

Fabricación y caracterización de detectores de radiación a bajas temperaturas y altas frecuencias

Rodríguez, María Cristina¹

Física Experimental IV, Instituto Balseiro, UNCuyo, CNEA

¹maria.rodriguez@ib.edu.ar

26 de mayo de 2016

Se caracterizó un nuevo tipo de detector de radiación a bajas temperaturas, llamado detector M. Se realizaron simulaciones de un circuito con un defecto en la línea para caracterizar la respuesta del detector y se fabricó un modelo como el de la simulación para medir a altas frecuencias. Se trabajó en el rango de frecuencias RF/microondas, hasta 500 MHz. Por otro lado, se realizaron simulaciones de un detector MKID de 2,8 mm x 3 mm y se observó cómo variaba la transmisión de la línea al modificar la frecuencia de resonancia. Se fabricaron detectores con aluminio en un sustrato de silicio, utilizando técnicas de litografía. Finalmente se realizaron mediciones a bajas temperaturas, utilizando un crióstato de dilución que permitió alcanzar temperaturas del orden de 1 K. Para ello se utilizó un circuito fabricado simultáneamente y con los mismos materiales que los MKIDs para caracterizar la transición superconductor del aluminio. Se obtuvo que la temperatura crítica del aluminio es de $T_c = (1220 \pm 7) \text{ mK}$.

1. Introducción

En la actualidad existen diversas áreas de interés donde es importante hacer mediciones cada vez más precisas y con mayor resolución. Por ejemplo en física de neutrinos es necesario contar con grandes arreglos de detectores muy precisos, debido a que los neutrinos sólo interactúan mediante la fuerza débil. Por otro lado, para la búsqueda de materia oscura [1], se necesita una gran superficie con detectores de mucha sensibilidad. En astronomía, es necesario que los telescopios tengan cámaras que permitan registrar fotones individuales, por lo que se utilizan detectores que miden con poco ruido y con la mayor resolución posible.

Una alternativa que se está desarrollando desde hace algunos años consiste en el uso de detectores de bajas temperaturas. Estos están fabricados con materiales que son superconductores por debajo de una dada temperatura crítica. Los detectores hechos con este tipo de materiales

presentan enormes ventajas en comparación con los detectores semiconductores, ya que tienen mayor sensibilidad y resolución, además de que permiten medir en un rango mayor de longitudes de onda a bajas energías. Esto se debe principalmente a que los superconductores tienen un gap que es aproximadamente 1000 veces menor que el de un semiconductor y el ruido térmico es mucho menor en superconductores.

Para las mediciones mencionadas anteriormente es de interés construir cámaras para captar imágenes fabricadas con grandes arreglos de detectores que puedan ser medidos simultáneamente. En particular, un tipo de detectores que utilizan señales de altas frecuencias son una buena alternativa para este tipo de mediciones. La principal ventaja sobre otros detectores de bajas temperaturas es que tanto para su excitación como para su lectura permiten el uso de técnicas de multiplexado en el dominio de frecuencias. Es decir, es posible hacer una lectura simultánea a través de la misma línea de transmisión de miles de detectores.

Este trabajo se enfoca en el estudio y caracterización de este tipo de detectores. Estos tienen múltiples aplicaciones adicionales, entre las que se encuentra el monitoreo de residuos nucleares. Si se construyeran grandes arreglos de detectores, estos podrían ser útiles en la medición de ondas gravitacionales y en la detección de planetas fuera del Sistema Solar.

2. Detectores de interés en este trabajo

En este trabajo se estudiaron en particular dos tipos de detectores superconductores que funcionan en frecuencias RF/microondas y que permiten medir fotones individuales.

Uno de ellos, el detector MKID o Microwave Kinetic Inductance Detector, consiste en un arreglo de microresonadores superconductores, que trabajan a temperaturas mucho menores que la temperatura crítica. La temperatura crítica T_c de un superconductor es la temperatura a la que ocurre la transición de estado normal a superconductor. Los MKIDs son utilizados principalmente debido a su alta sensibilidad y a la facilidad de construir grandes arreglos de los mismos. La principal ventaja de los MKIDs es que permiten detectar en qué resonador incidió un fotón y medirlo a través de la misma línea. Este tipo de detectores, sin embargo, requiere el uso de resonadores con un alto factor de calidad para tener buena resolución al medir la variación en la frecuencia y para poder tener la mayor cantidad posible de resonadores en un ancho de banda.

Por otro lado, los detectores M permiten medir fotones que inciden en una línea de transmisión superconductora. Estos detectores funcionan a una temperatura menor, pero cercana, a la temperatura crítica. El principio de funcionamiento se basa en que los fotones al incidir generan que una región del material pase de estado superconductor a normal, provocando un defecto en la línea. Esto se traduce en un cambio en la reflexión de las ondas que se propagan en ella. Este tipo de detectores tienen la ventaja de que requieren un proceso de fabricación más sencillo y no presentan las complicaciones asociadas al acoplamiento entre frecuencias cercanas.

2.1. Detectores MKIDs

Los MKIDs son detectores de radiación superconductores que permiten detectar fotones individuales, a la vez medir su energía y el tiempo en el que el fotón incidió. Los MKIDs son microresonadores superconductores con un factor de calidad alto acoplados capacitivamente a una línea de transmisión.

El principio de funcionamiento de un MKID se basa en que al incidir un fotón sobre el superconductor, cambia la impedancia del microresonador. Esto se traduce en una variación en la frecuencia de resonancia, que permite medir en qué momento incidió el fotón. Cada uno de los resonadores tiene una frecuencia de resonancia ligeramente distinta y están ordenados de forma tal que, midiendo la transmisión de la línea, se puede determinar en qué detector hubo una variación en la frecuencia. Esto permite detectar en qué posición incidió el fotón y con qué energía, ya que ésta está asociada a cuánto varió la frecuencia.

El cambio en la impedancia del resonador se debe al efecto de inductancia cinética. Ésta es una propiedad de los superconductores que se puede explicar a partir de la teoría BCS, que estudia los orígenes microscópicos de la superconductividad. La teoría BCS, denominada así por J. Bardeen, L. N. Cooper y J. R. Schrieffer [2], fue presentada en 1957. Cooper demostró que en el estado de menor energía de un superconductor existen pares de electrones ligados, que se forman debido a la interacción con los fonones de la red en la que están inmersos. Los electrones ligados se conocen como pares de Cooper. Si la temperatura es mayor a cero, existe una fracción de pares de Cooper en el material y otra de electrones en estado excitado, llamados cuasipartículas. Los pares de Cooper tienen la particularidad de que pueden moverse por la red sin colisionar con los iones. Debido a esto, se desplazan sin resistencia de la red y se ven menos afectados por vibraciones térmicas. Por lo tanto, en el superconductor se puede generar una supercorriente de pares de Cooper que almacena mayor energía que una corriente de electrones. Para invertir la dirección de la corriente de pares de Cooper se requiere energía extra, que da lugar a la inductancia cinética. Ésta depende de la densidad de pares de Cooper en el superconductor, los cuales a su vez dependen de la temperatura.

En la Figura 1 se observa un esquema del funcionamiento de un MKID.

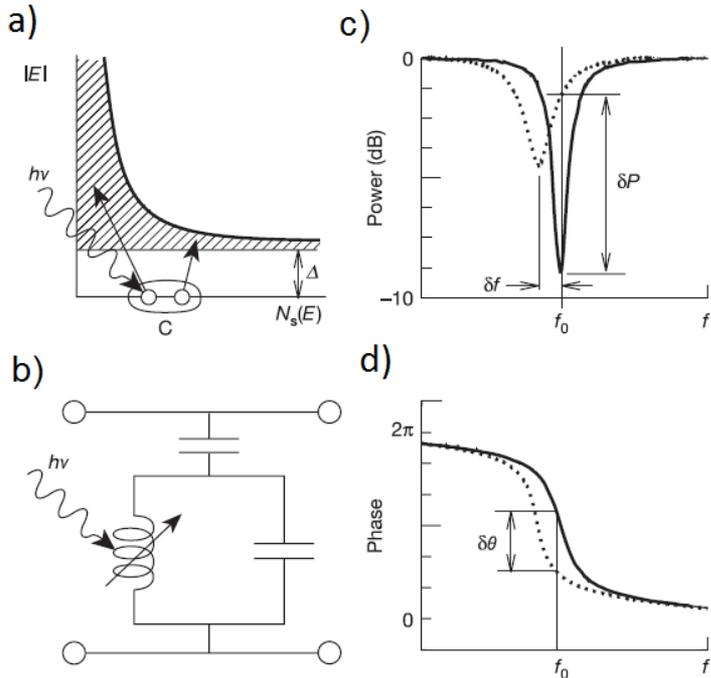


Figura 1: Esquema del funcionamiento de un MKID tomado de [1]. En el texto se explica el detalle de las figuras.

