



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN AMPLIFICADOR
DE MICROONDAS DE BAJO RUIDO PARA LA BANDA DE 31-45GHz

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRICISTA

CLAUDIO FELIPE JARUFE TRONCOSO

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO MENA MENA

MIEMBROS DE LA COMISION:
LEONARDO BRONFMAN AGUILO
OSCAR MOYA ARAVENA

SANTIAGO DE CHILE

ABRIL 2010



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN AMPLIFICADOR
DE MICROONDAS DE BAJO RUIDO PARA LA BANDA DE 31-45GHz

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRICISTA

CLAUDIO FELIPE JARUFE TRONCOSO

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO MENA MENA

MIEMBROS DE LA COMISION:
LEONARDO BRONFMAN AGUILO
OSCAR MOYA ARAVENA

SANTIAGO DE CHILE

ABRIL 2010

Este trabajo fue realizado con el apoyo del Centro de Excelencia en Astrofísica y Tecnologías Asociadas (PBF 06),
y del fondo ALMA-CONICYT para el desarrollo de la Astronomía Chilena (Proyectos 31080003 y 31080004).

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TITULO DE INGENIERO
CIVIL ELECTRICO
POR: CLAUDIO JARUFE T.
FECHA: 19/04/2010
PROF GUIA: PATRICIO MENA

“DISEÑO Y FABRICACION DE UN AMPLIFICADOR DE MICROONDAS DE BAJO
RUIDO PARA LA BANDA DE 31-45GHz”.

El proyecto ALMA (Atacama Large Millimeter Array) será el más grande arreglo de antenas para interferometría en el mundo. Los receptores para este proyecto están siendo diseñados y fabricados en diferentes laboratorios alrededor del mundo. Los Departamentos de Ingeniería Eléctrica (DIE) y Astronomía (DAS) de la Universidad de Chile están trabajando en un prototipo para el receptor de la llamada Banda1, la cual se encuentra en el rango de 31-45GHz. El objetivo de esta memoria es el desarrollo de la etapa de amplificación de este receptor.

Primero se realizó un diseño basado en estudios previos y simulaciones que permitieron obtener una antena capaz de adaptar una guía de onda rectangular y una línea *microstrip* de 50 Ω . Esta última permite la conexión a un circuito amplificador de bajo ruido basado en transistores HEMT (*High Electron Mobility Transistor*). Luego se diseñó la tarjeta de polarización necesaria para energizar el amplificador. Para terminar, se ideó un bloque conductor en donde posteriormente se empaquetarán los componentes antes mencionados.

Una vez terminado el diseño se fabricaron el bloque completo, las antenas y el circuito de polarización utilizando la fresadora con control numérico por computador (CNC) adquirida por el DAS. Después se montaron los componentes fabricados en el bloque y se realizó la conexión eléctrica a un circuito amplificador adquirido comercialmente utilizando una Máquina Soldadora de Precisión (Bonding Machine) adquirida por el DIE.

Finalmente, para estudiar el comportamiento del amplificador ya empaquetado se midió la ganancia en un Analizador Vectorial de Redes, obteniéndose un promedio de 15dB en todo el ancho de banda. La respuesta del amplificador es concordante con las especificaciones comerciales del circuito HEMT (que son tomadas sin empaquetamiento del mismo). Se incluyen además modificaciones al diseño preliminar que pueden facilitar la fabricación de futuras versiones.

Índice general

1. Introducción	6
1.1. Objetivos	7
1.2. Estructura del presente trabajo	7
2. Marco Teórico	9
2.1. Interferometria	9
2.2. Proyecto Alma	11
2.3. Banda 1	12
2.4. Diseño propuesto del receptor	14
2.5. Transistores HEMT	15
3. Diseño y simulaciones	18
3.1 Amplificador ALH376	18
3.2 Antenas de adaptación	22
3.3 Polarización del ALH376	26
3.3.1 Diseño del circuito externo	26
3.3.2 Diseño del circuito interno	27
3.4 Diseño del bloque	28
4. Fabricación	31
4.1 Bloque de Prueba	32
4.1.1 Diseño del bloque de prueba	32
4.1.2 Maquinado del bloque de prueba	34
4.1.3 Fabricación y montaje de la antena	35
4.1.4 Mediciones y resultados	37
4.2 Bloque final	43
4.2.1 Diseño del bloque final	43
4.2.2 Maquinado del bloque final y las antenas	44
4.2.3 Fabricación del circuito de polarización	45
4.2.4 Montaje del amplificador y las antenas.	46
4.2.5 Montaje del circuito de polarización	48

4.2.6 Bounding Machine	.	.	.	.	.	.	.	50
4.2.7 Conexión del ALH376	.	.	.	.	.	.	.	52
5. Resultados	.	.	.	.	.	.	.	55
6. Conclusiones y Recomendaciones	.	.	.	.	.	.	.	59
Referencias	.	.	.	.	.	.	.	61

Capítulo 1

Introducción

La radio astronomía es una rama de la astronomía que se dedica al estudio del espacio exterior utilizando información recibida en la Tierra por medio de radiación electromagnética de frecuencias que van desde los 10MHz hasta los 1.5THz. En la actualidad existen radio telescopios que permiten obtener observaciones con una resolución imposible de obtener con otros medios.

Muchos de los fenómenos astronómicos observados han permitido reafirmar y corroborar principios físicos teóricos. Nuevos métodos de observación y mediciones de mayor calidad permitirán evaluar teorías aun inciertas que requieren mejores tecnologías para poder ser validadas.

Uno de los proyectos más ambiciosos en desarrollo a nivel mundial es el proyecto ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*), el cual será el radio telescopio más grande y con mayor precisión en el mundo en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas. Interconectará más de 50 antenas con líneas de base de hasta 10km para poder explorar el espacio con precisión.

El proyecto ALMA se realiza en el norte de Chile, específicamente en las cercanías de San Pedro de Atacama. Esta ubicación fue elegida debido a la gran altitud y baja cantidad de humedad presente en el aire, lo cual permite que la absorción de las señales por parte de la atmósfera sea mínima.

Distintas naciones están involucradas en el proyecto, tanto en la fabricación de las antenas como de los receptores, gran parte del éxito de ALMA radica en incorporar receptores y antenas que estén a la altura del proyecto.

En el marco del proyecto ALMA, los departamentos de Ingeniería Eléctrica y Astronomía de la Universidad de Chile están trabajando en conjunto para fabricar un prototipo del receptor de

la Banda 1 en el Laboratorio de Ondas Milimétricas del Observatorio Astronómico Nacional en Cerro Calan. Actualmente existe un grupo de estudiantes, tanto de doctorado como de pregrado, trabajando intensamente en las distintas etapas del receptor.

El trabajo de esta memoria es diseñar y luego fabricar la etapa de amplificación del receptor de la banda 1. Para el diseño se utilizara el programa de simulaciones electromagnéticas HFSS, en éste se deben considerar tanto los requerimientos eléctricos, para el correcto funcionamiento, como las restricciones mecánicas que impone la tecnología disponible. Una vez terminado el diseño se describirá la fabricación del amplificador.

Finalmente se presentan los resultados y pruebas realizadas al amplificador, incluyendo recomendaciones para un mejor desarrollo de versiones posteriores.

1.1 Objetivos

Los objetivos específicos de esta memoria son los siguientes:

- Diseñar un amplificador de bajo ruido para la banda de 31 a 45GHz, utilizando los elementos disponibles en los laboratorios del DIE y del DAS. El diseño debe cumplir con los requisitos eléctricos y mecánicos para su fabricación
- Fabricar el amplificador diseñado.
- Realizar las pruebas necesarias que permitan comparar las mediciones obtenidas con resultados esperados.

1.2 Estructura del presente trabajo

En el capítulo 2 se destaca la relevancia del proyecto que se desea construir y la motivación de este. Luego se especifica y explica el rango de frecuencias de interés que se desean cubrir con el receptor. Posteriormente se procede a explicar la solución general propuesta para desarrollar el receptor de la Banda 1. Por último, se realiza una descripción detallada del funcionamiento de los transistores HEMT con los cuales trabaja el amplificador.

En el capítulo 3 se presenta el diseño final del amplificador y los resultados obtenidos de las simulaciones, además se explican detalladamente las características del diseño y las razones que lo motivan.

En el capítulo 4 se detallan los pasos a seguir para realizar la fabricación de cada una de las piezas del amplificador y el posterior ensamblaje para obtener el amplificador final.

En el capítulo 5 se presentan las pruebas realizadas al amplificador para poder obtener su comportamiento y se comparan los resultados con los valores esperados.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan conclusiones finales y recomendaciones para mejorar el amplificador construido.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Interferometría

Durante la mayor parte de la historia, la ciencia de la astronomía ha estado gobernada por la zona óptica del espectro. Sin embargo el descubrimiento de la radio emisión galáctica por Karl Jansky en los años 1930 abrió la ciencia a nuevas áreas [1]. Las ondas de radio ofrecen numerosas ventajas sobre las observaciones ópticas tales como la capacidad de obtener datos durante el día o la simple disponibilidad de más líneas espectrales de estudio. Uno de los principales problemas en radio astronomía es la resolución alcanzada por un telescopio de una sola antena, la cual es proporcional a la longitud de onda dividido por el diámetro de apertura. Como las longitudes de onda de las ondas de radio son $\sim 10^7$ veces mayores a las longitudes de ondas ópticas, la resolución disminuye en la misma medida. Desde un punto de vista constructivo, es más simple construir una antena amplia para radio observaciones ya que la superficie puede ser más rugosa que en un telescopio óptico y aun así preservar la integridad de la radiación medida [1]. Sin embargo, esto no es suficiente para resolver el problema de baja resolución angular, ya que con un telescopio de 4 metros se pueden obtener resoluciones del orden de $0.03''$ en longitudes de onda ópticas, mientras que el radio telescopio Arecibo, con 305 metros de diámetro, posee una resolución angular del orden de solo $3''$.

Para resolver este problema, los radio astrónomos utilizan una técnica llamada Interferometría. Combinando señales de dos antenas, los objetos pueden ser observados como si la resolución angular no fuese determinada por el radio de la antena, si no por la separación entre estas dos antenas. Por lo tanto se pueden alcanzar resoluciones mucho mejores a las obtenidas con mediciones ópticas sintetizando imágenes utilizando múltiples antenas [1],

El principio en el cual se fundamenta la interferometría es el comportamiento ondulatorio de la luz. Si dos ondas en fase recorren caminos de distintos largos al mezclarse crearán un patrón de interferencia. Tal como en el experimento de la doble rendija de Young, existen áreas de interferencia constructiva, las cuales ocurren cuando las ondas poseen fases similares y zonas de interferencia en las cuales las ondas poseen desfases cercanos a 180° . El patrón de intensidad recibido depende del ancho de las rendijas y la separación entre éstas.

Si un interferómetro simple de dos elementos es apuntado hacia una fuente de emisión, las ondas generalmente alcanzarán una antena antes que la otra, por lo tanto, existirá una diferencia de caminos entre las ondas al llegar al interferómetro generando un “retraso geométrico” τ [2]. Muchas veces los instrumentos también agregan un retraso τ_i para corregir el ángulo de dirección. En la figura 2.1 se puede observar una representación del esquema de las antenas.

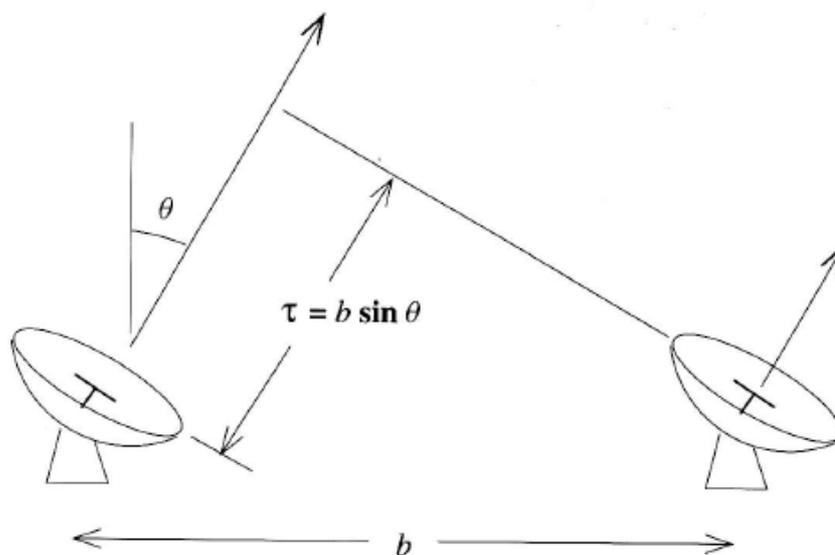


Figura 2.1: Esquema de antenas para un interferómetro de dos elementos [1].

El retraso geométrico es $\tau = \mathbf{s} \cdot \mathbf{b}/c$, donde \mathbf{s} es un vector que apunta a la fuente y \mathbf{b} el vector que separa las antenas [1].

Para una separación entre antenas dada, la luz proveniente de una zona de la fuente alcanza cada antena luego de haber viajado más que la luz emitida de otro punto de la fuente, por lo tanto, ambas señales llegan con una diferencia de fases $\Delta\Phi$. Las antenas con mayor separación son

sensibles a estructuras más pequeñas en el cielo, y por lo tanto poseen una medición de $\Delta\Phi$ distinta a antenas con menor separación. Esta diferencia de fase corresponde a la transformada de Fourier de la separación física en el cielo [1].

Los diseños de muchos interferómetros modernos extienden el interferómetro de dos elementos a arreglos de telescopios trabajando al unísono. En estos casos, las mediciones obtenidas permiten resolver estructuras de pequeño tamaño angular variando la separación entre las antenas.

2.2 Proyecto ALMA

El más ambicioso proyecto en construcción en radio astronomía es el ALMA, un proyecto conjunto de Norte América, Europa y Asia del Este. ALMA será construido en el Norte de Chile a 5km de altura sobre el nivel del mar. Consistirá en un arreglo de 54 antenas de 12 metros y doce antenas de 7 metros operando en 10 bandas entre 31GHz y 950GHz. El proyecto ALMA es mucho más ambicioso que el VLA (*Very Large Array*) ubicado en Estados Unidos, ya que los receptores de ALMA serán mucho más complejos, las antenas más precisas y la alta ubicación del lugar permite mejores observaciones. Al máximo espaciamiento entre antenas ($\sim 14\text{km}$), y menor longitud de onda ($\lambda=0.32\text{mm}$), la resolución angular será del orden de $0.005''$ [3].

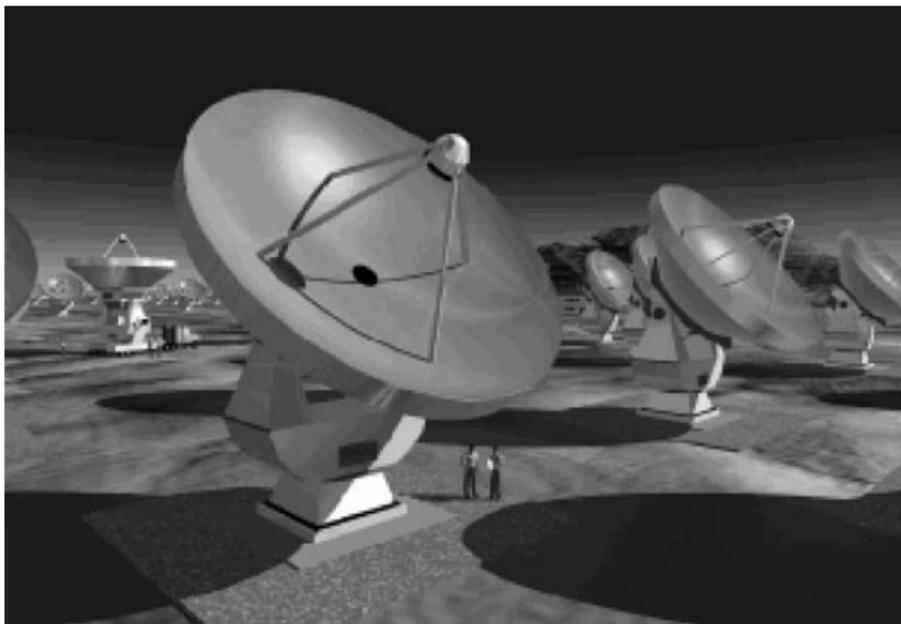


Figura 2.2: Proyecto ALMA que se lleva a cabo en el norte de Chile [13].

2.3 Banda 1

Dentro del espectro de frecuencias que pretende estudiar el proyecto ALMA se encuentra la zona que va desde los 31.3 GHz a 45GHz, la denominada Banda 1.

Transiciones Moleculares

Dentro del espectro de la Banda 1 existen una serie de moléculas que pueden ser detectadas. La interferometría permite detectar fácilmente estas moléculas. En la tabla 2.1 se presentan algunas moléculas con transiciones encontradas en la Banda 1.

Molécula	Frecuencia[MHz]
HC₅N	31.951
HC₅N	39.939
HCCCN	36.481
CH₃OH	37.703
C₄H	38.049
³⁰SiO	42.373
SiO	42.519
SiO	43.122

Tabla 2.1: Principales líneas de transición observadas en el espectro de la Banda 1 [4]

Emisiones de CO

El hidrógeno molecular (H₂) es el gas molecular más abundante en el universo pero no posee una transición para poder estudiarlo directamente. El monóxido de Carbono (CO) sirve para rastrear el H₂ y es la segunda molécula más abundante en el espacio. Estudiando las emisiones del CO se puede caracterizar el H₂. Las emisiones de CO son a frecuencias mayores a 100GHz, pero el efecto Doppler provoca que las líneas se muevan a frecuencias menores, por ejemplo, el corrimiento de CO (1-0) varía entre 2.8 y 1.5 en el rango de la Banda 1.

El estudio del gas molecular con alto corrimiento permite entender las condiciones físicas y el proceso de formación de estrellas en inicios de galaxias.

Efecto Sunyaev-Zel'dovich

El efecto Sunyaev-Zel'dovich (SZ) provoca un cambio en el brillo aparente de la radiación de fondo de microondas (CMB) al pasar a través de un *cluster* de galaxias o cualquier otra acumulación de electrones de alta energía (ver figura 2.3). Estos *clusters* poseen electrones libres con temperaturas mayores a 10^7K emitiendo en el rango de los rayos X. Al combinar los mapas de emisión de rayos X y la absorción SZ se pueden estimar distancias, sin necesidad de realizar suposiciones acerca del corrimiento al rojo y por lo tanto, estimar la constante de Hubble [13]. Además, utilizando la gran resolución angular que puede alcanzar ALMA será posible estudiar subestructuras en agrupaciones de galaxias

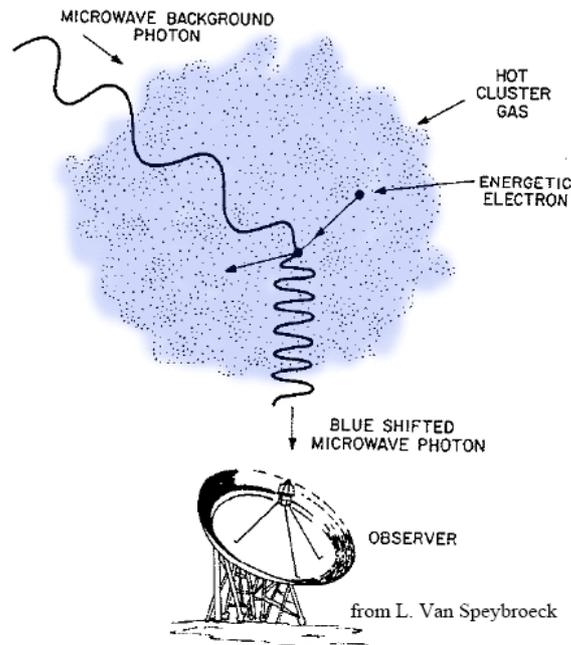


Figura 2.3: Efecto ZS.

