre los bordes de estas.

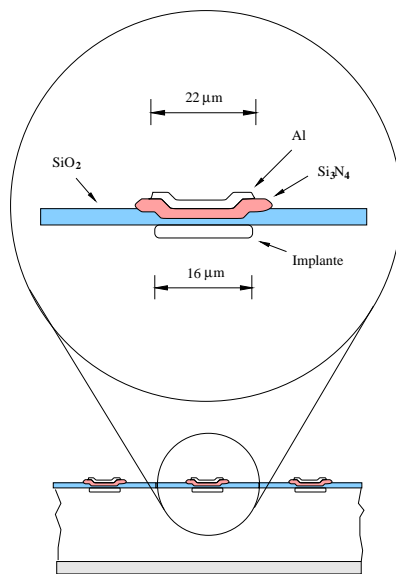


Figura 13: Diseño de las bandas de los detectores. Detalle de la estructura de dos capas de aislante entre la banda de aluminio y el implante

Entre las bandas de aluminio y del implante se encuentra el aislante que hará las funciones de capacidad de acoplo. Con la finalidad de evitar posibles conexiones entre el aluminio y el implante, el aislante está formado por dos capas de materiales distintos, SiO_2 y Si_3N_4 . Con la doble capa se reduce el riesgo de huecos entre la capa de metal y el implante, para tener una carencia total de aislante en un punto habrán de coincidir un hueco en el recubrimiento de SiO_2 con otro de Si_3N_4 .

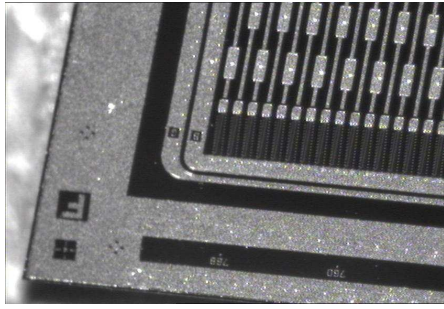
El grosor de las capas no está definido por la colaboración ATLAS, pero como ejemplo, con una capa de SiO_2 de 130 nm y otra de Si_3N_4 de 100 nm, conseguimos una capacidad de acoplo del orden de 20 pF/cm. En la figura 13 vemos el dibujo de un detector con la banda ampliada, el diseño de las bandas corresponde al realizado por la compañía Hamamatsu.

La alimentación de las bandas se realiza a través del anillo de alimentación (*bias ring*). En él se han dejado ocho *pads* donde se puede hacer contacto para aplicar el voltaje. Tenemos dos *pads* de alimentación en cada una de las esquinas del detector, el segundo *pad* es redundante.

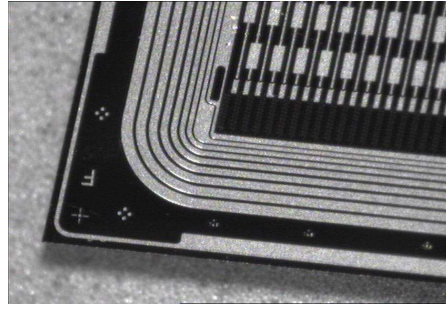
Más cercano al borde del detector, se puede ver otra zona rectangular, el *edge contact pad* con dimensiones $550 \times 80 \mu m^2$. Tenemos cuatro de estas zonas en el detector, una por cada esquina. El contacto en estos *pads* es equivalente al contacto con la zona inferior del detector, ya que están directamente conectados con ella. Gracias a los *pads* de borde y a los *pads* del anillo de alimentación, se puede alimentar el detector a través de los contactos de la parte superior del detector. Los *pads* de borde y de los anillos serán alto y bajo voltaje respectivamente.

Entre el anillo de alimentación y el borde se situará una estructura de guardas, que depende del fabricante, tanto el número de ellas como la forma de las mismas. Podemos ver ejemplos de anillos de guarda en las figuras 14(a), 14(b), 14(c) y 14(d), de los distintos fabricantes, Hamamatsu, Micron, Sintef y CSEM, respectivamente. Las estructuras de guarda son la forma más eficaz de evitar los efectos de borde y las rupturas en la corriente de fugas (incremento brusco en el valor de la corriente).

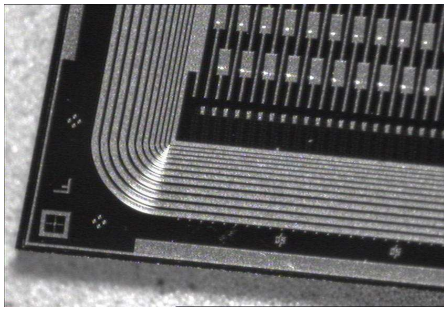
Aunque este diseño es el de un detector $p+n$, se realizaron pruebas con detectores $p+n$ y con detectores $n+n$. Para los detectores no irradiados el comportamiento era similar para ambas estructuras, pero el



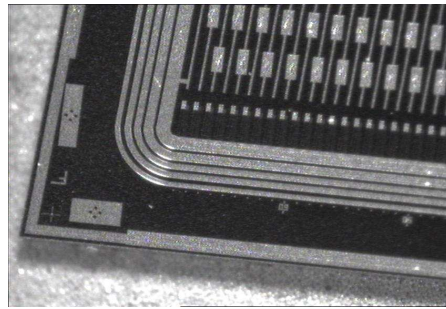
(a) Hamamatsu



(b) Micron



(c) Sintef



(d) CSEM

Figura 14: Comparación de los 4 tipos de detectores de diferentes fabricantes

funcionamiento de los $n + n$ irradiados era mejor, pudiendo trabajar parcialmente desertizados gracias a la inversión de tipo. Su coste, cerca de un 40% mayor que los $p + n$, hizo que se decidiera finalmente por los $p + n$.

2 Bibliografía

1. *The Atlas Inner Tracker and The detection of light super-symmetric Higgs Bosons (Tesis)*, Octubre, 2003, **M. Vos (IFIC)**
2. *Caracterización de los detectores de silicio del SCT de ATLAS (Tesina)*, Septiembre, 2001, **J.E. García (IFIC)**
3. *Caracterización y análisis en haz del detector de trazas de silicio de ATLAS (tesina)*, Marzo, 1999, **M.J. Costa (IFIC)**
4. *Inner detector technical design report (TDR)*, 1997, **Varios**