En la Figura 1a se observa la densidad de estados en un superconductor a $T \ll T_c$ en función de la energía en el momento en que incide un fotón. La energía del mismo está dada por

$$E = h\nu > 2\Delta,$$

donde ν es la frecuencia del fotón y Δ es el gap del superconductor. En este esquema, los pares de Cooper que se observan están en el nivel de Fermi y la densidad de estados de cuasipartículas N_s está graficada en función de su energía E . Al incidir, el fotón rompe pares de Cooper y cada uno de ellos da lugar a dos cuasipartículas en estado excitado. El número de cuasipartículas que se crean es proporcional a la energía del fotón que incide sobre el material.

En la Figura 1b se observa el circuito equivalente de un microresonador, que es un circuito LC paralelo con inductancia variable. La impedancia del superconductor varía en función de la energía del fotón incidente. Al incidir el fotón, aumenta la resistencia y la inductancia total, debido al efecto de la inductancia cinética.

En las Figuras 1c y 1d se observan la amplitud y fase respectivamente de la transmisión de la línea. Ésta presenta un pico en la frecuencia de resonancia del circuito. Cada fotón que incide sobre un detector da lugar a un cambio en la amplitud y fase de la señal, debido a que cambia la impedancia del superconductor. Al incidir un fotón de una dada energía $h\nu$ el pico se ensancha, porque aumenta la resistencia del resonador y la frecuencia de resonancia disminuye, ya que aumenta la inductancia. De esta forma, es posible medir cuándo inciden fotones individuales y su energía, que es proporcional al cambio en la frecuencia de resonancia del circuito.

2.2. Detectores M

El detector M, que consiste en una línea de transmisión superconductora microstrip, está basado en una idea nueva, por lo que no fue construido antes de este trabajo. Estos detectores superconductores tienen la ventaja de ser sencillos de fabricar y fáciles de medir. Su funcionamiento se basa en que al incidir un fotón sobre una línea superconductora, modifica la impedancia de la sección de la línea en la que incidió, ya que esa zona pasa de estado superconductor a estado normal. De esta forma, sabiendo cómo varía el parámetro asociado a la reflexión en función de la posición del defecto en la línea, se puede determinar en qué posición incidió el fotón.

Para utilizar este tipo de detectores se mide la variación en la fase del parámetro S de reflexión generada por un cambio en la impedancia del superconductor. Los parámetros de dispersión o parámetros S describen la relación entre la magnitud y la fase de las ondas reflejadas y transmitidas en un dispositivo. De esta forma permiten caracterizar la reflexión y transmisión de circuitos que trabajan en el rango de frecuencias RF/microondas. Los parámetros S están numerados según desde y hacia qué puerto se propagan. Es decir, los parámetros de reflexión son S11 y S22, mientras que los de transmisión son S12 y S21, en el caso de dispositivos de dos puertos.

Por lo tanto en los detectores M se espera que al variar la posición de incidencia del fotón, cambie la fase del parámetro S11, asociado a la reflexión. Para estudiar este tipo de detectores, se midió cómo variaba la reflexión de una línea de transmisión microstrip ubicando un defecto en la línea y variando su posición.

3. Simulaciones

Inicialmente se realizaron simulaciones para estudiar la respuesta de ambos tipos de detector en distintas condiciones. Para ello se utilizó el software Sonnet que permite simular circuitos coplanares de altas frecuencias. El circuito se diseñó dentro de una caja hecha de material conductor, cuya función es aislar el circuito del ruido externo. Se definió el metal que formaba parte del circuito y el dieléctrico. Esto último es importante porque el tipo de dieléctrico está asociado a las pérdidas en el circuito. Finalmente se realizó el diseño del circuito en el sustrato y se analizaron los parámetros S en función de la frecuencia.

Debido a que se requerían pruebas previas antes de hacer mediciones a altas frecuencias y bajas temperaturas, se buscó trabajar inicialmente con modelos más grandes de los detectores, construidos sin necesidad de microfabricación y que pudieran ser medidos a frecuencias RF/microondas y a temperatura ambiente.

3.1. Simulación MKID

Para el estudio de los MKIDs se simuló el resonador que se observa en la Figura 2. La superficie en la que se diseñó el resonador es de 2,8 mm x 3 mm. Estas medidas se tomaron en base a una máscara ya fabricada. En la parte superior del microresonador se ubica un inductor tipo serpentina, más abajo hay un capacitor tipo interdigital y en la parte inferior se observa la línea de transmisión a la cual está acoplado el resonador LC. Cada una de las líneas del capacitor tiene una longitud de $L = 1,86$ mm. El parámetro L_1 permite modificar la longitud de la línea del capacitor más cercana a la línea de transmisión y L_2 es la longitud de la más cercana al inductor.

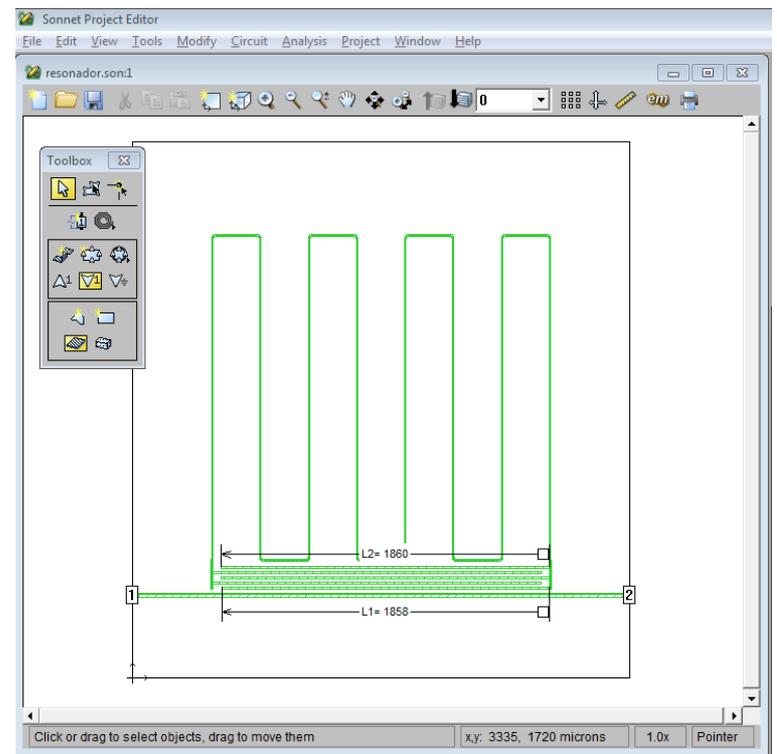


Figura 2: Simulación con el software Sonnet de un resonador MKID tipo LC paralelo que consiste en un inductor de tipo serpentina, que se observa en la parte superior del circuito, y un capacitor interdigital acoplado a la línea de transmisión. Ésta se observa debajo del circuito, entre los puertos 1 y 2.

Para medir cómo variaba la transmisión de la línea se analizó el circuito simulado, obteniéndose la dependencia del parámetro S21 en función de la frecuencia. Se observó un pico en una frecuencia de resonancia de aproximadamente 1,8 GHz con un alto factor de calidad.

A continuación, variando la capacidad, se analizó cómo dependía la frecuencia de resonancia de los parámetros del resonador. Para ello se definió como variable una de las líneas del capacitor, cuya longitud inicial era de 1,86 mm. Se disminuyó de a 0,1 mm este parámetro, hasta una longitud final de 1,06 mm. Se eligió modificar la longitud L_2 de la línea del capacitor más cercana al inductor, de forma de modificar lo menos posible el acoplamiento con la línea de transmisión.