2.4 Diseño Propuesto para el Receptor

La figura 2.4 presenta el diseño propuesto para el receptor de la banda 1. La señal de radio es acoplada al receptor por medio de la bocina y un lente. Dos filtros infrarrojos, uno a 15K y otro a 80K, previenen que la radiación infrarroja entre al receptor y caliente el termo. Luego viene la bocina, la cual se encarga de atrapar la señal libre y canalizarla a través de una guía de onda circular permitiendo la propagación de ambas polarizaciones.

La guía de onda circular se convierte en guía de onda cuadrada que se conectara al transductor de modos ortonormales (OMT), éste es un elemento pasivo que permite separar dos señales con distinta polarización que se encuentran en una misma guía de onda y entregara cada una de las señales en una guía distinta. Cada polarización es procesada por un receptor distinto.

La señal se amplifica 30 a 40dB para permitir el uso de mezcladores Schottky comerciales a temperatura ambiente. Los amplificadores que se utilizaran se basan en transistores HEMT que permiten las mejores temperaturas de ruido para frecuencias bajo 100GHz.

Los aisladores ubicados antes de cada amplificador previenen la presencia de ondas estacionarias entre las etapas de amplificación y entre el amplificador y el OMT. El proceso de bajada de frecuencia se realiza mediante un mezclador de diodos Schottky usando un esquema “*Upper Side Band*” (USB). Finalmente, la señal de frecuencia intermedia es amplificada por un amplificador de bajo ruido a temperatura ambiente.

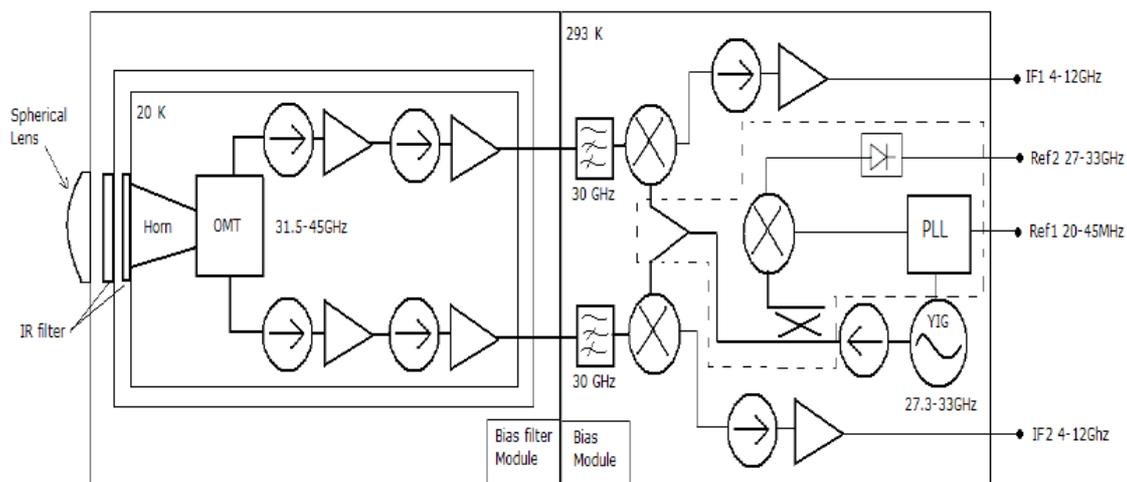


Figura 2.4: Esquema del receptor de banda 1 propuesto

Las principales contribuciones al ruido se general en las etapas óptica y de amplificación. Si el amplificador logra tener la ganancia deseada el mezclador puede funcionar a temperatura ambiente. Así mismo, la contribución de ruido de la etapa de bajada de frecuencia no es relevante.

2.5 Transistores HEMT

Una de las etapas del receptor de la banda 1 es la etapa de amplificación, en la cual se utilizara un amplificador de bajo ruido basado en transistores HEMT.

- **Transistores FET**

Una simple extensión de la clásica juntura p-n es la combinación de tres capas de portadores, p-n-p, el llamado “sándwich” que corresponde a un transistor FET (*Field Effect Transistor*) de tres compuertas: *source*, *drain* y *gate*. En los FET el campo eléctrico aplicado a la compuerta, *gate*, controla el flujo de corriente entre el *source* y el *drain*. Pequeñas variaciones de tensión en *el gate* tienen grandes efectos en la corriente que fluye desde *source* a *drain*, por lo tanto actúa como amplificador.

Cuando un dispositivo FET se encuentra en estado de conducción los portadores que transitan a través del canal de conducción sufren un proceso de *scattering* con la red cristalina del transistor, o bien, con las impurezas del sustrato. Estos choques disminuyen la movilidad de los portadores restringiendo la frecuencia máxima a la que puede operar el transistor. Por otro lado, estos choques generan ruido ya que incrementan la energía cinética de la red cristalina y por lo tanto la temperatura del transistor. Además, se generan portadores que, después de haber chocado, se mueven en forma aleatoria. Por lo tanto, el *scattering* limita la frecuencia de operación y además aumenta la temperatura de ruido.

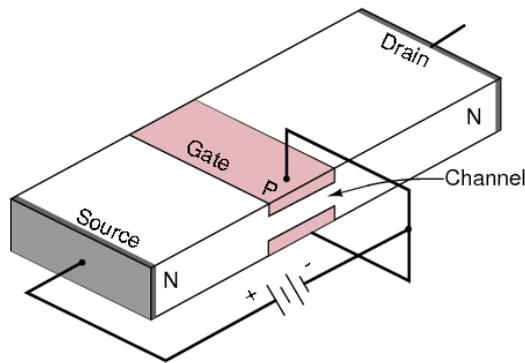


Figura 2.5: Esquema de un transistor FET. [15]

- **Transistores HEMT**

Los amplificadores HEMT corresponden a una evolución de los FET, los principales objetivos del transistor HEMT son:

- Obtener un amplificador de bajo ruido
- Operar a altas frecuencias ($\sim 100\text{GHz}$).

En los transistores HEMT, los portadores de cargas están presentes en un canal pequeño. Este confinamiento de los portadores se logra ubicando el canal como una interfaz entre dos materiales. En los primeros HEMT se utilizaba GaAs y AlGaAs para generar la interfaz. En la figura 2.5 se puede observar el esquema de un HEMT. El AlGaAs contribuye con electrones los cuales solo se difunden una pequeña distancia dentro del GaAs debido al espacio de las cargas positivas en el AlGaAs, por lo tanto los electrones están confinados a una pequeña capa de ancho de 10\AA , al igual que en un pozo de potencial. Este confinamiento genera un gas de electrones bidimensional. Esta región está denotada como “channel” en la figura 2.6.

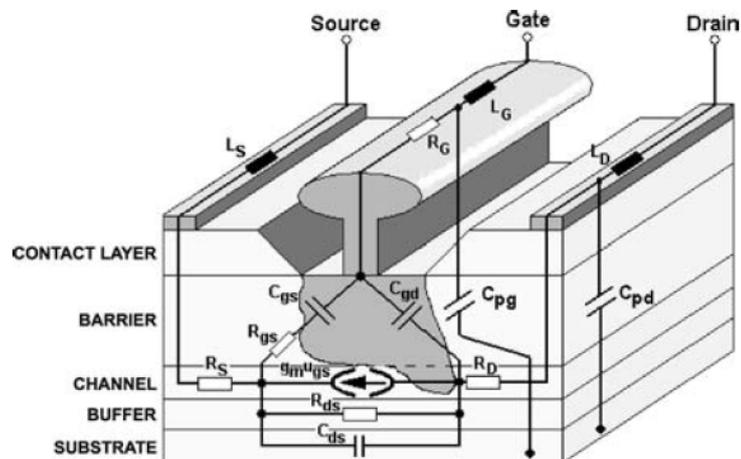


Figura 2.6: Esquema de un transistor HEMT. La zona oscura e irregular representa el campo eléctrico del gate. Los valores de R, L y C representan impedancias internas del transistor.

El flujo en regiones que contienen iones dopados da lugar a un gran *scattering* de electrones. Debido a que los portadores están ubicados en una capa bidimensional donde no existen iones dopados, existe menos *scattering* y por lo tanto menos ruido. Al enfriar el transistor, hay una mejora significativa en el ruido debido a que la principal contribución proviene de los fonones, los cuales dependen fuertemente de la temperatura.

Para extender la operación del HEMT a altas frecuencias, se debe aumentar la movilidad de los electrones y la velocidad de saturación. Una reducción en el *scattering* debido a iones dopados genera una alta movilidad y por ende rápidos tiempos de transmisión, además disminuye el ruido. La máxima velocidad de saturación es el límite del valor de la velocidad de los portadores a medida que se incrementa el voltaje *drain-source*. Reduciendo el *scattering* y aumentando la velocidad de saturación se obtienen mayores frecuencias de operación [14].

Capítulo 3

Diseño y Simulaciones

El diseño consiste en un bloque de bronce que permite empaquetar un amplificador comercial basado en transistores HEMT. El empaquetamiento tiene como objetivo ser un soporte para el amplificador, canalizar adecuadamente la señal de entrada hacia el amplificador, polarizar el elemento activo y luego dirigir correctamente la señal amplificada hacia la salida.

Las simulaciones se realizaron en el programa *High Frequency Structural Simulator* (HFSS) [6]. Este programa de la compañía Ansoft permite estudiar estructuras electromagnéticas utilizando el método de elementos finitos.

3.1 Amplificador ALH376

Para el desarrollo del prototipo se seleccionó un amplificador comercial. El amplificador que se utilizará corresponde al modelo ALH376: un circuito integrado monolítico de microondas (MMIC) de Arseniuro de Galio (GaAs) basado en transistores HEMT fabricado por la compañía HITTTITE. Es un amplificador de bajo ruido que opera entre 35 y 45GHz con una ganancia superior a 12dB. En la figura 3.1 se puede observar la ganancia del amplificador en función de la frecuencia de la señal de entrada. Esta medición de la ganancia es sin empaquetamiento, es decir, midiendo la ganancia directamente en los terminales de entrada/salida del ALH376 [7].

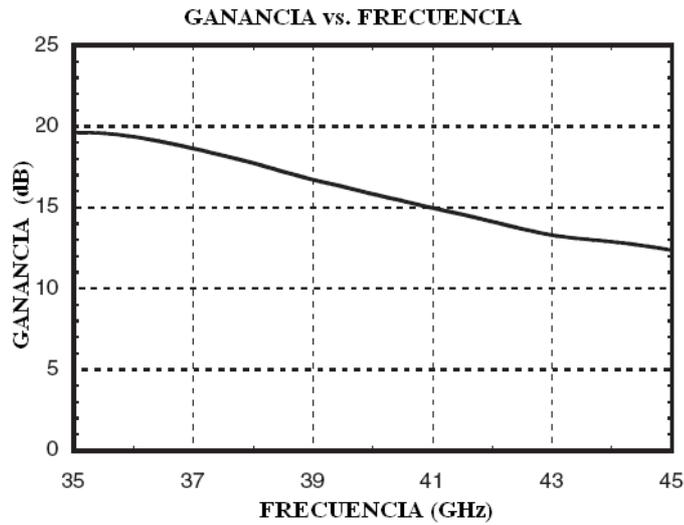


Fig. 3.1: Curva de Ganancia en función de la frecuencia del amplificador ALH376.

Si bien siempre es deseable la mayor ganancia posible en el amplificador, todos los componentes electrónicos generan un ruido que se suma a la señal. Por lo tanto es importante que entregue la menor cantidad de ruido y distorsión de modo que se obtenga la señal sin problemas en la etapa posterior. La principal fuente de ruido se debe a excitaciones térmicas de los electrones en el interior del aparato, este ruido depende directamente de la temperatura. La figura de ruido (NF) permite medir la relación señal-ruido (SNR) del componente. En la figura 3.2 se presenta la curva de ruido para el ALH376.

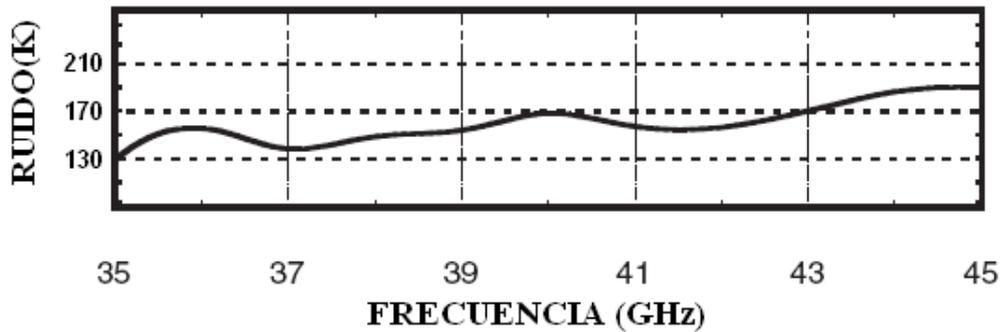


Fig. 3.2: Figura de ruido para el amplificador ALH376.

En la figura 3.3 se puede observar una foto del amplificador y un esquema de los *pads* de entrada y salida.

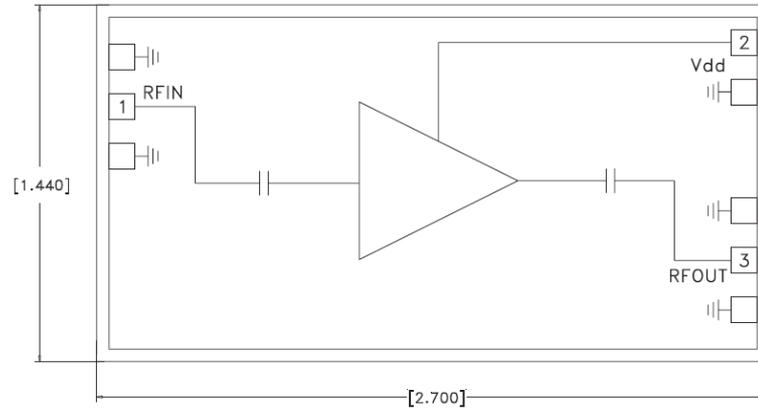


Fig. 3.3: Esquema del amplificador. Sus dimensiones son: 1.44 x 2.7 x 0.15 mm³.

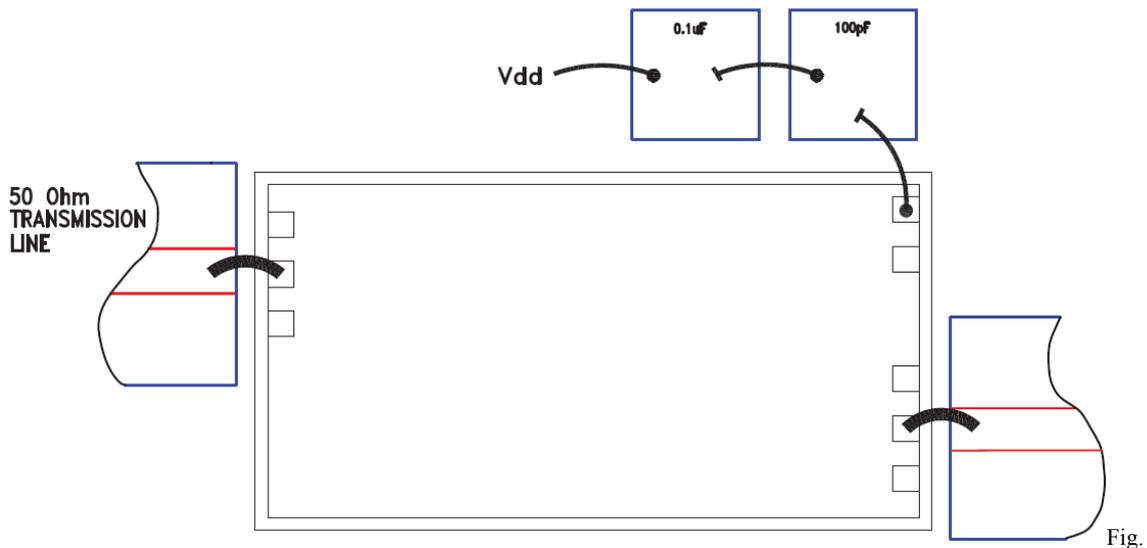
Los *pads* de conexión que posee el MMIC son los siguientes:

1. Entrada,
2. Polarización.
3. Salida

La parte posterior del MMIC corresponde a la conexión a tierra (tanto de la señal como de la polarización) la cual debe ser adherida directamente al plano de tierra. El montaje se debe realizar aplicando una cantidad mínima de pegamento de tal forma que solo se vea una pequeña capa en el perímetro del MMIC.

Para obtener la mayor transmisión posible de la señal que viene desde el OMT hacia el amplificador el diseño debe ser tal que la impedancia de entrada de la línea esté adaptada con la impedancia de entrada del amplificador. De este modo se eliminan las ondas estacionarias entre el OMT y el amplificador. La impedancia de entrada del ALH376 es 50Ω.

El ALH376 solo requiere una fuente de 4V y 87mA para funcionar. Para aislar la señal del polarización de la señal que se desea amplificar es necesario utilizar condensadores de desacoplo, los cuales deben ir ubicados lo más cerca del pad de polarización del MMIC. Las especificaciones del fabricante recomiendan dos condensadores, uno de 100pF cercano al pad de polarización y luego uno de 0,1uF. En la figura 3.4 se puede observar el esquema del montaje.



3.4: Diagrama del montaje del ALH376 [7].

En el esquema de la figura 3.4 los condensadores corresponden a condensadores cerámicos mono capa, estos condensadores poseen una cara frontal que corresponde a la tensión aplicada y la parte posterior corresponde a tierra -al igual que el ALH376- siendo ideales para aplicaciones de microondas. Los condensadores monocapa permiten un mejor orden en la tarjeta de polarización y poseen menor tolerancia. En Chile no es posible encontrar este tipo de condensadores y el tiempo de envío retrasa el proyecto, además el ALH376 puede funcionar con condensadores superficiales [16]. Los condensadores deben ser cerámicos y estar ubicados a menos de 0.762mm del pad. La separación nominal entre el MMIC y las líneas de entrada y salida debe ser 0.0762mm [7].