Se analizó cada uno de estos resonadores, obteniéndose la relación entre la frecuencia y la magnitud del parámetro S21 asociado a la transmisión que se observa en la Figura 3.

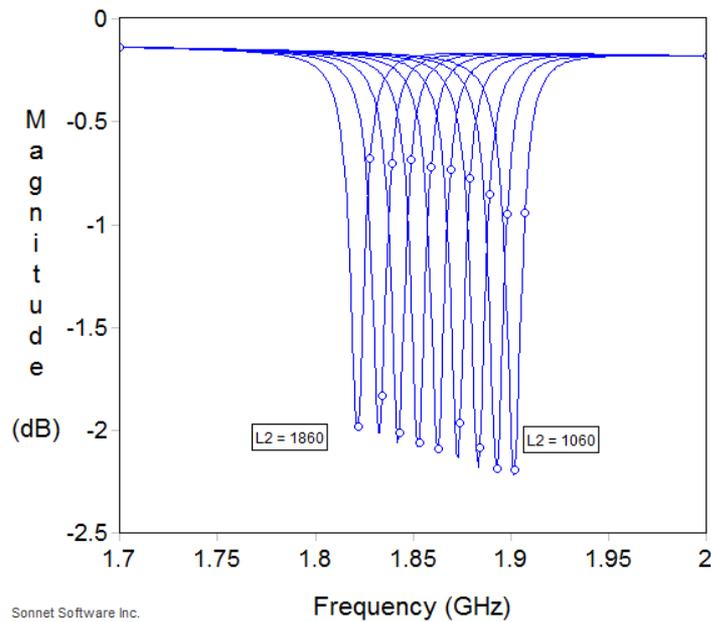


Figura 3: Simulación de la respuesta del parámetro S21 de un microresonador en función de la frecuencia con el software Sonnet. Las longitudes que aparecen en el gráfico indican a qué pico corresponden las longitudes mayor y menor respectivamente y están medidas en micrones.

Se observó cómo varía el pico de resonancia para cada microresonador. Este resultado indica que se puede tener resolución en la posición del fotón incidente utilizando un arreglo de resonadores con distintas frecuencias de resonancia. Es importante verificar que los picos no se superponen y uno de los cuidados que se deben tener en cuenta es que cuando se construya el arreglo de resonadores, estos no deben estar ordenados cerca de otros con frecuencias muy parecidas, para evitar acoplamientos.

Con el fin de medir detectores más grandes y a menor frecuencia, se simuló un resonador idéntico pero a una escala 100 veces mayor y se encontró que de esta forma aparecían picos de resonancia inesperados, asociados a no linealidades en el cambio de tamaño. Por este motivo, se fabricaron mediante litografía microresonadores de 2,8 mm x 3 mm, al igual que los de la simulación. Este procedimiento se amplía en la sección 5.

3.2. Simulación detector M

Se realizó un modelo de detector M para estudiar las propiedades de la reflexión de una línea de transmisión microstrip ubicando un defecto en la línea y variando su posición. Para ello, se simuló un circuito microstrip con el software Sonnet. Se utilizó cobre en el circuito y el dieléctrico que se eligió fue FR-2 de espesor 1,6 mm.

La línea sin defecto se fabricó de forma de que tenga una impedancia característica estándar de 50Ω . Esta impedancia depende de la constante dieléctrica, del espesor del dieléctrico y del ancho de la línea, que medía 3 mm. Se puede ver que al aumentar el ancho de la línea conductora la impedancia baja, por lo que se colocó un defecto de 10 mm x 6 mm y se simuló la línea de transmisión que se observa en la Figura 4.

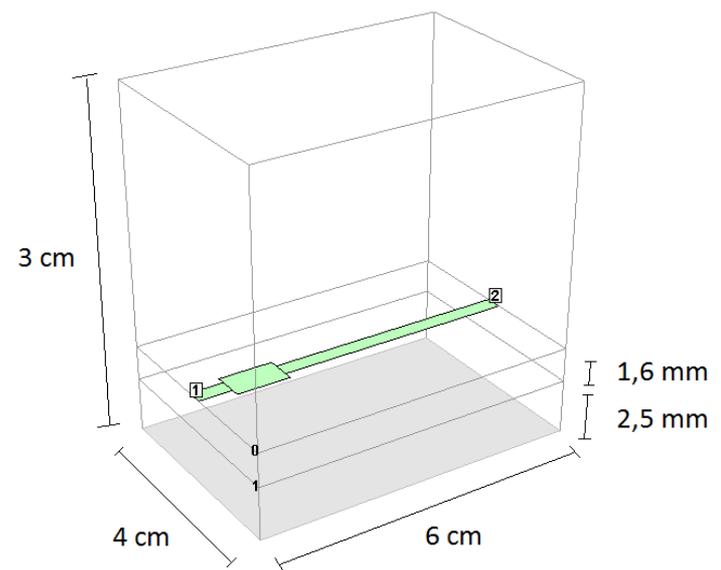


Figura 4: Simulación de una caja con una línea de transmisión con un defecto, mediante el software Sonnet. Cabe aclarar que la altura no está en escala con el ancho y el alto de la caja.

Con el objetivo de medir el parámetro de reflexión para ubicar el defecto se analizó cómo variaba el parámetro S11 al modificar la distancia del defecto a uno de los extremos de la línea. Se tomaron posiciones equiespaciadas, a partir de 6,25 mm de un extremo hasta el centro de la línea y las posiciones simétricas del otro lado. Se observó que la magnitud del parámetro S11 no se modificaba apreciablemente. Por el contrario, como era de esperarse, la fase del

parámetro S_{11} variaba como se observa en la Figura 5.

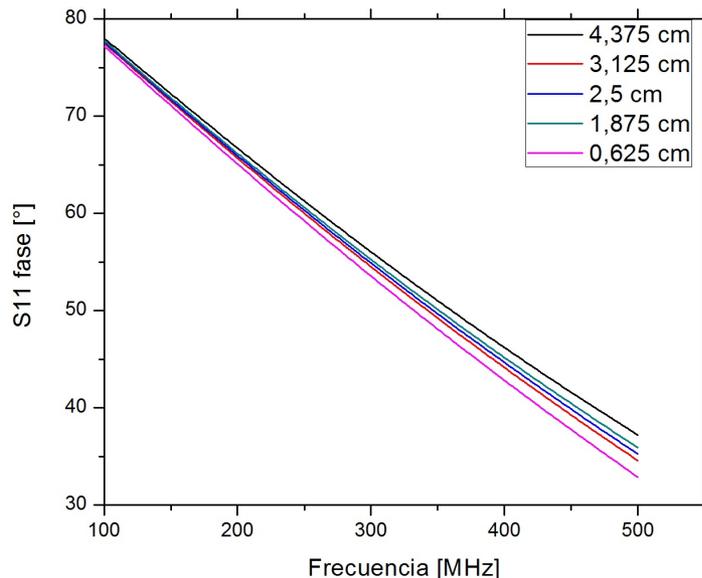


Figura 5: Simulación de la variación de la fase del parámetro S_{11} al variar la posición del defecto mediante el software Sonnet.

Si bien la variación en la fase puede parecer no tan notoria, en las mediciones se tiene precisión menor al grado, por lo que se puede medir el efecto. Además se ve que la separación aumenta con la frecuencia, por lo que mediciones a mayor frecuencia y en menor escala, deberían presentar variaciones mayores en la fase. Por lo tanto, según los resultados de la simulación, midiendo la fase de la reflexión de la línea para alguna frecuencia se puede identificar dónde se encuentra el defecto.

4. Mediciones a altas frecuencias

El término microondas se refiere a ondas electromagnéticas con frecuencias en el rango de 1 GHz a 300 GHz, mientras que para frecuencias menores se encuentran las radiofrecuencias a partir de los 300 kHz. Existen diversos dispositivos que permiten medir en este rango de frecuencias, en particular en este trabajo se utilizó un analizador de redes o VNA.