Es importante destacar el ALH376 posee puentes aéreos frágiles y no debe ser tocado con pinzas o dedos en su superficie. El manejo del MMIC debe realizarse por los bordes utilizando pinzas finas.

3.2 Antenas de adaptación

La antena es la encargada de tomar la señal proveniente desde el OMT y canalizarla hacia el amplificador. La señal entregada por el OMT viaja a través de una guía de onda rectangular de medidas 5.69mm x 2.85mm (conocido como estándar WR22) la cual permite la transmisión de las frecuencias de la Banda 1. La señal debe ser entregada al amplificador mediante una línea *microstrip* con impedancia de 50Ω .

Para que no existan reflexiones entre la salida del OMT y la entrada del amplificador, la antena debe ser capaz de adaptar lo mejor posible la guía de onda cuadrada y la línea *microstrip* de 50Ω en todo el ancho de banda. Las geometrías de ambas líneas de transmisión hacen imposible que no existan reflexiones por lo tanto bastará con que el coeficiente de reflexión sea menor a -20dB desde 31 a 45GHz.

El diseño se basa en el trabajo realizado por Kooi, J.; Chattopadhyay, G.; et cols [8]. La geometría preliminar utilizada se puede observar en la figura 3.5

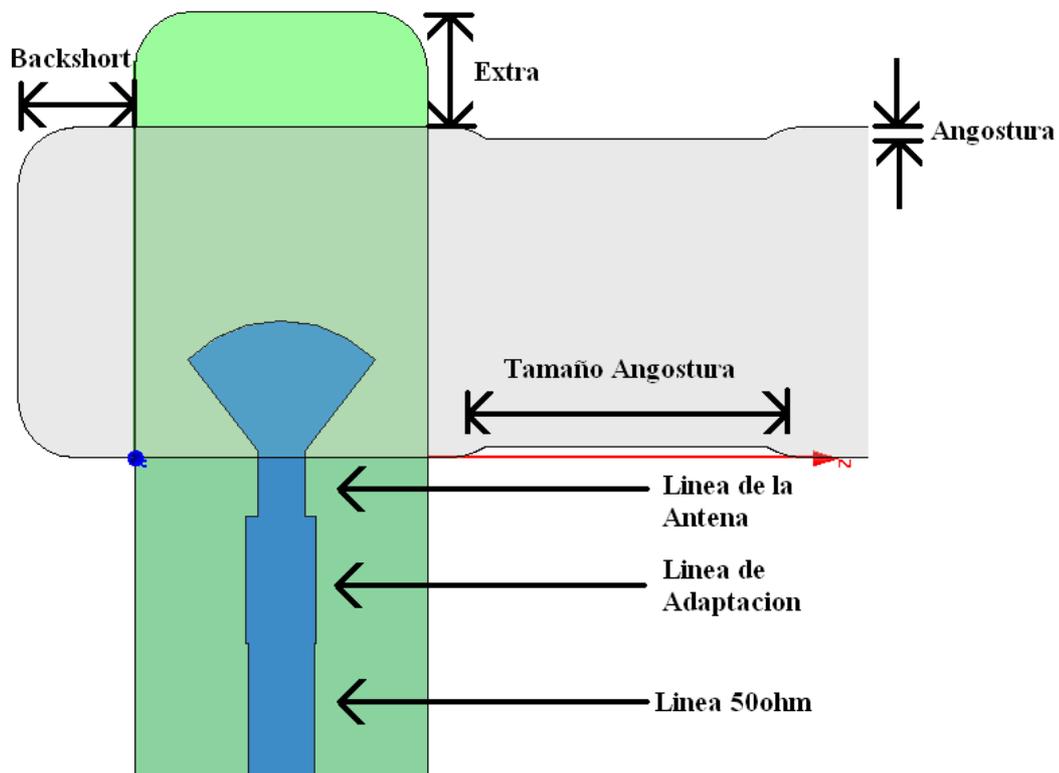


Fig. 3.5: Diseño preliminar de la antena radial, se pueden observar las medidas relevantes en el diseño

En el diseño se pueden distinguir las siguientes variables:

- Backshort.
- Espesor del aire.
- Espesor dieléctrico.
- Ancho del dieléctrico.
- Ancho línea de la antena.
- Ancho línea de adaptación.
- Ancho línea de 50Ω .
- Extra.
- Angostura.
- Tamaño Angostura.

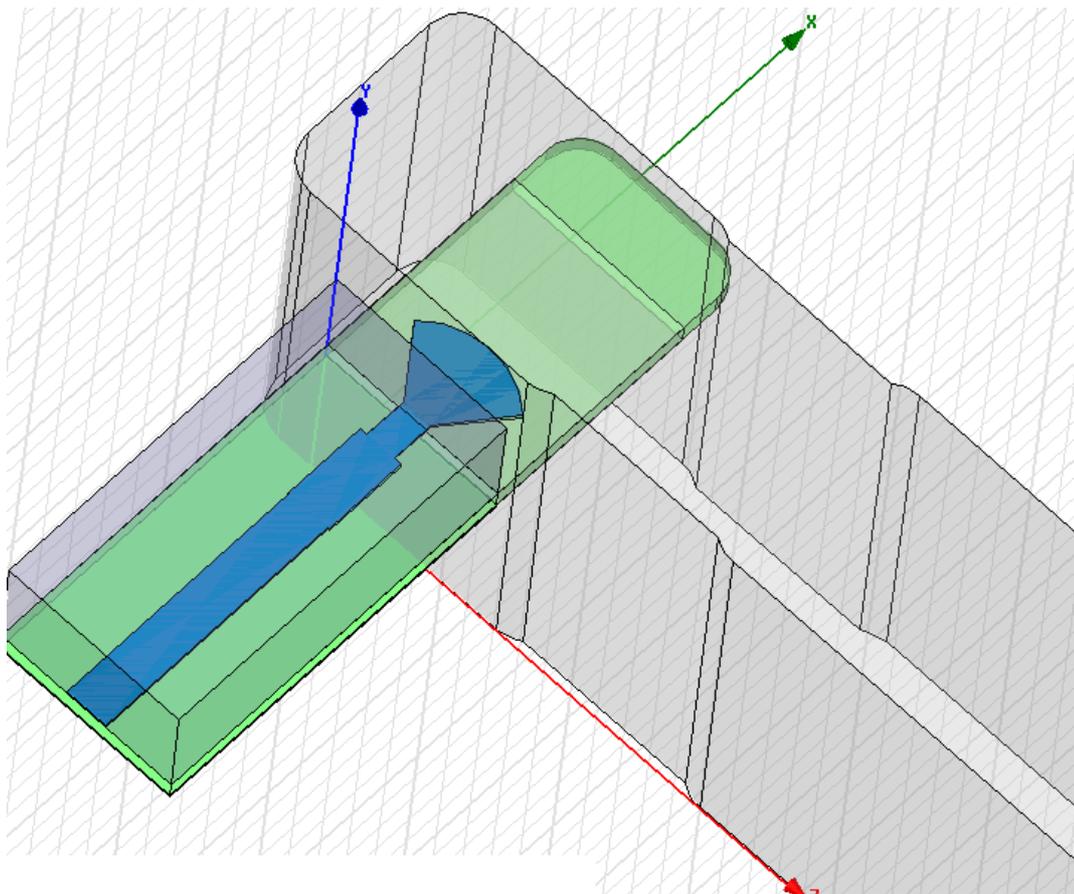


Fig. 3.6: Diseño inicial de la antena radial basado en las referencias indicadas.

El Departamento de Astronomía ya había adquirido un dieléctrico para este proyecto, Duroid 6002, de la compañía Rogers Corporation, este sustrato es capaz de trabajar en ambiente criogénico [9]. El dieléctrico posee 0,254mm de espesor y su constante relativa es 2,94.

El arco de la antena es de 90° y no se realizaron simulaciones variando este parámetro. Debido a la complejidad del programa para variar el radio tampoco se realizó una optimización detallada variando éste, pero si se verificó que radios mayores producían resonancias, mientras que para radios menores la reflexión aumentaba considerablemente.

La broca más pequeña para poder fresar el interior de la guía de onda rectangular es de 1mm de diámetro. Utilizando esta medida se curvaron el *backshort* y la angostura en la guía de onda. Finalmente, la parte superior del dieléctrico se ubico en el centro de la guía de onda.

En todas las simulaciones el material conductor utilizado para la línea y para la tierra de la línea *microstrip* fue cobre de espesor 0,035mm. Las simulaciones se realizaron utilizando los siguientes parámetros de convergencia del método de mallas:

-Error relativo requerido: $dS = 0,02$

-Número máximo de pasos: $N = 10$.

	Tamaño[mm]
Backshort	1
Espesor del aire	1.5
Ancho del dieléctrico	2.5
Ancho línea de la antena	0.4
Ancho línea de adaptación	0.6
Ancho línea de 50Ω	0.57
Extra	1
Angostura	0.1
Tamaño Angostura	3.7

Tabla 3.1: Valores de los parámetros óptimos.

Los puertos entre los cuales es de interés medir las reflexiones y transmisiones son la guía de onda rectangular y la línea *microstrip*. Luego de realizar varias simulaciones con HFSS el mejor resultado obtenido se puede observar en la figura 3.7, donde se presenta la transmisión y la reflexión en función de la frecuencia. La curva azul corresponde al coeficiente de transmisión y la curva roja al coeficiente de reflexión. El valor de los parámetros se resume en la siguiente tabla 3.1

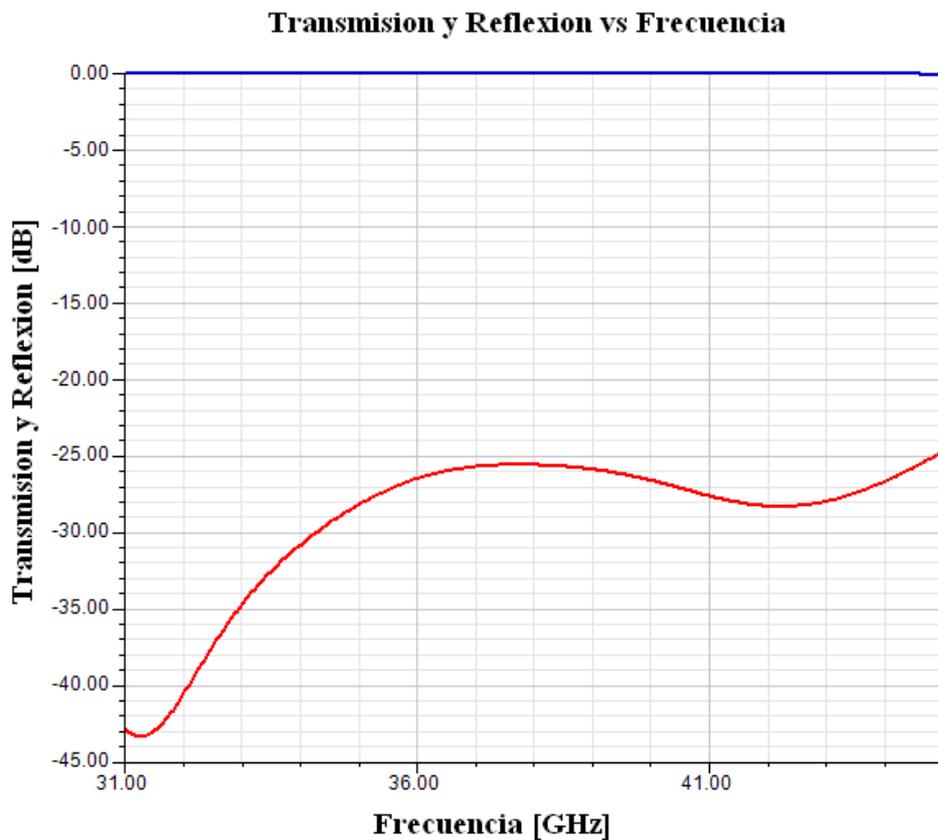


Fig. 3.7: Resultado de la simulación final en HFSS. La curva azul representa la transmisión y la curva roja la reflexión.

El resultado es bastante satisfactorio ya que las reflexiones son menores a -25dB en todo el ancho de banda, además la impedancia de la línea *microstrip* varía desde 49.45Ω en 31GHz hasta 49.8Ω en 45GHz.

Es importante notar que estos valores pueden corresponder a mínimos locales en el espacio de parámetros, y por ende pueden existir geometrías que permitan un mejor rendimiento de la antena cuyas dimensiones sean diferentes a las encontradas.

3.3 Polarización del ALH376

El ALH 376 requiere una fuente de poder de 4V y 87mA para funcionar. Para lograr esto se diseñaron dos circuitos: uno exterior encargado de generar el voltaje de alimentación y de proteger el MMIC y otro interior con los condensadores de desacoplo y pads de conexión al MMIC.

3.3.1 Circuito Externo

En la figura 3.8 se puede observar el esquema del circuito externo. El circuito está compuesto por un regulador de voltaje para obtener la tensión que se requiere, una resistencia de $10k\Omega$ en *pull down*, una resistencia junto con un *zener* de 4.3V para proteger al MMIC de cualquier sobretensión y una resistencia de $1,3\Omega$ para medir la corriente que ingresa al MMIC. Además cuenta con conectores para alimentar la tarjeta y para conectarla al bloque en el cual estará el amplificador.

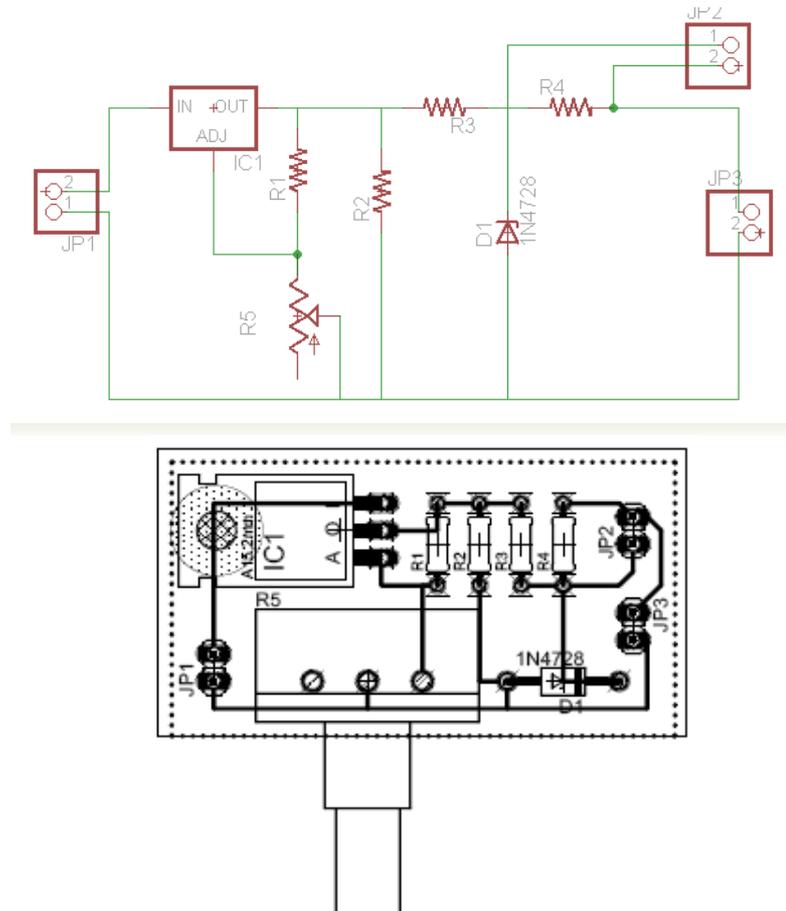


Fig. 3.8: (arriba) Esquemático del circuito externo, (abajo) diagrama del circuito externo.

3.3.2 Circuito Interno

El circuito interno es superficial y está compuesto por los condensadores de desacople y el *pad* de conexión al MMIC, además cuenta con un paso para la conexión a tierra con todo el bloque. Para que los condensadores estén lo más cerca posible del ALH376 se utilizaron condensadores superficiales de medida 0402 [10](1mm x 0,5mm) de 100pf y 0,1uF. Por último, posee dos grandes *pads* para soldar el conector que lleva al exterior del bloque y a la tarjeta externa. En la figura 3.9 se puede observar el esquema y el diagrama de la tarjeta.

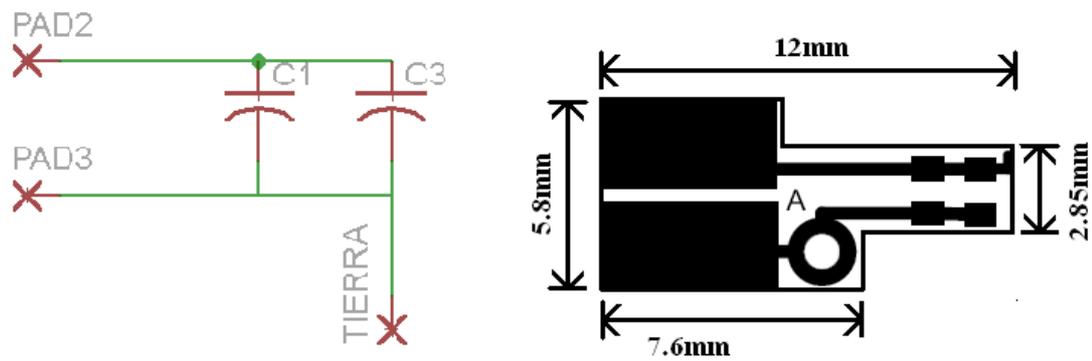


Fig.

3.9: A la izquierda se puede observar el esquemático del circuito interno, a la derecha el diagrama y las medidas del circuito interno.

Esta pequeña tarjeta debe ir en el interior del bloque, lo más cerca posible del MMIC, ya que cualquier distancia extra se transforma en una inductancia en serie la cual baja el ancho de banda útil del condensador. La tarjeta se fabrica en el mismo material que las antenas (Duroid6002) y con sólo una capa de cobre.

En la figura 3.10 se puede observar el conector que se utilizara en el ensamble del amplificador.

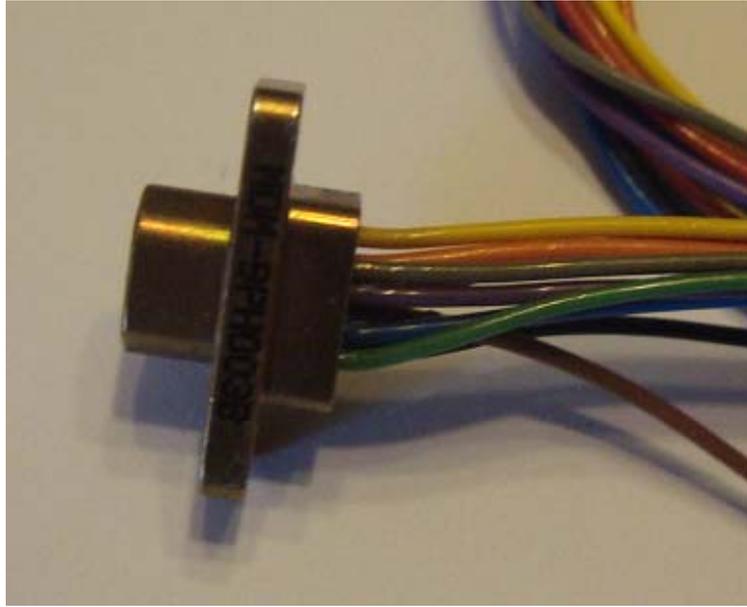


Fig. 3.10: Foto del conector que se utilizara para polarizar.

3.4 Diseño del Bloque

Finalmente, todos los elementos: guía de onda, antenas, el amplificador y la tarjeta de polarización interna se deben incluir para empaquetar el amplificador.

Las antenas se ubican de acuerdo al diseño de la sección 3.2: se alinean el centro de la antena de entrada con el *pad* de entrada del ALH376 y el centro de la antena de salida con el *pad* de salida. Los *pads* de entrada y salida no están ubicados simétricamente en el MMIC por lo tanto el bloque no es totalmente simétrico.

En el bloque es necesario dejar espacio para ubicar la tarjeta de polarización teniendo en cuenta sus dimensiones y la posición en la cual se realiza la unión entre esta tarjeta y el *pad*. Además se debe fresar el espacio para las antenas, el MMIC y el conector de la polarización.

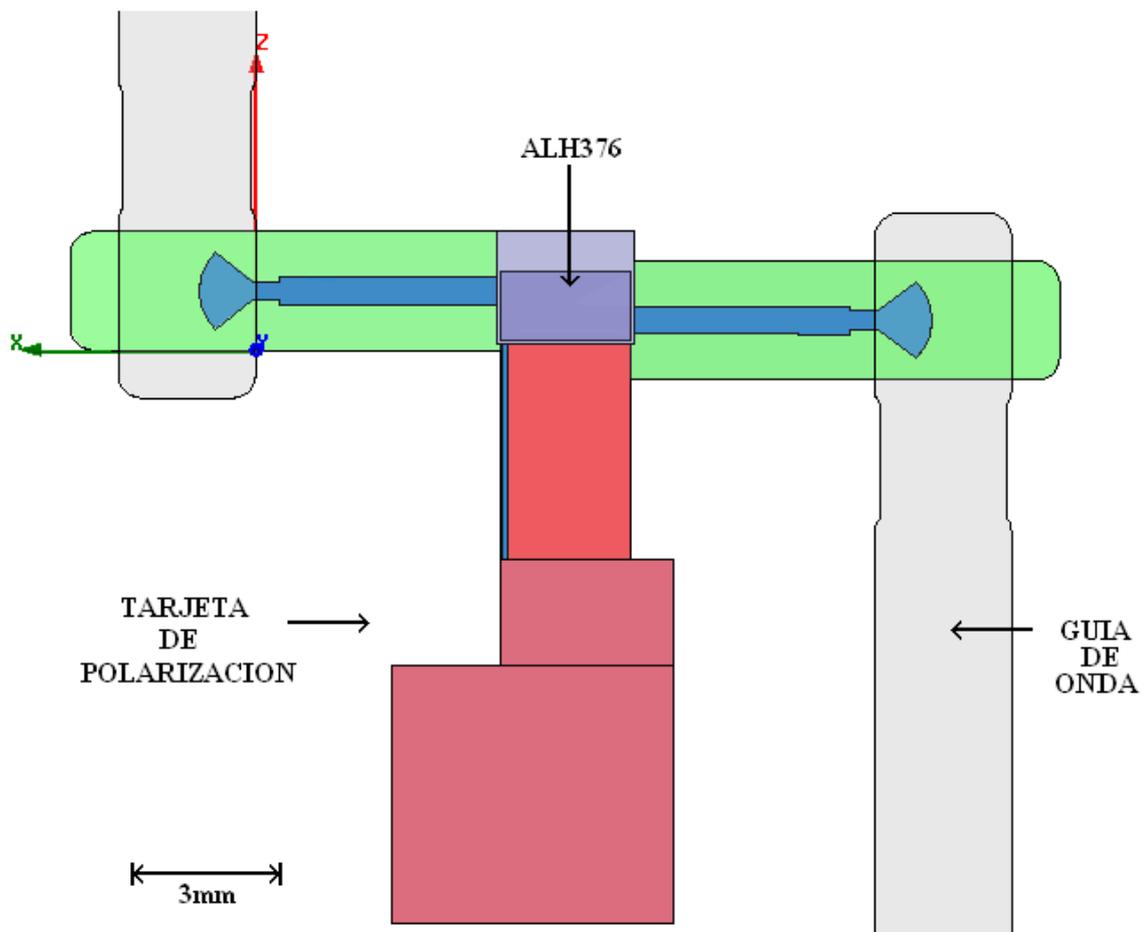


Fig. 3.11: Vista superior del diseño del bloque.

En la figura 3.11 se puede observar una foto superior del diseño del bloque, en gris se puede observar las guías de onda rectangulares, en verde el sustrato, en azul las antenas fabricadas en cobre y en color rojo el espacio para colocar la tarjeta de polarización interna con las dimensiones de la figura 3.9. En gris oscuro, en el centro de la figura 3.11, se puede observar el espacio para fijar el MMIC. Como el espesor de la antena es 0.254mm y el espesor del MMIC es 0.15mm es necesario crear un pequeño escalón de 0,104mm en la zona en que se ubica el ALH376.

Las antenas y el bloque de polarización están hechos del mismo material y ambos poseen cobre sólo por una cara, por lo tanto, ambos están en un mismo plano. Finalmente, se debe agregar el espacio para la ubicación del conector de la figura 3.10.

Lamentablemente el bloque completo no se puede simular en HFSS ya que el programa no permite agregar elementos activos como el ALH376. La figura 3.11 corresponde a una vista lateral del diseño del bloque. Esta vista permite entender con más claridad las zonas que se deben fresar.

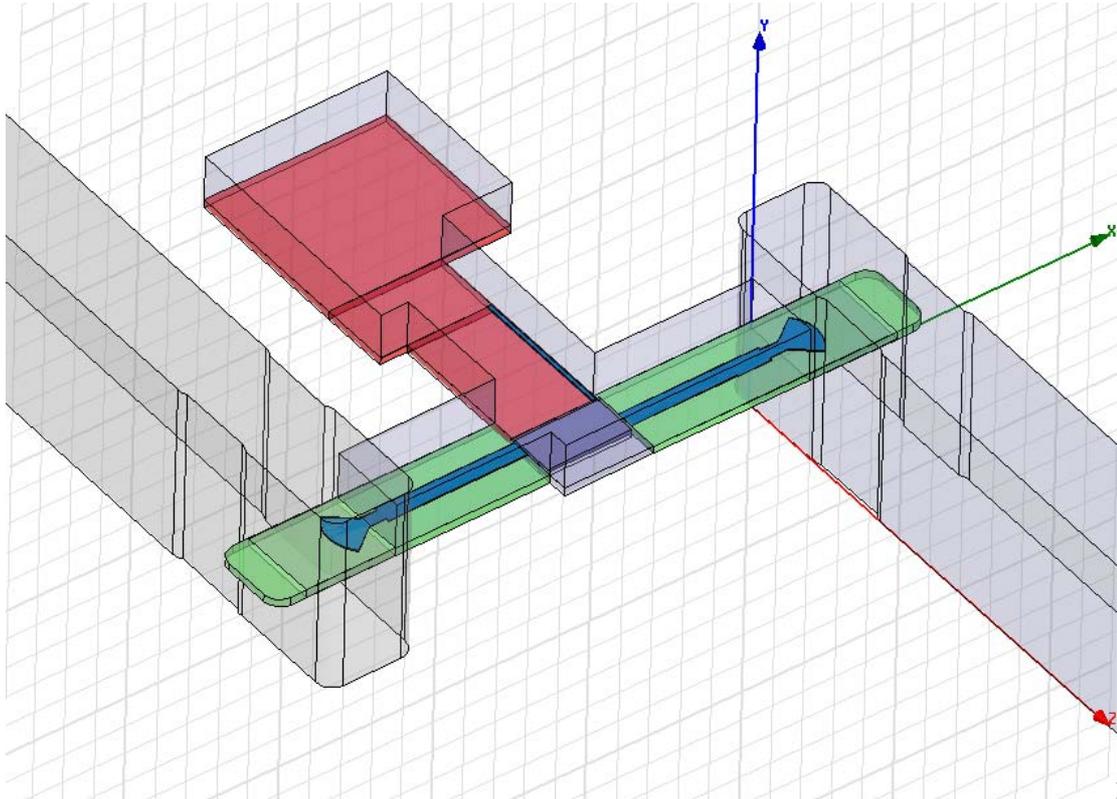


Fig.

3.12: Vista lateral del diseño del bloque.

Capítulo 4

Fabricación

La fabricación del bloque para la Banda 1 se realizó principalmente en el Laboratorio de Ondas Milimétricas y en el taller mecánico del DAS, la etapa final se llevó a cabo en el Laboratorio de Instrumentación Astronómica del DIE. Para el desarrollo de las piezas se utilizó la fresadora con control numérico por computador (CNC) adquirida por el DAS la cual puede trabajar con un micrómetro de precisión.



Fig. 4.1: Máquina CNC del taller mecánico del DAS.

Como ya se mencionó, el programa HFSS no permite agregar elementos activos en los diseños y por lo tanto no se pueden realizar simulaciones al bloque del capítulo 3 y verificar que efectivamente el diseño funciona. Además, una de las grandes inquietudes a pesar de las simulaciones realizadas, era la fabricación y funcionamiento de las antenas debido a su pequeño tamaño y alta precisión. Por lo tanto, se fabricó un bloque de prueba, similar al bloque final, pero que pudiese simularse en HFSS para contrastar los resultados de las simulaciones con las mediciones. El bloque de prueba permitió aislar fuentes de errores en la fabricación y tomar decisiones para la construcción del bloque final.

4.1 Bloque de prueba

4.1.1 Diseño del bloque de prueba

En la figura 4.2 puede observarse el diseño del bloque de prueba. El bloque de prueba está compuesto por dos antenas conectadas a través de la línea *microstrip* de 50Ω . La señal en la guía rectangular WR22 pasa a la línea *microstrip*, luego sale de la línea y pasa a la guía WR22 de salida. Este trayecto es realizado con bajas reflexiones debido al diseño de las antenas. Los puertos de entrada y salida corresponden a las guías de onda rectangulares. El bloque de prueba no posee el amplificador y por lo tanto se puede simular directamente en HFSS.

En la figura 4.3 se presentan los resultados de la simulación. La curva en color rojo corresponde al coeficiente de reflexión y la curva azul al coeficiente de transmisión. Como se esperaba las reflexiones entre un puerto y otro son menores a -20dB debido al diseño de las antenas.

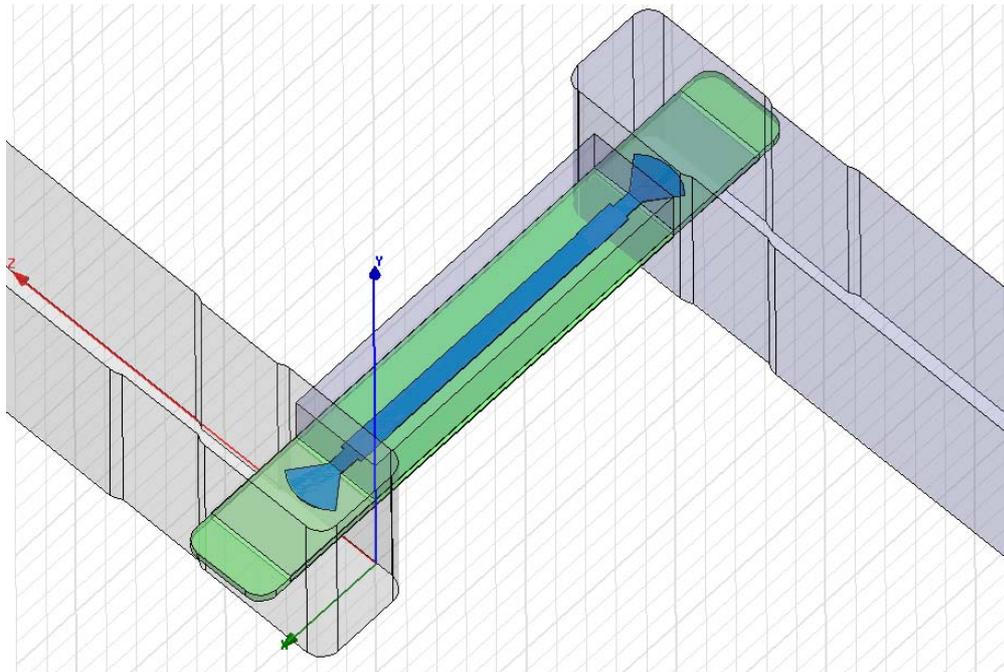


Fig. 4.2: Diseño del bloque de prueba para las simulaciones

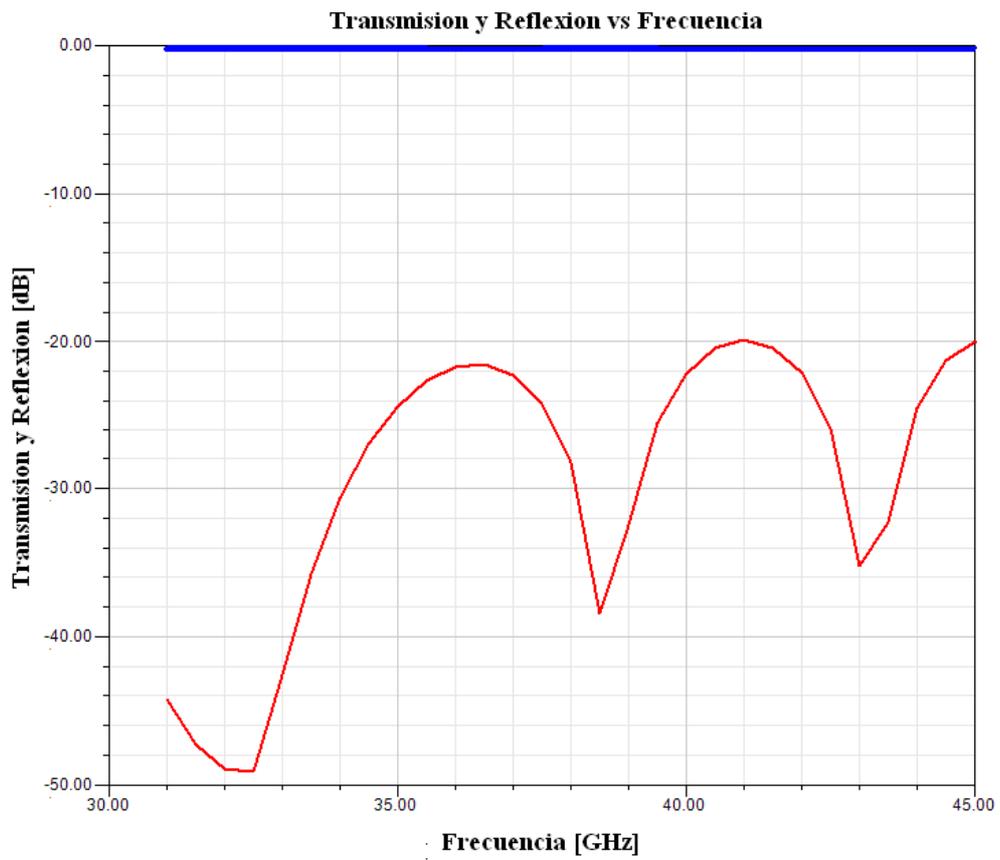


Fig. 4.3: Simulación del bloque de prueba. En color azul se aprecia la transmisión y el color rojo la reflexión.

4.1.2 Maquinado del bloque de prueba

Una vez terminado el diseño en el programa HFSS se debe importar en TopSolid, en donde se realizarán los ajustes finales y se fabricará el programa de maquinado de la pieza. Se deben agregar pins de alineamiento y pernos para que ambas mitades coincidan.

Una vez terminado el diseño en HFSS se exportó a TopSolid, donde se realizarán los ajustes finales y se fabricará el programa de maquinado de la pieza. Como no fluye corriente a través del plano de simetría de la guía de onda el bloque puede dividirse en dos piezas que cumplan con esta simetría sin afectar el comportamiento. A estas dos piezas, además se le agregan pines de alineación y los pernos necesarios para juntar correctamente ambas partes. Por último, se perforan los hilos necesarios para conectar los puertos de entrada y salida del bloque.

En la figura 4.4 se puede observar el diseño final en TopSolid. El bloque de prueba se maquinó en bronce utilizando la fresadora del taller mecánico del DAS. Se eligió bronce ya que posee una alta conductividad y permite realizar futuras pruebas de bañado en oro pues éste se adhiere electroquímicamente con facilidad al cobre. El bañado en oro es relevante para el desarrollo del receptor ya que es importante minimizar la oxidación en las piezas. El bloque de prueba fabricado se puede ver en la figura 4.5.

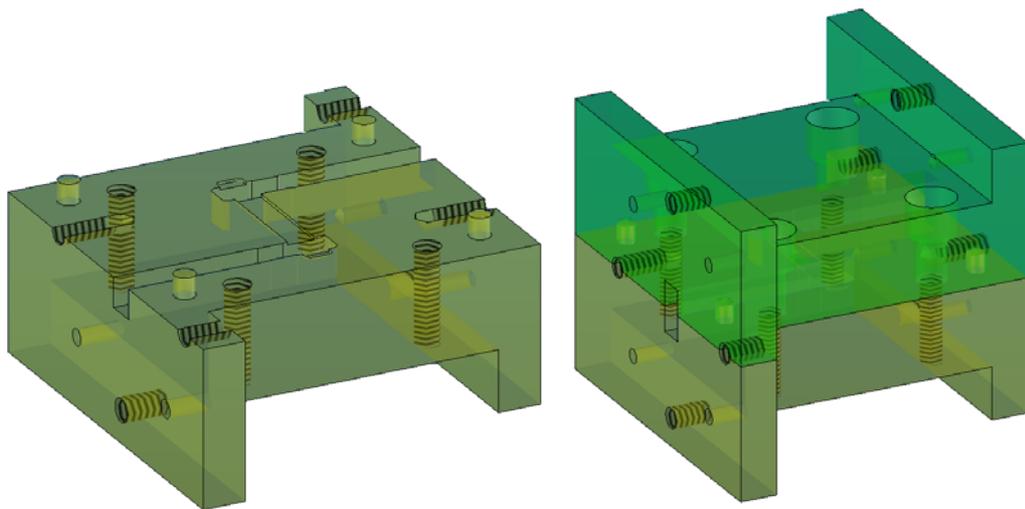


Fig. 4.4: Diseño del bloque de prueba en TopSolid. A la izquierda se puede observar una de las mitades del bloque y en la derecha el bloque completo.