4.1. Analizador de redes VNA

Un analizador de redes o VNA (Vector Network Analyser) es un instrumento utilizado para medir impedancia de circuitos que trabajan con frecuencias RF y microondas, a través de la medición de ondas reflejadas y transmitidas. Su principal función es determinar los parámetros S para caracterizar algún dispositivo de prueba o DUT (Device Under Test) que puede tener uno o dos puertos.

En el laboratorio se utilizó un VNA marca Agilent, que permitía medir frecuencias de hasta 500 MHz. Para medir con el VNA un generador de ondas sinusoidales alimenta al dispositivo de prueba, el cual a su vez está conectado a dos entradas A y B del VNA que permiten caracterizar la amplitud y la fase de señales de reflexión y transmisión del DUT respectivamente.

Para medir los parámetros de reflexión y transmisión de un dispositivo, se conectó el VNA al circuito que se observa en la Figura 6. La señal que alimenta el DUT pasa por un divisor resistivo, dando lugar a dos ramas, una de las cuales se conecta a la referencia R del VNA. La otra se conecta a través de la línea principal de un acoplador direccional al DUT. El acoplador direccional es un dispositivo que además de una línea principal tiene un puerto acoplado, que permite medir sin modificar la señal que se transmite por la línea principal. Para ello se acopla el DUT a la entrada A del VNA, que mide las reflexiones. El otro extremo del DUT se conecta a la entrada B del VNA para medir la transmisión del dispositivo.

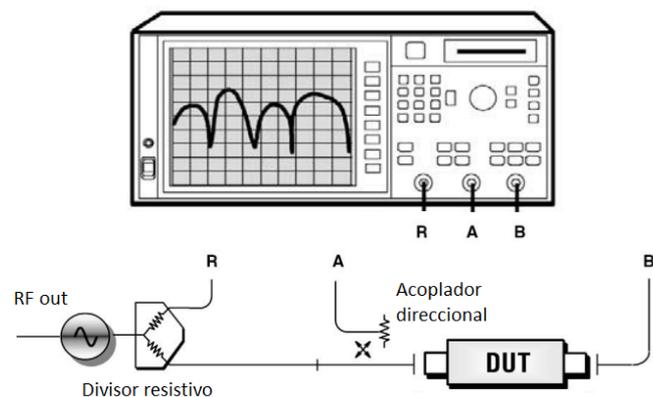


Figura 6: Esquema del circuito utilizado para medir con el VNA los parámetros de reflexión y transmisión de un dispositivo.

Con el objetivo de disminuir errores sistemáticos por la impedancia de los cables, se realizó una calibración antes de cada medición. Para ello se disponía de 3 circuitos estándares: un circuito abierto, un cortocircuito y un circuito con una carga de $50\ \Omega$. Se midió la transmisión de un atenuador de 10 dB para corroborar el buen funcionamiento del VNA y se concluyó que la calibración mejoraba considerablemente la medición, como se observa en la Figura 7.

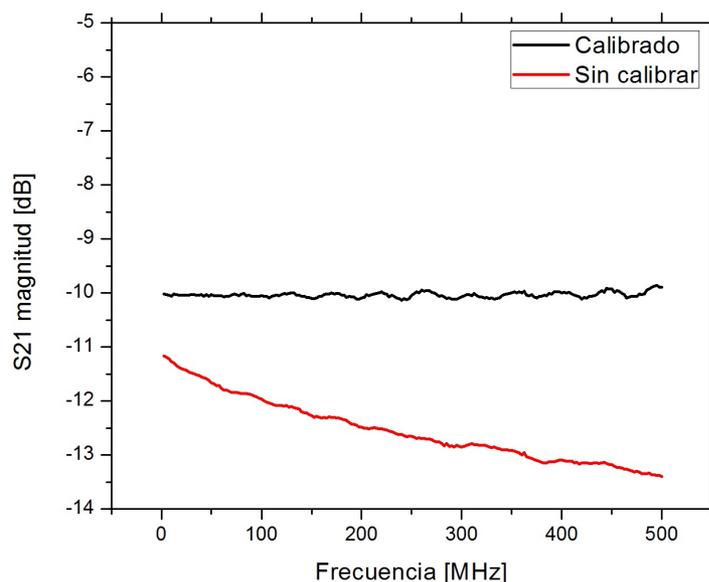


Figura 7: Medición de la transmisión de un atenuador de 10 dB, con el VNA calibrado y sin calibrar. En la medición sin calibrar hay una dependencia de la atenuación con la frecuencia y que este efecto desaparece con la calibración.

4.2. Mediciones con detectores M

Para realizar mediciones comparables con las simulaciones, se fabricó una caja metálica estándar de chapa galvanizada doblada de 4 cm x 6 cm x 3 cm que se observa en la Figura 8. Se colocó a 2,5 mm del fondo de la caja el sustrato dieléctrico en el cual se dibujó el circuito. Se fabricaron 3 circuitos con el defecto en distintas posiciones: una a 0,62 cm de un extremo, otra a 1,87 cm y otra en el centro de la caja, es decir a 2,5 cm. Se utilizó el método de fabricación de circuito impreso con película fotosensible con revelado químico.



Figura 8: Caja estándar con un circuito con un defecto en la línea.

Luego se midieron con el VNA los parámetros S para caracterizar el circuito. Como se observa en la Figura 9, se comprobó que la simulación predijo el comportamiento de la magnitud del parámetro S11 en función de la frecuencia.

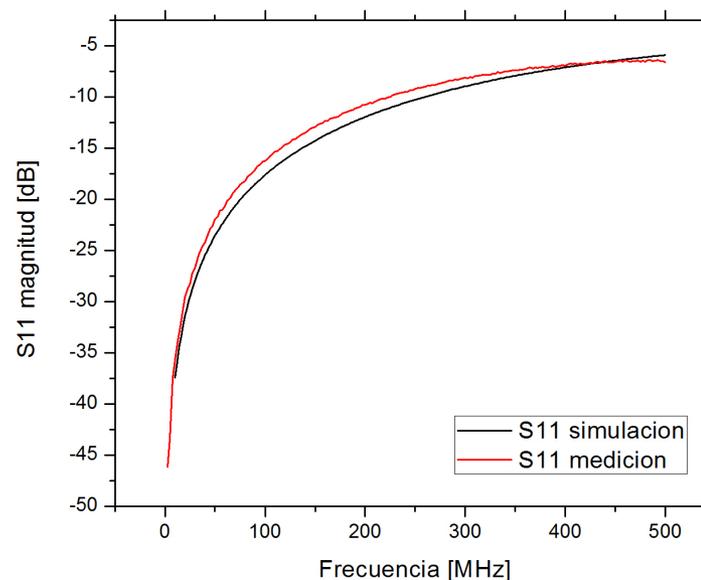


Figura 9: Medición de la magnitud del parámetro S11 de un circuito con defecto en función de la frecuencia, graficado junto con la simulación con el Sonnet.

Para las distintas posiciones del defecto se obtuvieron los resultados que se observan en las Figuras 10 y 11.

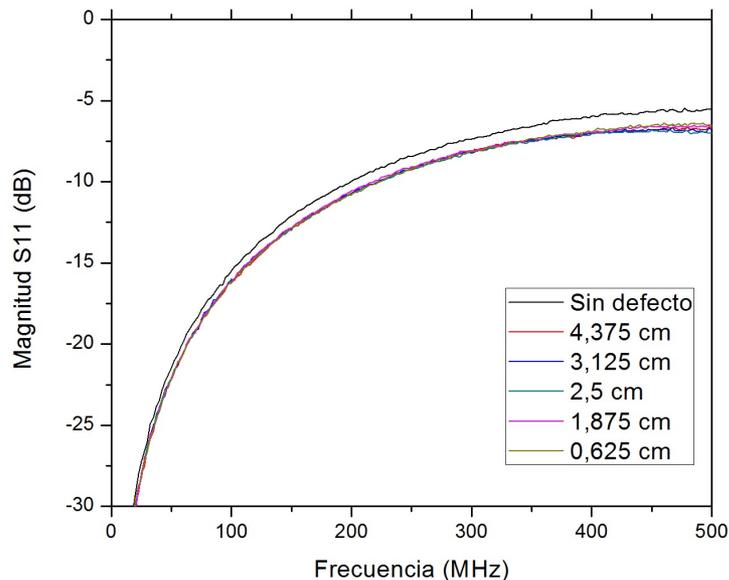


Figura 10: Medición de la magnitud del parámetro S11 de los circuitos con el defecto en distintas posiciones en función de la frecuencia.

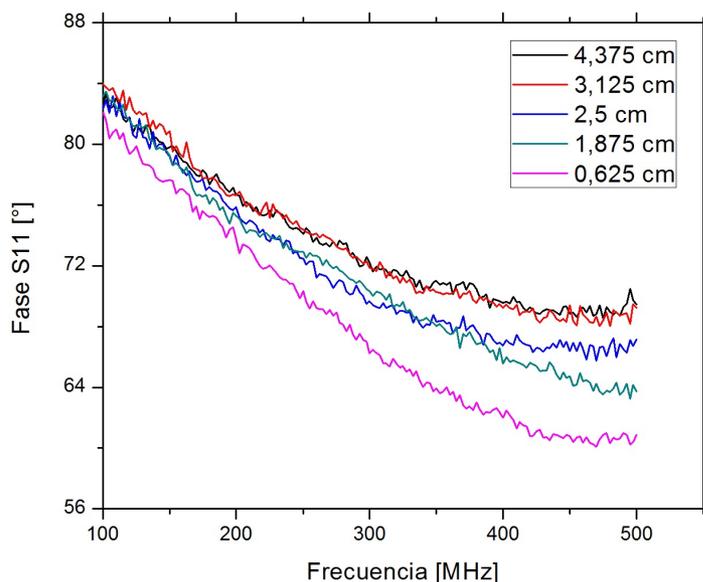


Figura 11: Medición de la fase del parámetro S11 de los circuitos con el defecto en distintas posiciones en función de la frecuencia.

Al igual que en la simulación, se observa que la magnitud del parámetro S11 no variaba significativamente al modificar la posición del defecto. Además se puede ver que para la línea sin defecto la magnitud de la reflexión es menor, como era de esperarse.

Por otro lado, la variación en la fase presenta el comportamiento esperado. Se puede apreciar que la pendiente varía según la posición del defecto y que esta variación es mayor al aumentar la frecuencia. Esto permite identificar la posición del defecto a partir de la fase del parámetro de reflexión. Se observa, además, una ligera tendencia asintótica que se podría estudiar haciendo mediciones a más altas frecuencias. Si bien hay curvas que se cruzan entre sí, esto podría deberse a efectos de la soldadura.

5. Microfabricación de MKIDs

Para hacer los procesos de microfabricación se trabajó en la Sala Limpia, donde se emplearon técnicas de fotolitografía. Inicialmente se fabricaron circuitos con contactos para medir transporte eléctrico y luego se fabricaron 3 detectores MKIDs. Para ello se utilizaron sustratos de vidrio y de silicio.

Antes de hacer litografía se realizó un proceso de limpieza del sustrato. Para ello se sumergió la placa en acetona y se la colocó en un instrumento de ultrasonido durante 3 minutos. A continuación se realizó el mismo procedimiento sumergiendo el sustrato en isopropanol.

Con el objetivo de mejorar la limpieza de los sustratos se utilizó un tratamiento de eliminación química en plasma de oxígeno, ya que era muy importante que el sustrato estuviera lo más limpio posible. Para ello se colocaron las muestras en una atmósfera de oxígeno dentro de un microondas. Al prender el microondas, se formó un plasma de oxígeno que interactuó con la superficie de la muestra, eliminando partículas adheridas a la misma.

5.1. Litografía

La fotolitografía es el procedimiento utilizado en procesos de microfabricación que consiste en transferir el patrón de una máscara a la superficie de un sustrato.

Los procesos comienzan depositando una resina fotosensible sobre el material. Si la resina es positiva, reacciona con la luz ultravioleta causando que el polímero se rompa y sea soluble en la solución reveladora. Para ello se coloca el

sustrato en un Spinner, que consiste en un módulo de giro sobre el que se coloca la muestra y se la sujeta al soporte haciendo vacío. Éste gira a 5500 rpm para que se produzca la dispersión de la resina sobre el sustrato. Gracias a la rotación, la resina queda depositada en una capa muy fina y homogénea. El espesor de la película o capa depende de la viscosidad de la resina y la fuerza centrífuga generada por la velocidad de giro.

A continuación se colocan los sustratos sobre una placa calefactora a 95°C durante 3 minutos. Este recocido permite el curado de la resina mediante la evaporación del disolvente sobrante de la misma y su distribución más homogénea sobre el sustrato.

Después se expone la muestra a luz ultravioleta a través de una máscara en la que está dibujado el patrón deseado. Para una resina positiva, es necesario utilizar una máscara negativa del diseño para que sólo sea iluminado el circuito que se va a revelar. Idealmente la parte oscura de la máscara debería ser totalmente opaca y la parte clara totalmente transparente, para que la luz incida sólo en la zona que se quiere remover.

Para la etapa de exposición se utiliza una alineadora de máscara que permite posicionar el sustrato respecto a la máscara en el momento de la exposición. La precisión en este posicionamiento es crucial para poder alcanzar resoluciones próximas al micrómetro en el dibujo litográfico final.

La alineadora de máscara permite definir el tiempo y el modo de exposición. El tiempo de exposición debe ser el suficiente para que la resina, sobre la que incide radiación UV durante la etapa de exposición, se sensibilice totalmente y el justo para que esto mismo no ocurra a la resina que está cubierta con la máscara. Por difracción de la luz, algo de radiación llega a las zonas cubiertas que están cerca de los bordes.

Se utilizaron dos modos de exposición por contacto. En el modo Soft Contact la muestra está fijada debajo de un soporte por un sistema de vacío y se pone en contacto con la máscara para la exposición. En el modo Hard Contact el vacío que sujeta la muestra es sustituido por una presión de nitrógeno que la empuja contra la máscara para asegurar un mejor contacto.

Después de realizar estos procesos la resina es revelada para que permanezca o se disuelva, dependiendo de si ha sido o no iluminada. Las estructuras dibujadas en la capa fotosensible son transmitidas a la capa depositada en el

primer paso mediante un ataque químico en medio líquido. En esta etapa es muy importante precisar el tiempo en el que se sumerge la muestra en el revelador, el cual está influido por el tiempo de exposición. También depende de la concentración del revelador ya que cuanto mayor es la concentración, menos tiempo tarda en revelarse.

Se utilizó una resina positiva, llamada Microposit. Al principio se fijó el tiempo de exposición en 5 s, se utilizó durante 5 s el modo de exposición Hard Contact y se colocó la muestra en el revelador AZ400 durante 22 s. Luego de fabricar el primer MKID en sustrato de silicio se observó que el tiempo de exposición era insuficiente, por lo cual se aumentó a 5,5 s. Aún así, no se pudo extraer completamente la resina del circuito. Esto hizo que los circuitos no tuvieran continuidad, por lo que no se pudo medir con los MKIDs.

Luego de finalizado el proceso de litografía, se observaron las muestras en un microscopio óptico, obteniéndose imágenes como la que se observa en la Figura 12 para un detector MKID.

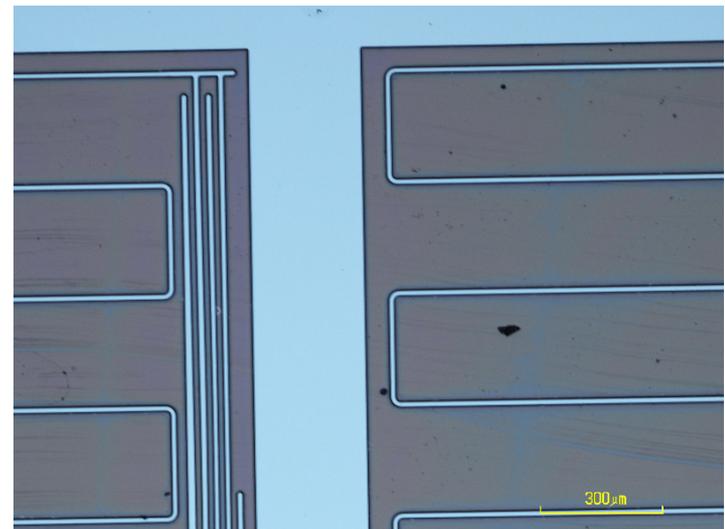


Figura 12: Imagen del microscopio del MKID fabricado con litografía. Las zonas rojas están cubiertas por resina y en las azules la resina fue extraída y se observa el sustrato.