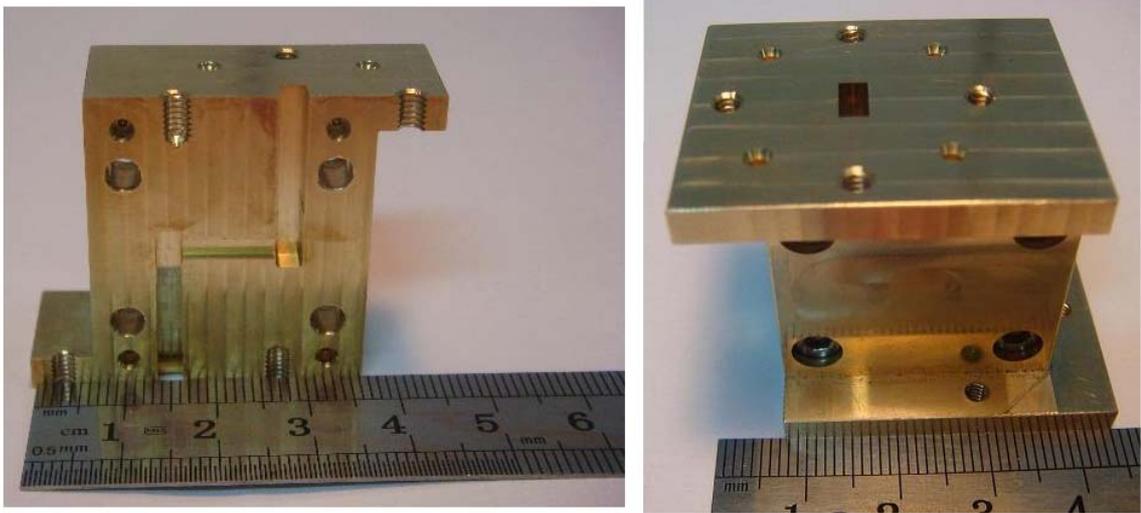


Fig. 4.5: Bloque de prueba

Aparentemente el bloque construido es similar al diseñado, en el momento de su construcción no se pudo medir las dimensiones del bloque ya que el microscopio que permite realizar este tipo de mediciones estaba en etapa de adquisición. El instrumento para medir ya se encuentra en el Laboratorio de Ondas Milimétricas.

4.1.3 Fabricación y montaje de la antena

Una de las tareas más complicadas fue la fabricación de la antena. Esta no se puede hacer con una maquina convencional de circuitos debido a la alta precisión que se requiere, al tamaño de la pieza y a la alta flexibilidad del material; por lo tanto se fabricó la antena en la fresadora del DAS. Los pasos para su construcción son los siguientes:

1. Se corta una lámina de 4cm x 4cm de sustrato y se elimina completamente una capa de cobre, esto se logra cubriendo una cara con pintura y luego se sumerge la pieza en cloruro férrico. El tamaño de la lámina permite fabricar más de una antena a la vez.
2. Luego se pega la pieza en un soporte plano utilizando cianoacrilato, el pegado tiene como objetivo asegurar que la lámina no se moverá durante el fresado. Este soporte se coloca en la fresadora y se realiza el maquinado de la antena teniendo especial cuidado en la forma de desbastar la pieza. Se utilizó una fresa de 1mm a 25000RPM para desbastar la pieza completa, luego con una fresa de 0,8mm a 30000RPM se

desbastó el contorno de la antena con una tolerancia de $100\mu\text{m}$, después se repaso nuevamente el contorno con una fresa de $0,2\text{mm}$ con una tolerancia de $10\mu\text{m}$, finalmente, se utilizó una broca de $0,1\text{mm}$ a 35000RPM para desbastar la antena.

3. Finalmente, se despegan las antenas sumergiendo todo el soporte en acetona.



Fig. 4.6: Antena fabricada.

Una vez terminado el bloque y la antena (ver figura 4.6 y 4.7) se procedió a estudiar las formas de fijarla. Las alternativas fueron las siguientes:

- Pegado con pintura de plata: posee la ventaja que no endurece rápidamente lo que da unos segundos para ubicar correctamente la antena, además se puede limpiar y remover fácilmente con acetona. La desventaja que posee es que pueden quedar residuos conductores debajo de la antena en la zona que está dentro de la guía de onda, esto provoca problemas en la transmisión como se puede corroborar con simulaciones.
- Pegado con cianoacrilato: a diferencia del pegado con pintura de plata no deja residuos conductores. La desventaja es que se seca rápidamente lo que genera dificultad para fijar la antena en la posición adecuada y además cambia las propiedades de la capa de sustrato ya que ahora existe Duroid6002 y cianoacrilato alterando la impedancia de la línea.
- Fijación Mecánica: la precisión con la que están fabricados la antena y el bloque permite que la antena se pueda afirmar al bloque sólo realizando un poco de presión. Este método no asegura que la antena no se desprenda.
- Pegamento Epóxico: es el pegamento más fácil de manipular ya que se puede trabajar con él durante mucho tiempo antes que seque y por lo tanto se puede limpiar con tranquilidad la pieza; aún así, la estructura de la pieza no permite limpiar con facilidad zonas donde puedan quedar restos conductores. Este pegamento no se remueve de forma tan simple como los otros ya que se debe sumergir la pieza en cloroformo al menos por 48 horas.

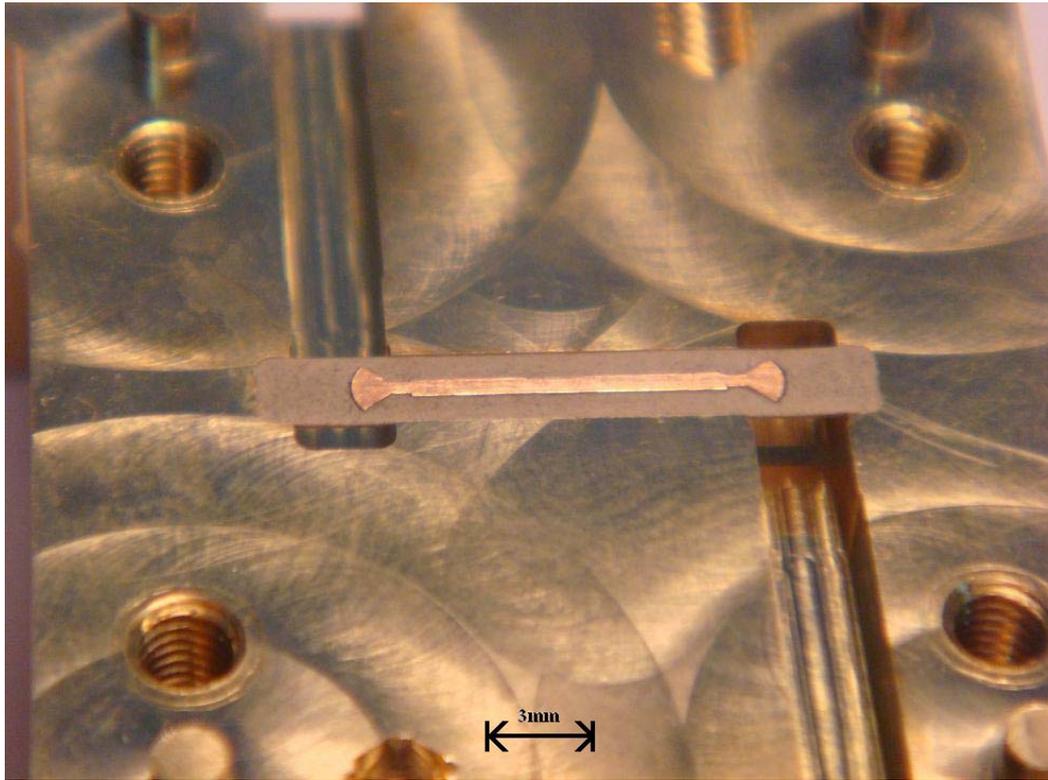


Fig. 4.7: Foto del bloque de prueba con la antena.

4.1.4 Mediciones y resultados

Para realizar las mediciones se utilizó el *Vector Network Analyzer* (VNA) del Laboratorio de Ondas Milimétricas del DAS. Este equipo inyecta señales a través de sus puertos y permite medir las transmisiones y reflexiones de la señal entre un puerto y otro.

El equipo se debe calibrar para descontar el efecto de los cables y conectores en las mediciones. Según el tipo de guía de onda que se utilice y el tipo de medición que se requiera se debe realizar una calibración distinta. Como interesa medir la transmisión de la señal y las reflexiones entre un puerto y otro se necesita la calibración de dos puertos. Para realizar esta calibración el equipo requiere cuatro conexiones: primero un cortocircuito en cada uno de los puertos, luego conectar directamente ambos puertos y finalmente unirlos a través de un guía de onda de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda.

Una vez calibrado el VNA se utilizó para realizar mediciones del bloque de prueba en cada uno de los casos descritos anteriormente y así seleccionar la mejor forma de fijar la antena. En la figura 4.8 se puede apreciar el montaje utilizado para efectuar las mediciones.

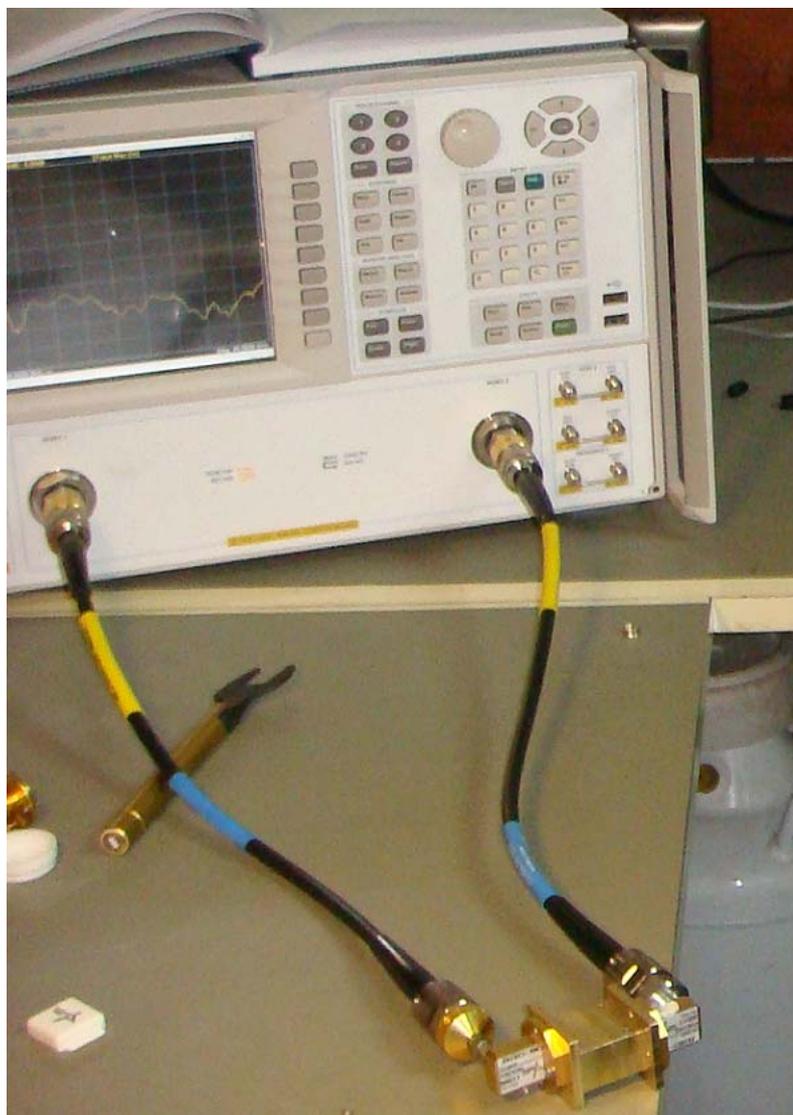


Fig. 4.8: Montaje del bloque de prueba para realizar la medición con el VNA

En la figura 4.9 se puede observar el coeficiente de reflexión en función de la frecuencia para cada uno de los casos mencionados. Además se incluye el resultado de la simulación realizada en HFSS.

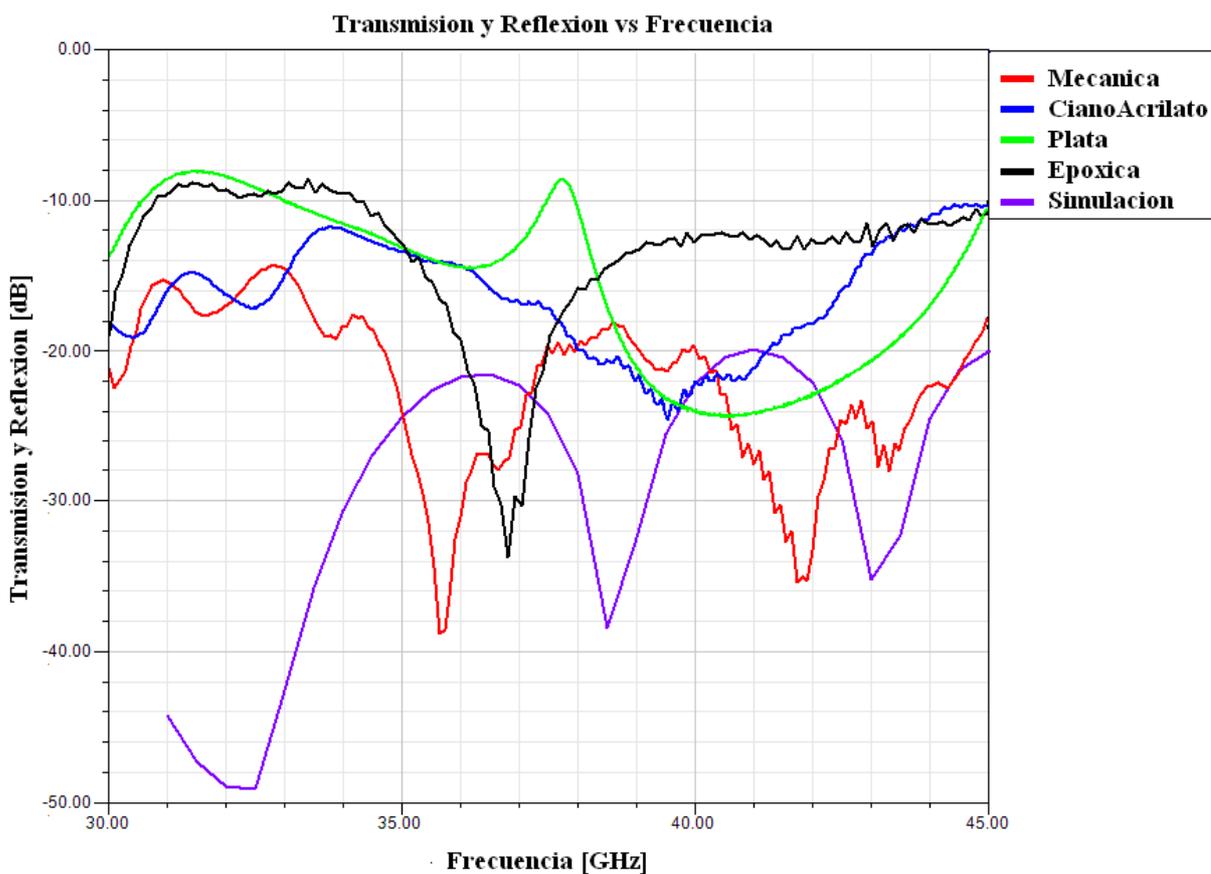


Fig. 4.9: Coeficiente de reflexión del bloque de prueba.

La curva azul de la figura 4.9 corresponde al caso de la antena pegada utilizando cianoacrilato, la curva verde pegando la antena con la pintura de plata, la curva roja corresponde a la fijación manual y finalmente, la curva morada corresponde a los resultados obtenidos en la simulación del bloque de prueba. Se puede observar que las tres mediciones cumplen el objetivo de disminuir la reflexión para que la transmisión sea máxima, pero las curvas no se parecen a lo esperado en las simulaciones. La forma y la reflexión de la curva roja es la que más se asemeja a los resultados de las simulaciones. Aun cuando existe una diferencia con las simulaciones que es mayor a 15dB a frecuencias menores de 34GHz es la única curva que posee reflexiones menores a 15dB en todo el ancho de banda. La transmisión del resto de las curvas difiere, en promedio, en más de 5dB en todo el ancho de banda y poseen reflexiones mayores a 15dB.

La menor reflexión de la señal se obtiene fijando la antena a presión (curva roja). Este método posee el inconveniente que la línea no queda firme al bloque y puede llegar a levantarse. Con la

pintura de plata es difícil lograr una buena limpieza debido a la geometría del bloque y de la antena sólo pudiendo observar estos problemas luego de realizar las mediciones que muestran una alta reflexión ($\sim 10\text{dB}$). De este modo, se concluye que las mejores opciones para fijar la antena son el cianoacrilato y el pegamento epóxico.

Para analizar la diferencia entre el resultado de las simulaciones y las mediciones realizadas se analizó uno de los parámetros más relevantes en el diseño de la antena: ancho de la línea de la antena. Como el laboratorio no posee un microscopio que nos permita medir las dimensiones de la pieza es difícil saber con certeza que la antena fabricada posea el tamaño necesario. En la figura 4.10 se puede observar un acercamiento de la antena utilizada.



Fig. 4.10: Antena de adaptación amplificada utilizando el microscopio del DIE.

Con el fin de estudiar la influencia de la antena en las mediciones obtenidas se realizaron mediciones con dos antenas diferentes. Ambas antenas se fabricaron con el mismo programa de fresado y el mismo día.

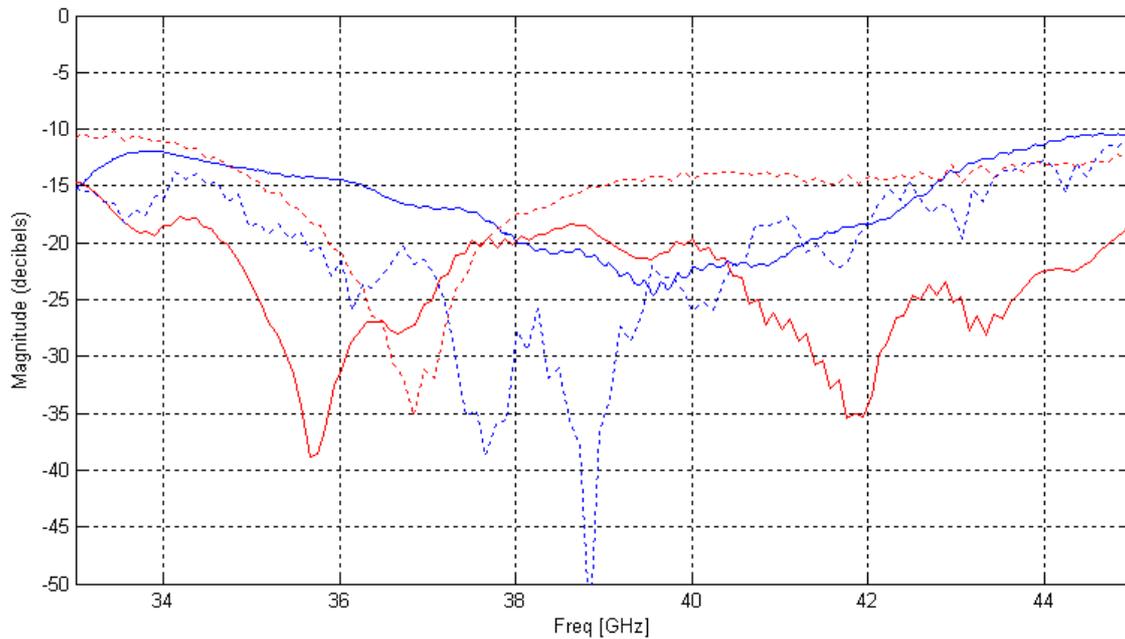


Fig. 4.11: Coeficiente de reflexión del bloque de prueba para dos antenas distintas fijadas de dos formas distintas.

En la figura 4.11 se presentan los valores obtenidos para las reflexiones de dos antenas distintas. Las curvas con línea sólida corresponden a una antena y las curvas con línea punteada corresponden a otra antena. En azul se observan las antenas pegadas utilizando cianoacrilato y en rojo las antenas fijadas mecánicamente. Se puede observar claramente que los resultados varían considerablemente (más de 5dB en promedio en toda la banda) entre una antena y otra, por lo tanto el desempeño de las antenas depende claramente de la precisión con la que se fabriquen las antenas. Este resultado se puede observar fácilmente realizando simulaciones al variar el ancho de la línea de la antena levemente en torno al valor del diseño. La zona más angosta de la línea posee 0,4 mm de ancho y es con este valor que se alcanzan los mejores resultados. En la figura 4.12 se pueden observar las reflexiones del bloque al variar el ancho desde 0,35mm hasta 0,45mm.

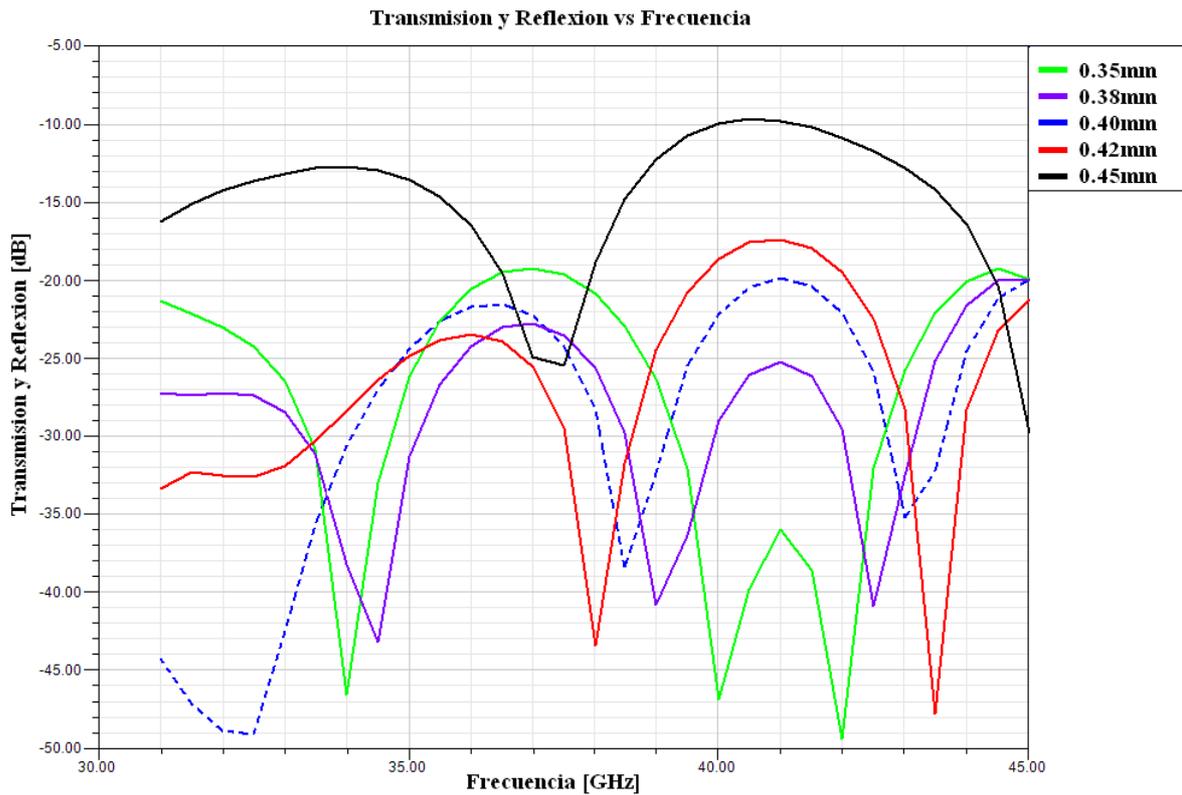


Fig. 4.12: Coeficiente de reflexión del bloque de prueba para distintos valores del parámetro ancho de la línea.

Claramente, un cambio de 0,05mm genera diferencias superiores a 5dB en las reflexiones, reafirmando que la fabricación de las antenas debe realizarse con extrema precisión.

Finalmente se estudió la posibilidad que existiera una capa de aire entre el sustrato y el bloque, los resultados de las simulaciones indican que para que esta capa de aire tenga algún efecto en las reflexiones debe ser de un espesor mayor a 90um, al realizar la medición en el taller se observó que el espesor no supera los 15um y por lo tanto se puede descartar este efecto en los resultados.

4.2 Bloque final

4.2.1 Diseño del bloque final

El diseño del bloque final se encuentra detallado en la sección 3.4. Luego de estudiar la fabricación del bloque de prueba se pudo notar que era posible la fabricación del bloque final sin modificaciones. Los análisis realizados en la sección 4.1.4 restringen el desempeño del bloque ya que las reflexiones no serán tan bajas como se desea y para poder lograr un mejor resultado se debe buscar otra forma de elaborar las antenas.

En la figura 4.13 se presentan los diseños del bloque y de las antenas en TopSolid, además se puede apreciar el espacio dejado en una de las caras para poder ubicar el conector de la polarización.

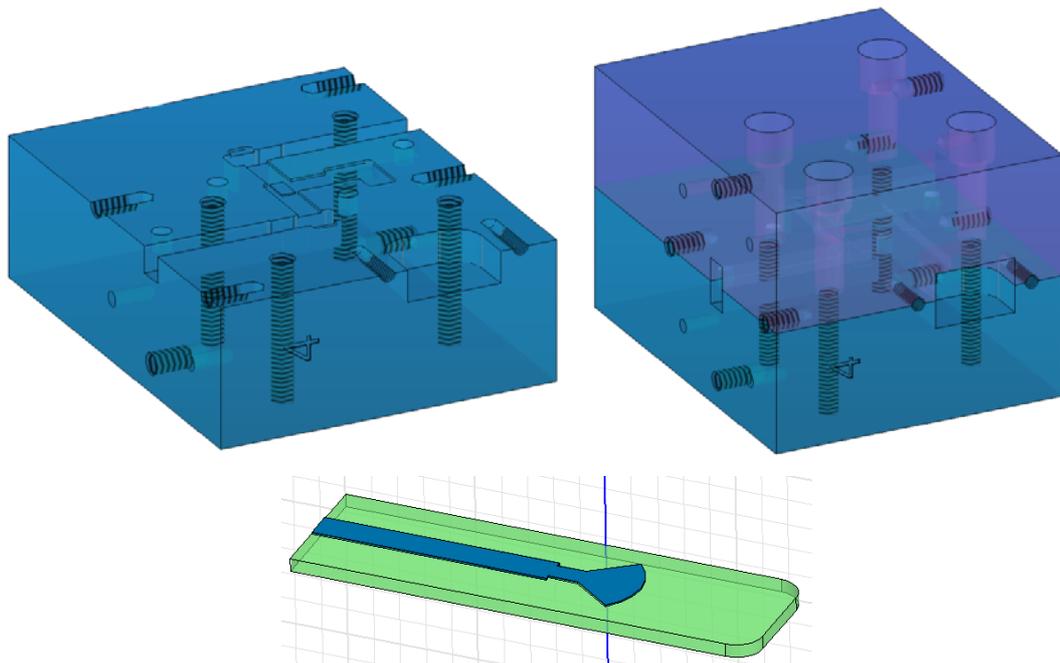


Fig. 4.13: Diseño del bloque de prueba en TopSolid. A la izquierda se puede observar una de las mitades del bloque y en la derecha el bloque completo. En la parte inferior se aprecia el diseño de una de las antenas.

4.2.2 Maquinado del bloque final y las antenas

El bloque final y las antenas se elaboraron en el taller mecánico del DAS. Para la fabricación del bloque se utilizó aluminio ya que es de fácil mecanizado, posee alta conductividad y no se oxida tan fácilmente como el bronce.

En la figura 4.14 se puede observar el bloque final. Las antenas se maquinaron como se detalla en la sección 4.1.3, en el mismo material y siguiendo los mismos pasos. Una de las antenas construidas se pueden observar en la figura 4.15.

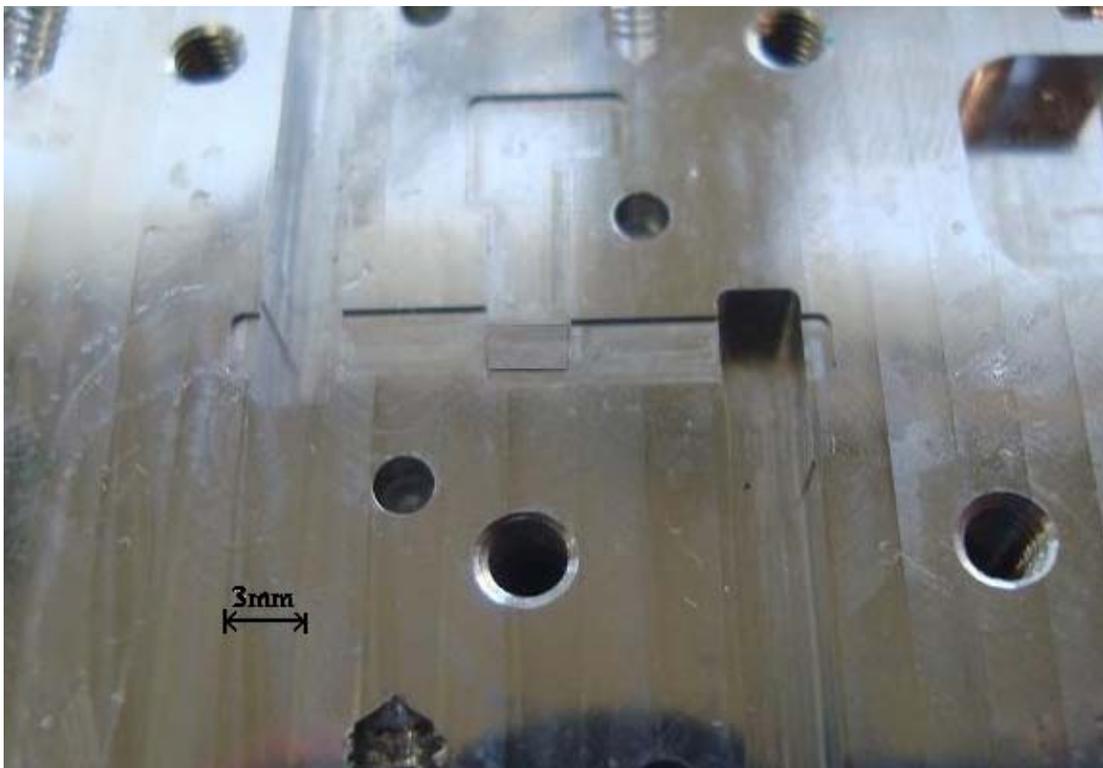


Fig.

4.14: Foto de la parte inferior del bloque luego de ser maquinada.

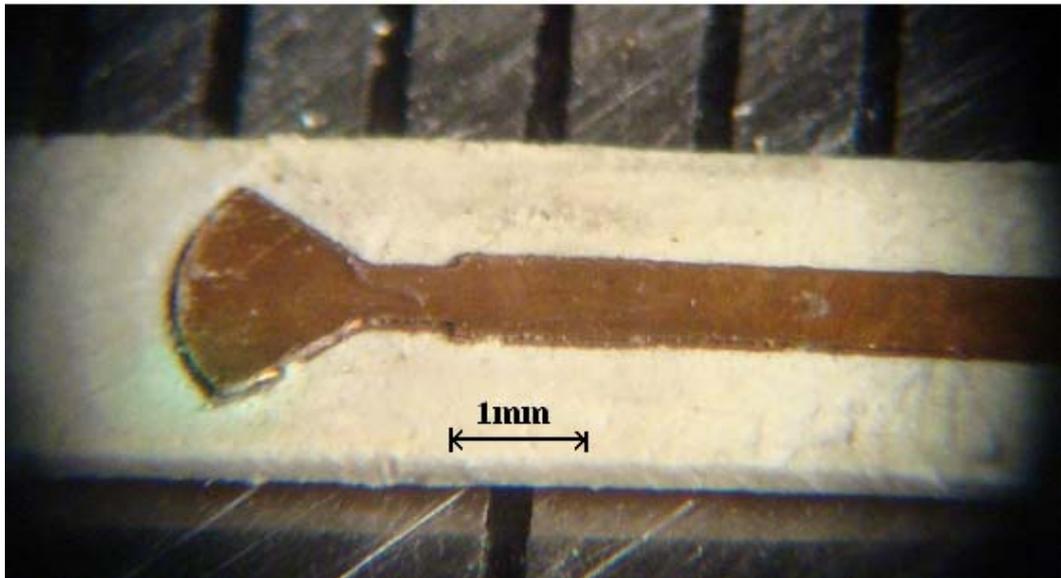


Fig. 4.15: Foto de una antena fabricada.

4.2.3 Fabricación del circuito de polarización

Los materiales para el circuito interno sólo son dos condensadores 0402, uno de 100pF y otro de 0,1uF. Los materiales del circuito externo se resumen en la tabla 4.1.

Componentes
Resistencia de 1k Ω
Potenciómetro de 5k Ω
LM317
Diodo Zener 4,3V
Resistencia de 1.3 Ω
Resistencia de 10k Ω
Resistencia de 10 Ω
Conectores Pin Header

Tabla. 4.1: Materiales del circuito externo

Para fabricar el circuito de polarización: tanto el circuito interno de la figura 3.8 como el circuito externo de la figura 3.9, se utilizó un método fotoresistivo [11] (ver anexo). Los circuitos de polarización finales se pueden observar en la figura 4.16

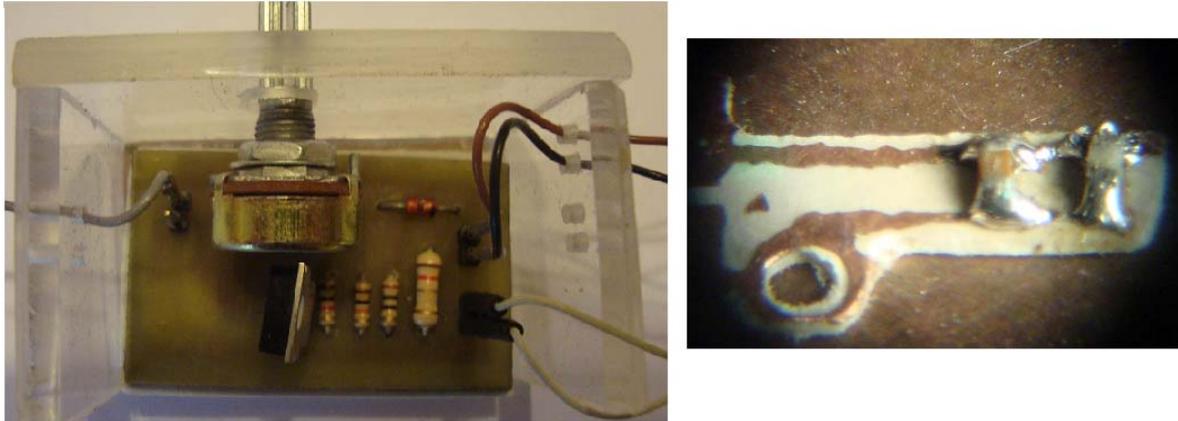


Fig. 4.16: A la izquierda el circuito de polarización externo, a la derecha el circuito de polarización interno.

4.2.4 Montaje del amplificador y las antenas

El primer elemento que se montó en el bloque fue el amplificador ALH376. La base del amplificador (que corresponde a la tierra) se instaló utilizando el pegamento epóxico HR20. Este pegamento es conductor y posee suficiente rigidez para poder realizar bondings sobre el MMIC. El pegamento epóxico está compuesto por dos frascos, ambos componentes se mezclan en proporción 1 a 1 en masa, luego la mezcla se coloca en el resalto que posee el bloque de las dimensiones del ALH376. Se debe tener especial cuidado en colocar una pequeña cantidad para que no se forme una capa muy espesa de pegamento que provoque que la superficie del MMIC quede dispareja con la antena. Sobre la capa de pegamento se coloca suavemente el amplificador para que el pegamento no rebase. En caso de haber algún residuo del pegamento, este puede retirarse cuidadosamente ya que se mantiene líquido. Para ubicar con precisión el MMIC se utilizaron pinzas, mondadientes y puntas de cactus, estos últimos poseen puntas muy finas y al ser de fibra no rayan el amplificador. Finalmente, para que el pegamento tome rigidez, se calentó a 100°C durante 60 minutos en el horno del DIE.

En la figura 4.17 se puede apreciar el MMIC instalado en el bloque.

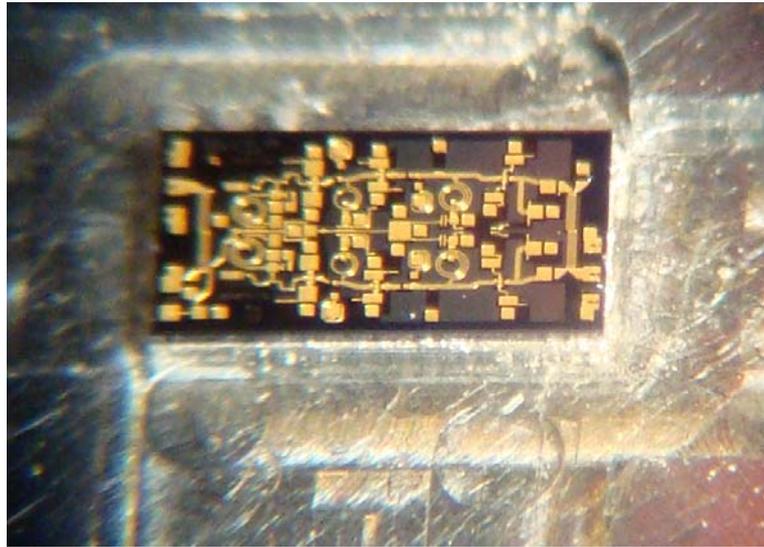


Fig. 4.17: Foto de la instalación del MMIC en el bloque

La figura 4.18 muestra un acercamiento a la zona lateral de la figura 4.16 en el que se puede notar la capa de pegamento entre el bloque y el amplificador.