A continuación se colocaron las muestras en una evaporadora para crecer una delgada capa de aluminio sobre el diseño. La evaporadora consiste en una campana en la cual se coloca la muestra a una distancia de 25,2 cm de un evaporador térmico. Éste es una canasta de tungsteno donde se coloca el aluminio que se quiere evaporar. En este ca-

so se utilizaron 48 mg de aluminio. Se estimó esta cantidad de manera que fuera suficiente para que la capa depositada tuviera un espesor de 20 nm.

Antes de comenzar la evaporación, se hizo vacío en la campana con una bomba mecánica y una difusora, que se prendió a una presión menor a 7×10^{-2} Torr. Cuando la presión llegó a $5,5 \times 10^{-5}$ Torr se llenó la trampa de la difusora con nitrógeno líquido. Finalmente se hizo pasar nitrógeno líquido por una serpentina que se encontraba en la campana para mejorar el vacío. Se comenzó a evaporar cuando la presión era menor que 3×10^{-6} Torr. Para ello se utilizó un variac conectado a un transformador, que permitió inyectar en el evaporador térmico una corriente de aproximadamente 15 A. Luego de unos minutos, se evaporó todo el aluminio y se obtuvo una capa en la superficie de las muestras.

Finalmente, el último proceso, denominado Lift Off, consiste en colocar las muestras en acetona en el equipo de ultrasonido. De esta forma se extrae el aluminio sobrante al remover la resina y sólo queda cubierto lo que forma parte del circuito. Se obtuvieron diseños como los que se observan en la Figura 13.

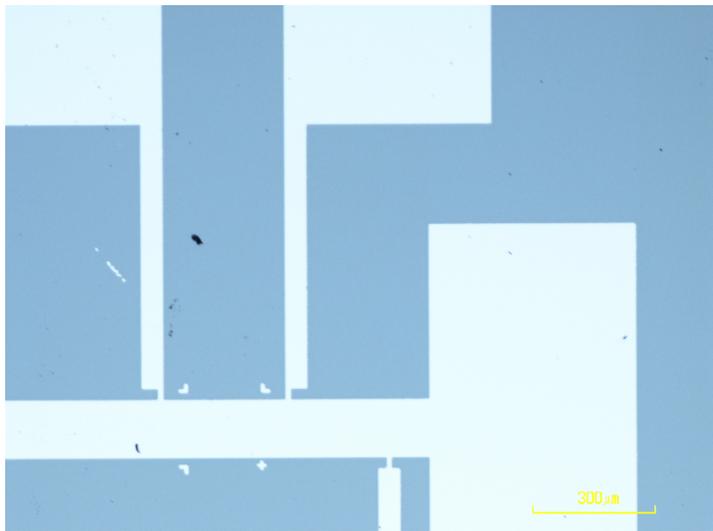


Figura 13: Imagen del microscopio de una circuito fabricado con litografía, luego del proceso de Lift Off. Se observa el extremo de la línea principal.

Se midió el espesor de la capa de aluminio utilizando un perfilómetro óptico. Este instrumento se utiliza para medir cómo varía la altura en una superficie con mucha precisión, utilizando propiedades de la luz dirigida de forma tal que

permite detectar la superficie en 3D. Para reconstruir la rugosidad de la superficie, este instrumento tiene un interferómetro que mide la diferencia de camino óptico entre la superficie de la muestra y una superficie de referencia. En el interferómetro el haz de luz pasa por un divisor de haces, una parte del haz se refleja en la superficie de la muestra y la otra se refleja en un espejo de referencia. Conociendo la longitud de onda y midiendo el patrón de difracción, se pueden calcular las diferencias de altura en la superficie. El software del equipo permite obtener la altura de la superficie en función de la posición. En el caso de los circuitos construidos mediante litografía, se obtuvo que el espesor de la capa de aluminio era de aproximadamente 30 nm.

6. Mediciones a bajas temperaturas

Para caracterizar el comportamiento a bajas temperaturas de los materiales con los que se construyen los MKIDs, se midió la transición superconductoras utilizando una de las muestras construídas mediante litografía. Con uno de los circuitos fabricados junto a los MKIDs se midió la resistencia del aluminio en función de la temperatura.

El circuito consistía en una línea principal con dos contactos a cada extremo y cinco a cada lado de la línea. Se conectaron con pintura de plata cables a los dos contactos de los extremos para hacer circular corriente por la línea y a los dos del centro que estaban más alejados entre sí para medir tensión. De esta forma se midió a 4 puntas la resistencia de la barra de aluminio con muy buena resolución, utilizando un puente de resistencias LR700, que permitía configurar la excitación sobre el circuito. Este instrumento, para medir, invertía la corriente y utilizaba un filtro digital de 10 segundos.

Se colocó la muestra en un portamuestras de un crióstato de dilución, junto a un termómetro Cernox 1030. Se utilizó este termómetro porque tiene buena resolución en el rango de temperaturas en que se encuentra la transición superconductoras del aluminio. En la Figura 14 se observa la disposición de la muestra, junto al termómetro y en contacto con el dedo frío del crióstato de dilución.



Figura 14: Disposición de la muestra en contacto con el dedo frío del crióstato, junto con el termómetro. La muestra se ubica horizontalmente en la parte inferior y dispuestos verticalmente se observan el termómetro y el dedo frío.

6.1. Crióstato de dilución

El crióstato de dilución es un dispositivo criogénico que alcanza temperaturas de hasta 25 mK, utilizando para su funcionamiento una mezcla de ^3He y ^4He . ^3He es un isótopo estable del helio, cuya abundancia natural es de 0,000137 % del helio total en la Tierra. Este isótopo contiene 2 protones y un neutrón, mientras que el ^4He , que es el isótopo más abundante, contiene 2 neutrones.

El crióstato de dilución consiste en un termo externo con nitrógeno líquido a 77 K con un termo interno con una doble pared de vidrio que contiene helio líquido a 4,2 K. En el interior de este termo se encuentra un tubo de metal, llamado IVC, cuyo interior debe estar en vacío durante la medición. Para ello está conectado a una bomba turbomolecular y tiene una bomba de adsorción en su interior. Dentro del IVC se encuentra la cámara de mezcla, donde se juntan los dos isótopos de helio, y la muestra, junto con varios termómetros. En la parte superior hay un recipiente, llamado 1Kpot, que tiene un orificio con un capilar por el cual ingresa una pequeña cantidad de ^4He líquido proveniente del baño en el termo interno. El 1Kpot es bombeado hasta alcanzar una temperatura cercana a 1 K y está en contacto con una zona del circuito por el que pasa la mezcla. Al pasar por el 1Kpot, el gas se condensa y llega líquido a la cámara de mezcla.

Para alcanzar la temperatura base de operación una mezcla de ^3He - ^4He pasa por un circuito cerrado desde la cámara de mezcla hasta las bombas de vacío. Por debajo de 867 mK, se produce una separación de fases en la mezcla entre ^3He y ^4He . En este punto se tiene una fase diluida de ^3He en ^4He y una fase concentrada de ^3He . Esta separación de fases permite alcanzar muy bajas temperaturas evaporando átomos de ^3He que ascienden desde la cámara de mezcla. Al bombear la mezcla, se remueve en su mayor parte ^3He , obteniéndose un paso continuo de átomos de ^3He desde la fase concentrada a la fase diluida. La energía que necesita el ^3He para que se lleve a cabo el cambio de fase la extrae en forma de calor de las paredes de la cámara de mezcla, que están en contacto térmico con la muestra. Finalmente, los átomos de ^3He que se extrajeron de la fase concentrada se renuevan ya que hay un flujo constante de este isótopo. Este procedimiento permite alcanzar la temperatura base del sistema en la cámara de mezcla, que se puede mantener constante fijando un ritmo constante de evaporación y una fracción constante en la concentración de ^3He - ^4He en la cámara de mezcla. El circuito de la mezcla pasa por una trampa sumergida en nitrógeno líquido, que permite condensar gases que no sean helio, para evitar que llegue suciedad a la cámara de mezcla.

Como la transición superconductora del aluminio se encuentra a una temperatura superior a 1 K, que es mucho mayor que las temperaturas que permite alcanzar el crióstato de dilución, se utilizó sólo ^3He para enfriar.

Antes de comenzar a enfriar, se realizó un proceso que consistió en disminuir la concentración de átomos de helio en la pared del termo de vidrio. Para esto, se hizo vacío de mecánica sucesivas veces, luego de cada una se ventó y finalmente se dejó en vacío de mecánica, para que no estuviera en contacto térmico con el termo exterior.

Además se realizaron diversas pruebas previas, ya que el crióstato no había sido usado por varios meses. Inicialmente se verificó que el capilar por el que entra ^4He al 1Kpot no estuviera obstruido, para lo cual se hizo vacío y se verificó el tiempo que tardaba en aumentar la presión. A continuación se presurizó el termo interno con helio líquido y se verificó que todo funcionara correctamente.

Luego se comprobó que el IVC no tuviera pérdidas, ya que durante la medición se debe mantener un buen vacío para evitar el contacto térmico. Para ello, se hizo vacío reiteradas veces y se verificó que el aumento en la presión para un intervalo de tiempo constante disminuyera. Esto

se comprobó, de forma que se concluyó que el aumento en la presión al apagar la bomba se debía a desgase y no a pérdidas.

A continuación se llenó el termo externo con nitrógeno líquido y se dejó enfriando unas horas. Luego, se transfirió helio líquido al termo interno, para lo cual se necesitaba que en el interior del termo hubiera sólo helio. Una vez que la temperatura del 1Kpot alcanzó los 4 K, se comenzó a hacer vacío en el IVC. Para ello, se prendió un calefactor que estaba en contacto con la bomba de adsorción para extraer las moléculas que habían sido previamente adsorbidas y se encendió la bomba turbomolecular hasta alcanzar una presión suficientemente baja. Luego, se apagó el calefactor y la bomba y la presión siguió descendiendo por efecto de la bomba de adsorción.

Para variar la temperatura de la muestra durante la medición se utilizó un controlador PID que regulaba la potencia de un calefactor, de forma que permitía configurar una rampa en temperatura. Con este método se realizó una medición de la transición superconductor del aluminio.

A continuación se realizaron 2 mediciones adicionales de la transición en presencia de un campo magnético, de $H_1 = 20$ G y $H_2 = 66$ G. Para ello se contaba con un imán superconductor, que se conectaba a una fuente de corriente y se prendía un calefactor para cambiar el campo. Al ser un imán superconductor, se apagaba el calefactor y la fuente y el circuito se cerraba, manteniendo constante la corriente ya que en un superconductor no hay pérdidas.

6.2. Transición superconductor del aluminio

Durante la transición superconductor la resistencia decae abruptamente, por lo que es necesario medir con buena resolución en ese rango de temperaturas. Como el equipo está diseñado para trabajar a temperaturas mucho menores a 1 K, resultaba difícil controlar la temperatura de la muestra. Esto hizo que se obtuvieran rampas de temperatura muy abruptas, lo que generaba un aumento o disminución brusco en la temperatura y no se obtenía una buena medición de la transición. Un ejemplo de esto se observa en la Figura 15.

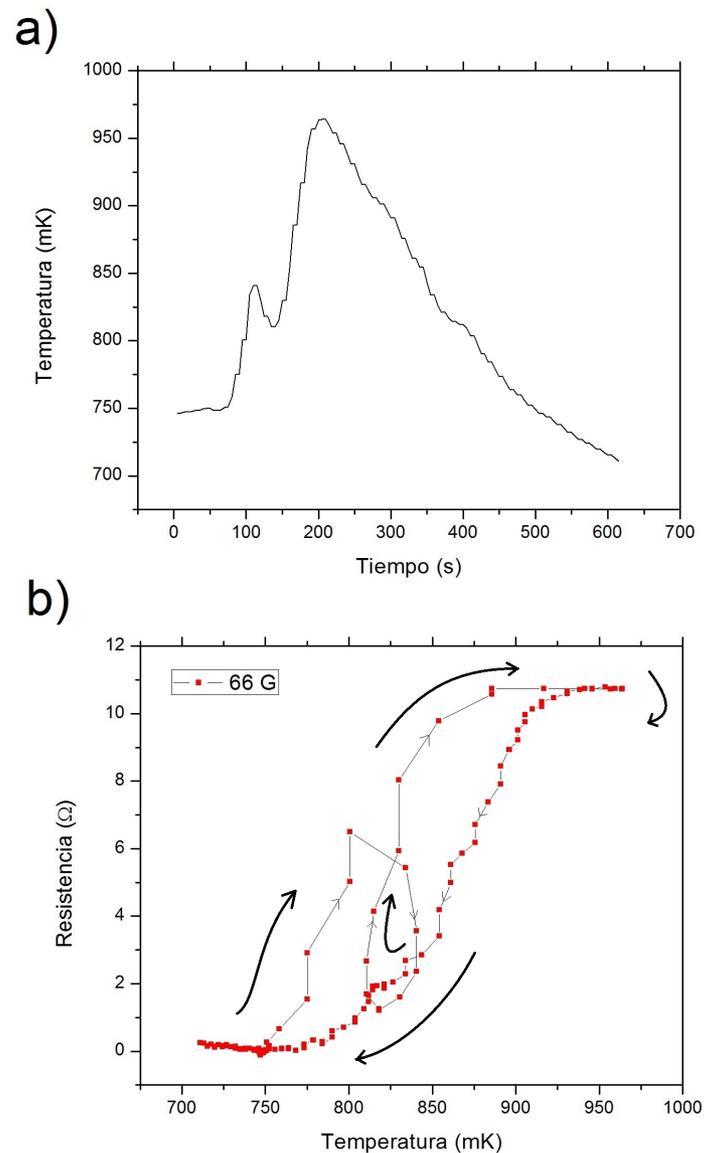


Figura 15: En la Figura a) se observa cómo varía en el tiempo la temperatura de la muestra y en la Figura b) se grafica la dependencia de la resistencia de la barra de aluminio en función de la temperatura, con un campo de 66 G.

En la Figura 15a se observa cómo eran las rampas de temperatura y en la Figura 15b se graficó la dependencia de la resistencia de la barra de aluminio en función de la temperatura. La flecha indica en qué sentido varía la temperatura en el tiempo. En la subida de temperatura, la rampa es muy abrupta y en un momento presenta un cambio en el signo de la pendiente. Esto no permite me-

dir correctamente la transición, debido a que al variar tan rápidamente la temperatura y al ser lento el instrumento de medición, el termómetro no mide la temperatura real a la que está la muestra. Además, hay que tener en cuenta que aunque el termómetro está en contacto con la muestra, puede tardar en llegar al equilibrio térmico y esto también afecta las mediciones muy rápidas. En la bajada de temperatura, en cambio, la transición está mejor definida porque la pendiente de la rampa es menor.

Luego, se midió en un caso particular la transición aumentando y disminuyendo la temperatura de forma controlada, como se muestra en la Figura 16. Se observó histéresis en la transición, lo cual se debe a que el aluminio es un superconductor de tipo I.