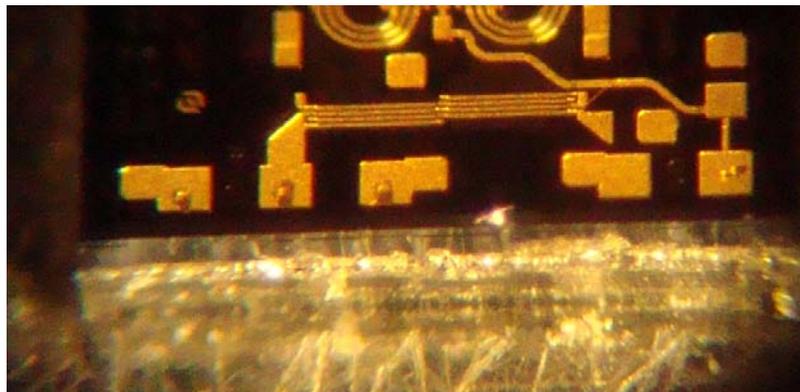


Fig. 4.18: Montaje del MMIC en el bloque. Se puede observar la capa brillante que corresponde al pegamento epoxico entre el MMIC y el bloque.

Una vez fijado el amplificador se procedió a montar las antenas. Utilizando los resultados del bloque de prueba de la sección 4.1 se decidió fijar las antenas utilizando cianoacrilato, ya que posee una buena respuesta, es suficientemente rígido para realizar el bonding entre el MMIC y la antena y se puede despegar fácilmente utilizando sólo la acetona. La antena se fija teniendo la precaución que el extremo fuera de la guía de onda utilice completamente la cavidad, esto define la posición con respecto al MMIC. El pegado con cianoacrilato debe realizarse rápidamente y teniendo especial cuidado de no dañar el amplificador. En la figura 4.19 se presenta el montaje de la antena.

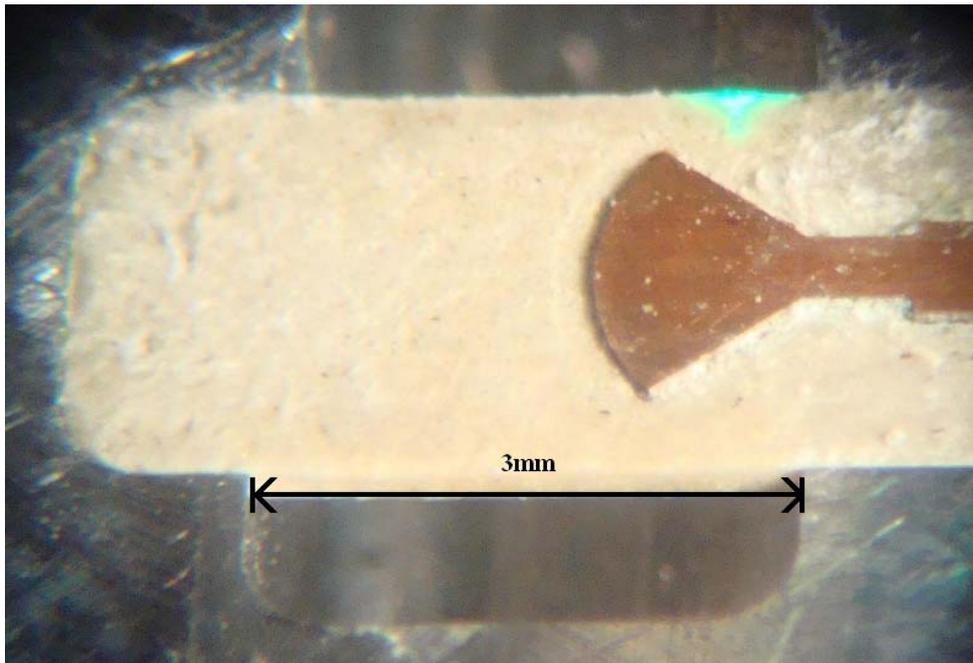


Fig. 4.19: Montaje de la antena en el bloque final. Se puede apreciar como la antena calza justo en el bloque.

Se puede observar una diferencia de 35 μ m entre el pad de conexión del ALH376 y las líneas de cobre de las antenas, esta diferencia se debe al espesor del cobre y debe ser corregida en futuras versiones del bloque aumentando el escalón en el cual se instala el MMIC.

4.2.5 Montaje del circuito de polarización

El circuito de polarización se montó utilizando la pintura de plata para lograr el contacto eléctrico entre la línea de tierra de la tarjeta y el bloque, además se le dio un poco más de rigidez utilizando cianoacrilato. Se debe tener cuidado que la pintura de plata no rebase la tarjeta ya que puede causar un corto entre el bloque y la línea de alimentación, esto se comprobó midiendo conducción entre ambos elementos con un multímetro. De la misma forma se comprobó que la línea de tierra de la tarjeta de polarización estaba conectada eléctricamente al bloque.

Una vez que la tarjeta está firme se procedió a pegar el conector del bloque y soldar los cables del conector a la tarjeta de polarización interna teniendo cuidado en que el largo de los cables sea suficiente para alcanzar a soldarlos en los pads del circuito interno. El conector se pegó utilizando cianoacrilato. Es importante que esté firme en el bloque ya que si se mueve puede arrastrar la tarjeta de polarización y luego romper el bonding entre la tarjeta de polarización y el MMIC.

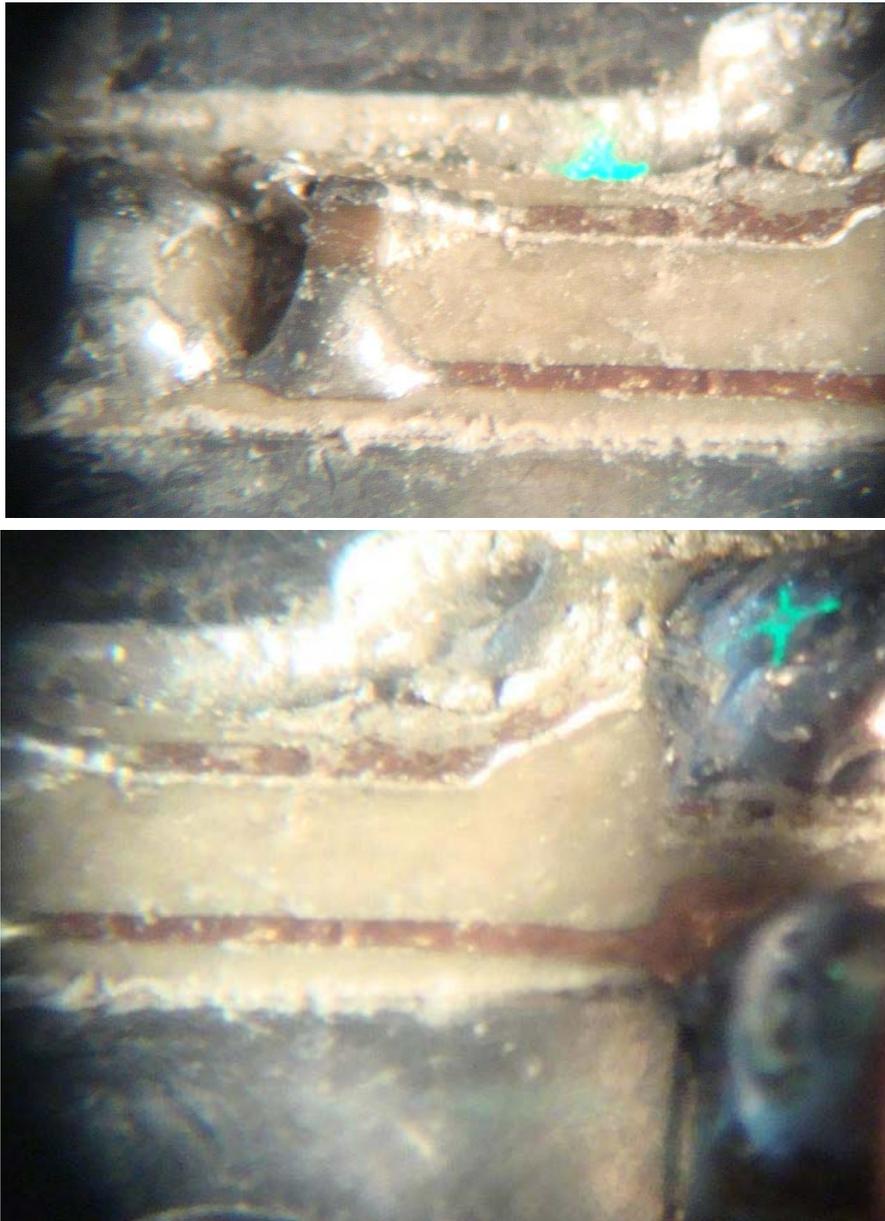


Fig. 4.20: Montaje de la tarjeta de polarización en el bloque. En la figura superior se pueden apreciar los condensadores de desacople. En la figura inferior se observan los *pads* de conexión de los cables del conector.

En la figura 4.20 se puede observar el montaje de la tarjeta de polarización. La sección de la tarjeta cercana al MMIC (figura 4.20 superior) no quedó totalmente firme al bloque debido a que no se logró poner pegamento sin poner en riesgo el ALH376.

Finalmente, en la figura 4.21 se puede apreciar el bloque final con todos sus componentes montados: tarjeta de polarización, el conector externo, las antenas y las guías de onda.



Fig. 4.21: Bloque final con todos los componentes montados.

4.2.6 Bonding Machine

En el laboratorio de Instrumentación Astronómica del DIE se encuentra la bonding machine modelo 4526 de la empresa Kulicke & Soffa [12]. Esta máquina permite realizar la conexión eléctrica entre los pads del ALH376 y las líneas de entrada/salida y la línea de polarización, En la figura 4.22 se puede apreciar la bonding machine.



Fig. 4.22: Bonding machine utilizada para realizar los bondings.

La bonding machine posee una serie de parámetros que permiten realizar el bonding y ajustar la forma de este. Luego de muchas pruebas realizadas utilizando hilo de oro en superficies de cobre y oro se logro encontrar el valor de los parámetros para fabricar los bondings.

	Primer Bonding	Segundo Bonding
Search	0.2	0.2
Power	7	67
Time	6.4	6.4
Force	1	1
Temperatura	140°C	140°C

Tabla. 4.2: Parámetros de la bonding Machine.

Uno de los requerimientos más importantes para llevar esto a cabo es que las superficies estén limpias y en el caso del cobre, libre de óxido, ya que de lo contrario el hilo de oro no logra afirmarse en la superficie.

Los pasos para operar la máquina son los siguientes:

- Una vez encendida la maquina lo primero que se debe hacer es calibrar el eje z de la maquina, para esto se fija el control *loop* en el mínimo, se utiliza el botón derecho del control hasta que baje la máquina, luego se ajusta la mesa de trabajo hasta que la superficie este en contacto con la aguja de la máquina. Luego se presiona nuevamente el botón derecho para terminar la calibración de la maquina, el control *loop* se debe fijar en el valor que se desee para el alto del bond.
- Para realizar el primer bonding se mueve la mesa de trabajo con el control hasta encontrar el lugar donde se desea realizar el primer bonding, luego se mantiene presionado el botón derecho del control para que la aguja baje hasta la posición indicada por el parámetro *search*, esto permite indicar con más precisión el punto donde se desea realizar el primer bonding. Se presiona nuevamente el botón derecho para realizar el primer bonding. Si los parámetros son los correctos y las superficies adecuadas la maquina realizara el bonding en la posición, liberara el hilo y se moverá la cantidad indicada con el parámetro *stepback*.
- El segundo bonding se realiza exactamente de la misma forma que el primero pero esta vez la maquina corta el hilo antes de subir, terminando el bonding.

4.2.7 Conexiones del ALH376

Una vez montados todos los componentes necesarios para el hacer funcionar el amplificador: ALH376, antenas y polarización se procedió a realizar la conexión eléctrica entre estos utilizando la bonding machine. Se utilizo braso para remover el oxido de las líneas de cobre y así asegurar la fabricación de los bondings, lamentablemente el brazo deja residuos en las cercanías del ALH376 que no se lograron remover debido a la fragilidad del MMIC. En la figura 4.23 se pueden apreciar el ALH376 y los bondings a las líneas de las antenas y a la polarización.

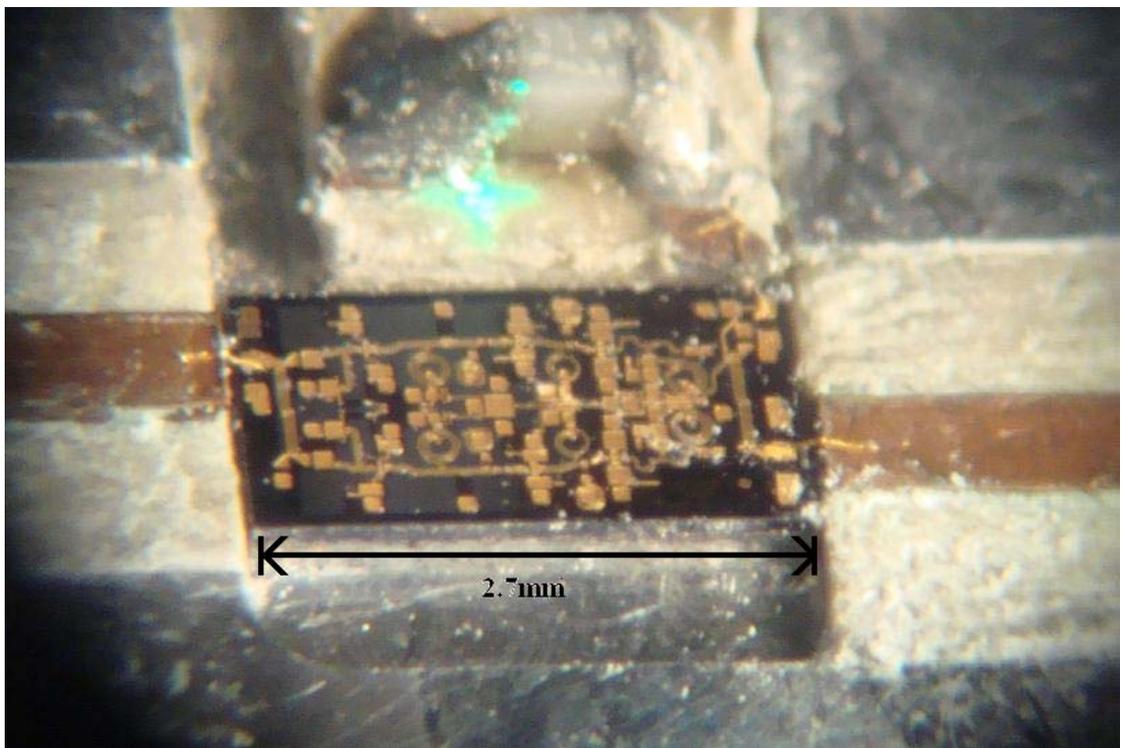


Fig. 4.23: Bondings realizados en el ALH376

En la figura 4.24 se muestra un acercamiento al bonding entre el ALH376 y la línea de salida.

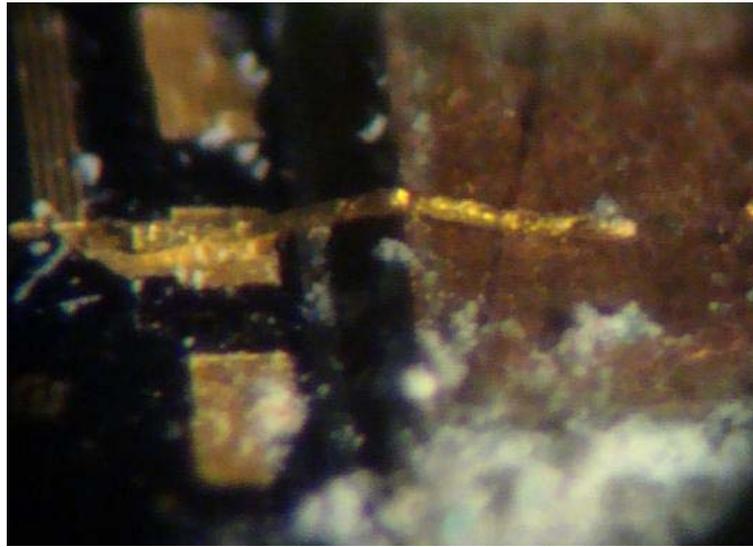


Fig. 4.24: Bondings entre el ALH376 y la línea de salida.

Se puede apreciar que el bonding entre el MMIC y la línea de salida es bastante recto. En las simulaciones se observó que esta geometría no es la mejor ya que un poco mas de curvatura en el bonding mejora la señal transmitida, aun así las diferencias no son tan relevantes (ver anexo A.2). La diferencia de alturas entre los *pads* del MMIC y las líneas de cobre no permitió fabricar un bonding mas curvo, además el bonding no se puede remover fácilmente del MMIC ya que este es muy frágil, por lo tanto no se puede fabricar otro bonding sin correr el riesgo de dañar el amplificador.

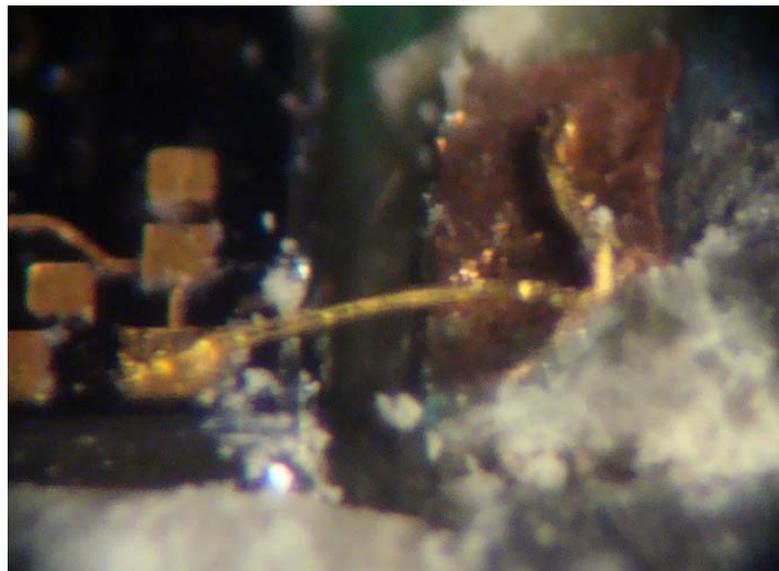


Fig. 4.25: Bondings entre el ALH376 y la tarjeta de polarización.

En la figura 4.25 se puede observar el bonding entre el MMIC y la tarjeta de polarización. La forma de este es mucho más curva que el bonding de la figura 4.24 probablemente esto se debe a que para realizar esta unión se realizó presión externa sobre la tarjeta para dejarla firme al momento de realizar el bonding. Además se puede ver hilo extra del bonding sobre la superficie de cobre, este hilo se debe a que en algún intento anterior de realizar el segundo bonding el hilo no se cortó y se cortó al realizar el primer bonding siguiente.