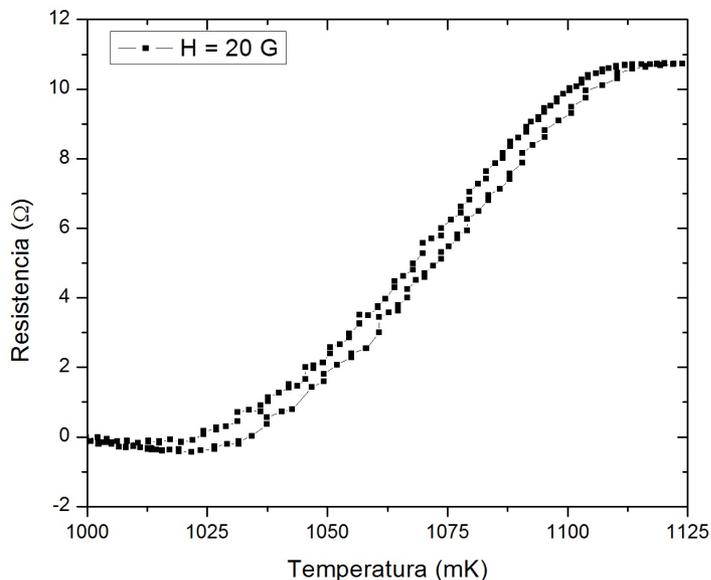


Figura 16: Transición superconductora del aluminio, con la muestra sometida a un campo magnético de 20 G.

A continuación se muestran en la Figura 17 las mediciones de la transición superconductora variando el campo magnético.

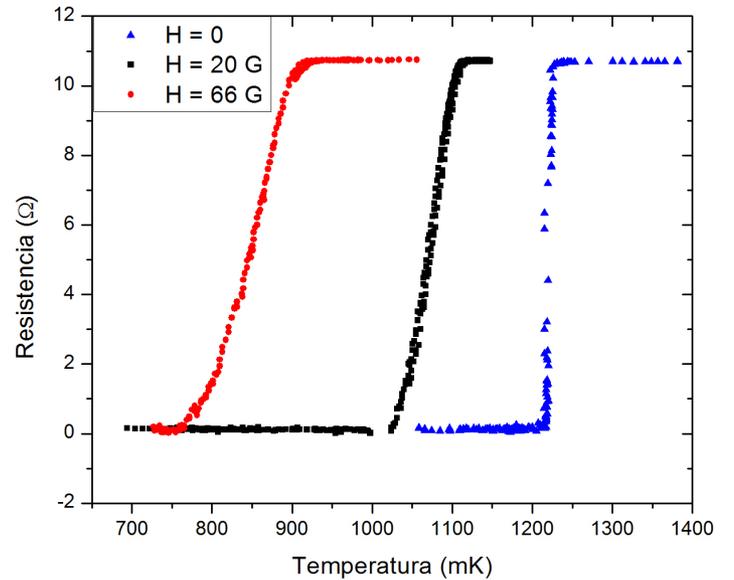


Figura 17: Transición superconductora del aluminio, con la muestra sometida a distintos campos magnéticos.

Para la transición superconductora del aluminio sin campo se obtuvo una temperatura crítica de $T_c = (1220 \pm 7)$ mK. Cabe aclarar que se tomó la temperatura de transición en la mitad de la bajada. A partir de las curvas de la transición, se obtuvo la temperatura crítica en función del campo magnético. Este gráfico se observa en la Figura 18, junto con el ajuste de la curva mediante la ecuación

$$H(T) = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right], [1]$$

donde H_0 es el campo a partir del cual la transición no ocurre para ninguna temperatura y T_c es la temperatura de transición sin campo magnético. Los parámetros del ajuste dieron como resultado $T_c = (1210 \pm 120)$ mK y $H_0 = (120 \pm 20)$ G. El comportamiento observado permite concluir que el aluminio es un superconductor y no sólo un conductor perfecto, debido a que la destrucción de la superconductividad por campos magnéticos es una de las propiedades fundamentales de un superconductor.

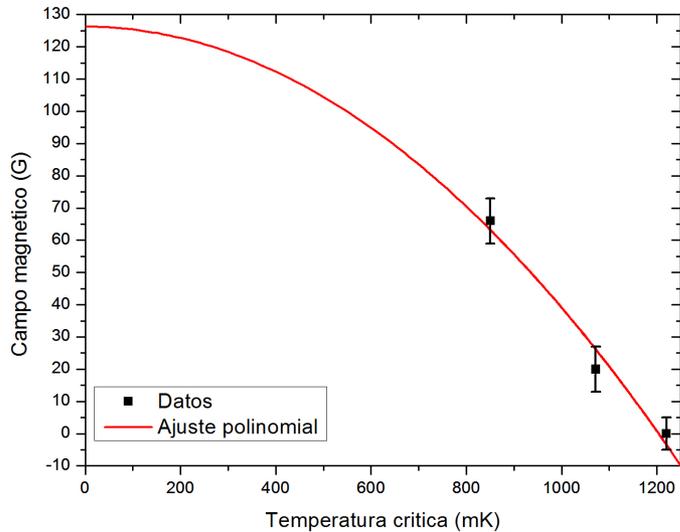


Figura 18: Campo magnético en función de la temperatura de transición, junto con el ajuste con un polinomio de orden 2.

Por último se midió la resistencia durante el ascenso hasta temperatura ambiente. Este gráfico se observa en la Figura 19, donde se nota en particular el abrupto descenso de la resistencia en la temperatura crítica.

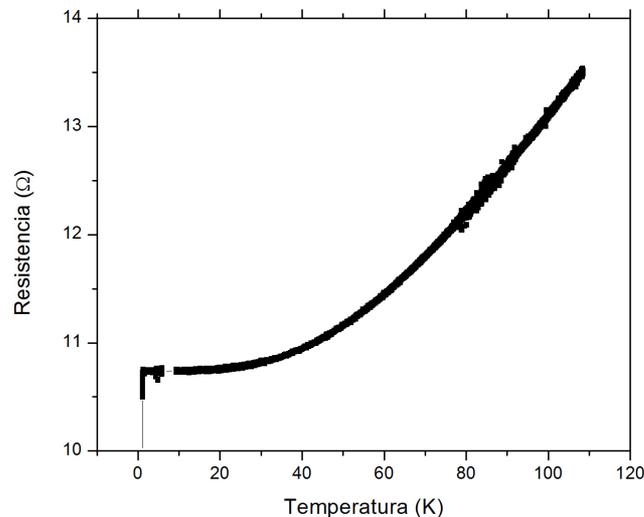


Figura 19: Dependencia de la resistencia de un circuito de aluminio en función de la temperatura.

7. Conclusiones y perspectivas

Se caracterizó un modelo de un detector M que consistía en una línea de transmisión con un defecto en distintas posiciones. Se realizaron simulaciones en las que se observó que la fase del parámetro de reflexión variaba al modificar la posición del defecto y esta diferencia era mayor cuanto más grande era la frecuencia. Luego se fabricaron circuitos con el defecto en 5 posiciones distintas, se midieron con frecuencias de hasta 500 MHz y se observó que los resultados eran compatibles con los de la simulación. Por este motivo se concluyó que estos circuitos permiten, midiendo la reflexión, detectar en qué posición de la línea hay un defecto. Para lograr mediciones más precisas, se observó la importancia de hacer especial enfoque en la calidad de las soldaduras.

Por otro lado, se realizó la simulación de un detector MKID y se observó cómo variaba la transmisión de la línea al modificar la frecuencia de resonancia del detector. Se fabricaron los primeros detectores MKIDs mediante litografía y se observó la importancia de ajustar los parámetros de exposición y revelado. Luego se creció una capa de aluminio sobre las muestras y se midió el espesor utilizando un perfilómetro. Junto con los detectores, se fabricaron circuitos con los mismos materiales y estos fueron caracterizados a bajas temperaturas. Para ello se midió con un crióstato de dilución la transición superconductora del aluminio con las muestras fabricadas simultáneamente a los MKIDs. Con esta medición se obtuvo que la temperatura crítica del aluminio es de $T_c = (1220 \pm 7)$ mK.

La utilización de detectores a alta frecuencia y baja temperatura presentaría múltiples ventajas y las mediciones hechas en este trabajo permiten concluir que la fabricación y la medición con ambos tipos de detectores es posible.

8. Referencias

- [1] B. A. Mazin; Microwave Kinetic Inductance Detectors: The First Decade.
- [2] M. Tinkham, Introduction to superconductivity, 1975.
- [3] J. Hong, M. Lancaster, microstrip Filters for RF/Microwave Applications.
- [4] Introduction to Network Analyzer Measurements, Fundamentals and Background.