Capítulo 5

Resultados

La prueba del bloque final se realizó en el DAS utilizando el VNA del laboratorio de Ondas Milimétricas. Primero se calibró el VNA para realizar mediciones de dos puertos, luego se conectan los puertos de entrada/salida y el conector de polarización al bloque. La polarización se conectó a una fuente de poder a 6V y se calibró el potenciómetro para alimentar el bloque con 4V. En el montaje de la figura 5.1 se puede distinguir los puertos de entrada/salida, el conector externo y finalmente la tarjeta de polarización.

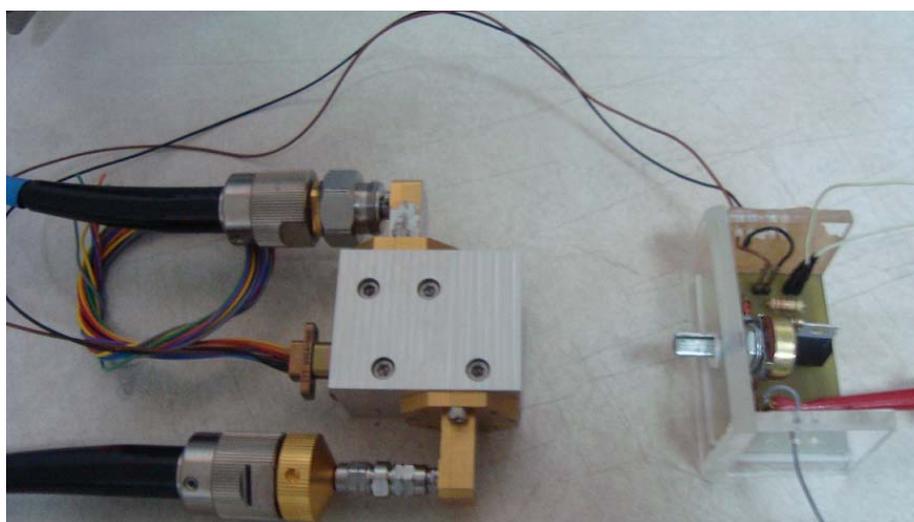


Fig. 5.1: Montaje para realizar la medición del bloque final.

La figura 5.2 representa un esquema del amplificador y de los puertos. S_{ij} representa el parámetro S desde el puerto j al puerto i. Las antenas fueron fabricadas de tal forma de minimizar S_{11} y S_{22} , ambas funciones deben ser similares ya que el sistema es simétrico. El parámetro S_{21} debe entregar la ganancia del amplificador, el cual debe ser totalmente distinto al parámetro S_{12} ya que el ALH amplifica solo en la dirección 1-2. En la figura 5.3 se puede observar la transmisión y reflexión de la señal entre los puertos del VNA.

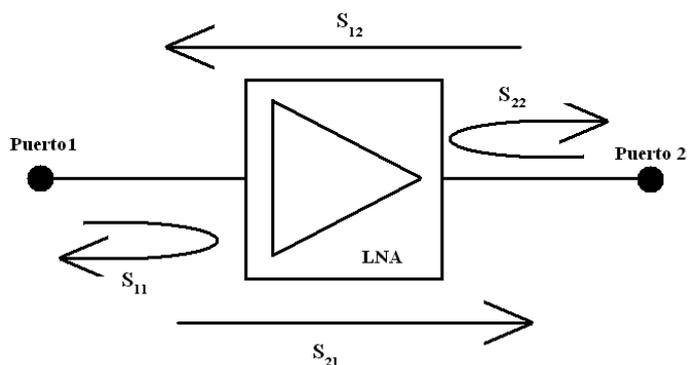


Fig. 5.2: Diagrama de los parámetros que se midieron en el VNA.

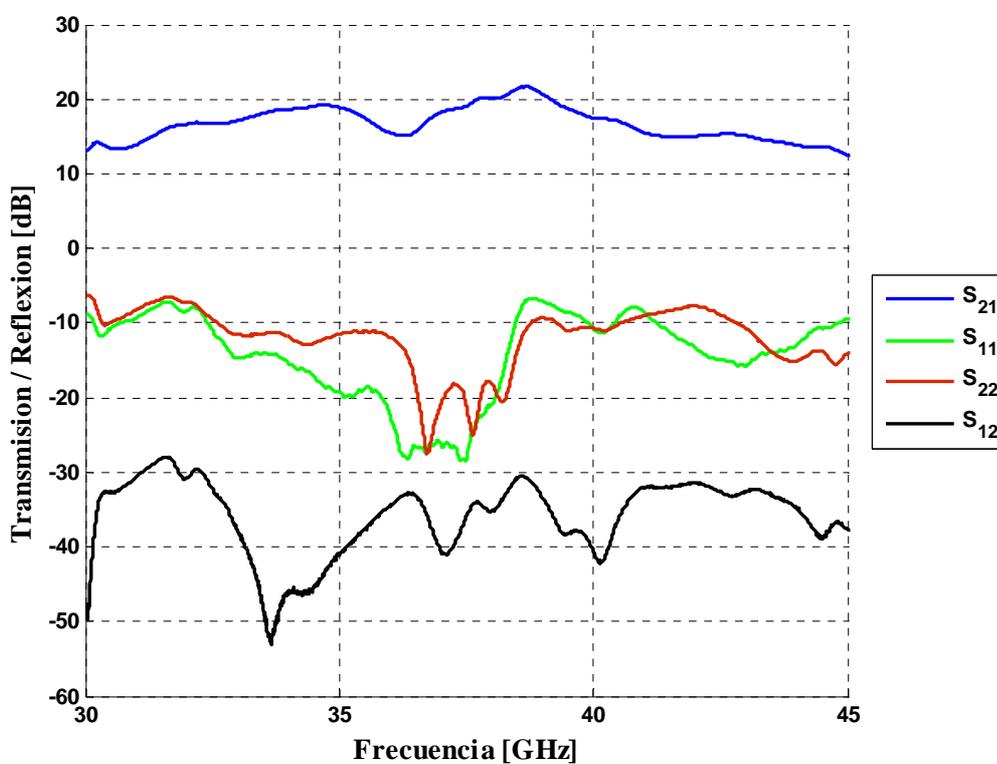


Fig. 5.3: Transmisiones y reflexiones del bloque final.

Claramente el bloque fabricado logra amplificar la señal con una ganancia entre 13dB a 30GHz y 21dB a 39GHz. La reflexión de la señal de entrada S_{11} es cercana a los -10dB minimizando posibles ondas estacionarias entre el OMT y el amplificador. La transmisión desde la salida hacia la entrada del amplificador es prácticamente nula ~ -30 dB.

En la figura 5.4 se comparan las mediciones obtenidas con las curvas del *datasheet*[7] del ALH376, la curva azul representa los datos obtenidos, la curva negra corresponde a los datos del fabricante. Las ganancias son similares excepto en el rango 35GHz a 40GHz donde se observa un curvatura extra en la medición.

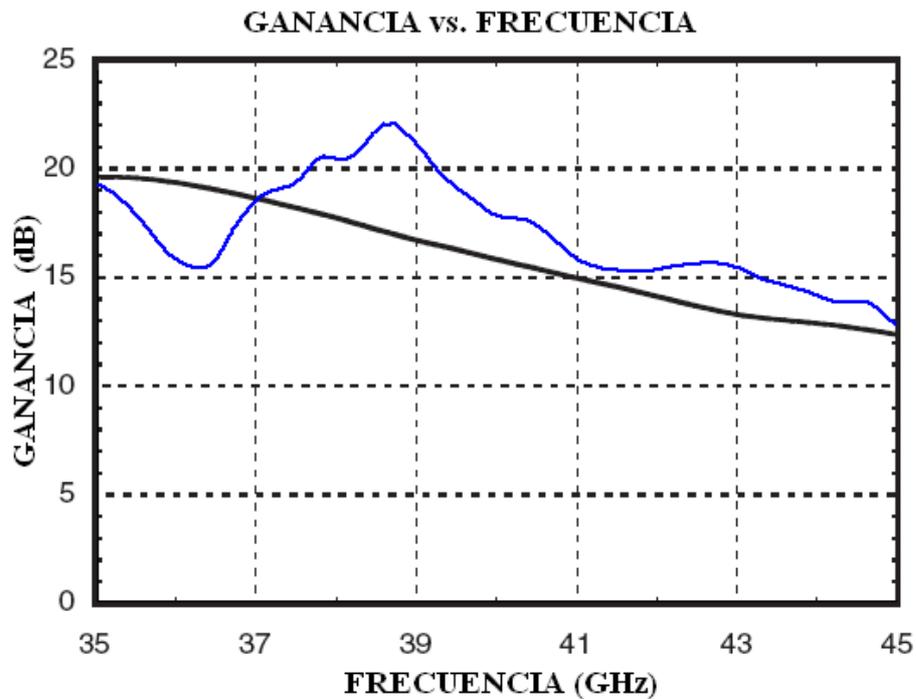


Fig. 5.4: Ganancia del ALH376. La curva azul representa los datos medidos, la curva negra son los datos entregados por el fabricante.

Existen diversos factores que pueden motivar la diferencia entre ambas curvas, los más relevantes son: la fabricación de la antena, los bondings y la limpieza. Además es importante destacar que la ganancia entregada por el fabricante corresponde al amplificador medido directamente en los terminales, sin el empaquetamiento. Esto último afecta considerablemente el desempeño ya que se introducen otros factores como: la antena, el bloque, los bondings y las guías de onda.

Durante el funcionamiento del amplificador se verificó que funciona con 4V, la caída en la resistencia de $1,3\Omega$ es 0,115V, por lo tanto requiere una corriente de 88mA, generando un consumo de 350mW.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se diseñó, fabricó y midió un amplificador de microondas de bajo ruido para la banda de 31GHz a 45GHz. Primero se diseñó una antena que permita minimizar las reflexiones bajo -25dB entre una guía WR22 y una línea *microstrip* de 50Ω. El diseño se adaptó para utilizar el amplificador comercial: ALH376, por último, se diseñó la polarización para energizar el MMIC.

Para analizar la viabilidad de construcción del bloque diseñado se fabricó un bloque de prueba más simple que permitió idear y definir los pasos necesarios para elaborar las piezas finales. Además, con el estudio del bloque de prueba se observó la relevancia de la antena en la respuesta del bloque, concluyendo que para obtener los resultados esperados del diseño es necesario fabricar la antena con alta precisión.

La construcción del bloque final y las antenas se llevó a cabo utilizando la CNC del DAS. En la construcción de éstos se utilizó el conocimiento adquirido durante la realización del bloque de prueba para poder fabricar las antenas y el bloque final. Las tarjetas de polarización se fabricaron mediante un método fotoresistivo simple y preciso. La conexión eléctrica entre los *pads* de los componentes se llevó a cabo utilizando la Bonding Machine del DIE. Esta máquina posee seis parámetros que se deben definir para poder confeccionar un *bonding*. Después de muchos intentos se logró adquirir el dominio suficiente de la máquina para realizar la conexión entre los *pads* del ALH376 y las líneas de cobre.

Una vez construido el amplificador y la polarización para energizarlo se midió la ganancia obtenida utilizando el Vector Network Analyzer(VNA) del DAS. A pesar que las mediciones no concuerdan totalmente con los valores entregados por el fabricante (el cual presenta una curva más monótona) los resultados son satisfactorios ya que se obtiene una ganancia promedio superior a 15dB en toda la Banda 1. La curva entregada por el fabricante corresponde a las

mediciones del amplificador sin empaquetar y por lo tanto es lógico esperar que la respuesta no sea igual ya que se deben agregar los efectos de las antenas, guías de ondas y bondings.

El resultado es bastante bueno para ser el primer amplificador que se fabrica, teniendo en cuenta que se fabricó completamente con los elementos de la Universidad de Chile gracias a las inversiones realizadas por los laboratorios del DAS y del DIE.

Recomendaciones

A pesar que el bloque fabricado funciono en el primer intento se encontraron varios errores en el proceso de diseño y fabricación, los cuales fueron detectados al término de la construcción del amplificador. A continuación se enumeran los errores y las recomendaciones que se deben tener en cuenta en la fabricación de otro amplificador:

1. Hacer una guía para los cables del conector de la polarización en la mitad inferior del bloque ya que sino el bloque no cierra correctamente.
2. En el diseño actual el conector de la polarización esta justo en la mitad del bloque, el problema con este diseño es que al abrir el bloque se puede soltar el conector y con su propio peso puede arrastrar la tarjeta de polarización y romper el bonding entre la polarización y el MMIC. Un diseño más seguro es ubicar el conector por completo en la mitad inferior del bloque, de esta forma el bloque se puede abrir sin peligro.
3. Durante la fabricación lo primero que se monto fue el MMIC, esta fue una mala estrategia ya que todos los residuos del montaje de los otros componentes fue a parar sobre el MMIC, el cual es difícil de limpiar debido a su fragilidad. Una mejor estrategia es fijar los otros componentes primero y montar el MMIC al final.
4. Durante el montaje del ALH376 era difícil controlar la cantidad de pegamento epoxico en la superficie e inevitablemente se rebasaba. Para que no suceda esto se puede realizar un pequeño sacado en el lugar donde se monta el MMIC de tal forma que el pegamento no rebase.

Referencias

[1] Burke, B.F & Graham-Smith, F. 2002, *An introduction to Radio Astronomy*, Cambridge University Press, 1997.

[2] Thompson, A. R. 1999, *Synthesis Imaging in Radio Astronomy II*, G.B. Taylor, C.L. Carilli, R.A. Perley, Eds., APS Conference Series, 180, 11

[3] Peck A. B.; Beasley A.J., 2008, *High resolution sub-milimeter imaging with ALMA*. J. Phys. Conference Series 131 012049

[4] F.J. Lovas and R.A. Dragoset, *NIST Recommended Rest Frequencies for Observed Interstellar Molecular Microwave Transitions*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD., version 2.0.1, 2002

[5] M. Birkinshaw, 1999, *The Sunyaev-Zel'dovich effect*, Phys. Rept. 310:97-195

[6] "Ansoft Corporation", Disponible en: <http://www.ansoft.com>

[7] "Hittite Microwave Corporation", Modelo HMC-ALH376 Disponible en: <http://www.hittite.com>

[8] Kooi, J.; Chattopadhyay, G.; et cols, 2003, *A full-height waveguide to thin film microstrip transition with exceptional rf bandwidth and coupling efficiency*. En *MM WAVES*, vol 24, No 3.

[9] "Rogers Corporation", Disponible en: <http://www.rogerscorporation.com>

[10] Devlin L, "*How to Design Low-Cost MM-Wave Equipment*", Plextek Ltd, Great Chesterford.

[11] "Kontakt Chemie", Postiv20, Disponible en:

http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/749/749-004/orn.749-004.1.pdf

[12] "Kulicke and Soffa", Disponible en: <http://www.kns.com>.

[13] Wilson T. L, Rohlfis K., *Tools of Radio Astronomy*, Springer Fifth Edition.

[14] B.R. Nag, *Physics of Quantum Well Devices*, Institute of Radio Physics and Electronics, Calcutta University.

Anexos

A.1 Fabricación de placas utilizando Positiv20.

A continuación se detallan los pasos y los materiales para fabricar las placas utilizando el químico Positiv20.

Los materiales necesarios son los siguientes:

- Transparencias para impresora.
- PCB para fabricar el circuito.
- POSITIV 20
- Soda Caustica
- Luz ultravioleta. La fuente de luz ultravioleta se puede conseguir en cualquier casa royal.

Los pasos para fabricar el circuito son los siguientes:

- Diseñar la PCB utilizando Eagle o un programa similar
- Imprimir el diagrama del circuito en la transparencia verificando que se obtenga un buen contraste entre la zona que se desea remover y el trazado en que se mantendrá el cobre
- Limpiar con acetona la placa de cobre y luego remover cualquier resto con agua
- En un lugar con baja luz colocar la placa horizontalmente y pintarla con POSITIV 20 desde 20cm de distancia. Una capa mas delgada de fotoresistencia es mejor a una capa gruesa. Dejar secando en un lugar ventilado durante 20 minutos. La placa debe adquirir un tono morado.
- Poner la pieza a calentar durante 10 minutos a menos de 50°C en un cuarto con baja luz. Si se utiliza un secador de pelo se debe mantener el ventilador alejado ya que el aire puede desplazar la capa de positiv.
- Colocar la transparencia con el circuito impreso sobre la placa y exponer a una fuente de luz ultravioleta durante 8-10 minutos. El tiempo necesario depende del espesor de la capa de positiv y de la fuente ultravioleta que se utilice. Luego de retirar la capa si se logra observar levemente el circuito en color verde es porque la exposición fue correcta. Se retira la transparencia.

- Preparar una solución de soda caustica (10gr por litro de agua) y mover lentamente hasta que el circuito impreso aparezca en el cobre.
- Finalmente utilizar cloruro férrico para remover el cobre en las zonas en las cuales no hay circuito impreso.

Las variables más críticas para obtener un buen resultado son: la capa de positiv20 que se deposite sobre la placa, el tiempo de exposición de luz UV y la concentración / tiempo que la placa está sumergida en la soda caustica.

A.2 Simulaciones de Bondings

Para estudiar el efecto de la forma del bonding en la transmisión de la señal se simuló un sistema simple compuesto por dos líneas *microstrip* de 50Ω . Al igual que en la fabricación del bloque final existe una diferencia de 0,035mm de altura entre cada una de las líneas y una separación de 0,0762mm entre ambas líneas.

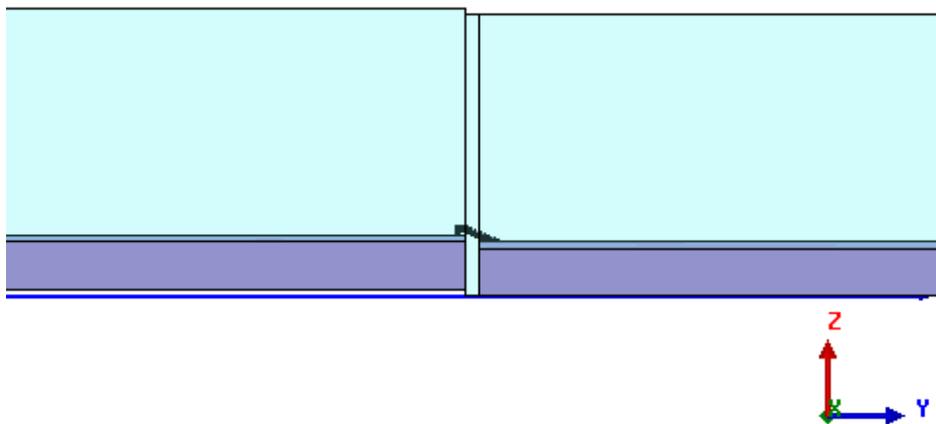


Fig. 7.1 Bonding que se desea simular

Se utilizan dos puertos, uno en cada línea microstrip y se mide la transmisión de la señal desde un puerto a otro variando el número de puntos que componen el bonding. El caso de 3

puntos corresponde a un bonding triangular. En la figura 7.2 se presenta el coeficiente de transmisión para bondings de 3, 4, 5, 8 y 15 puntos.

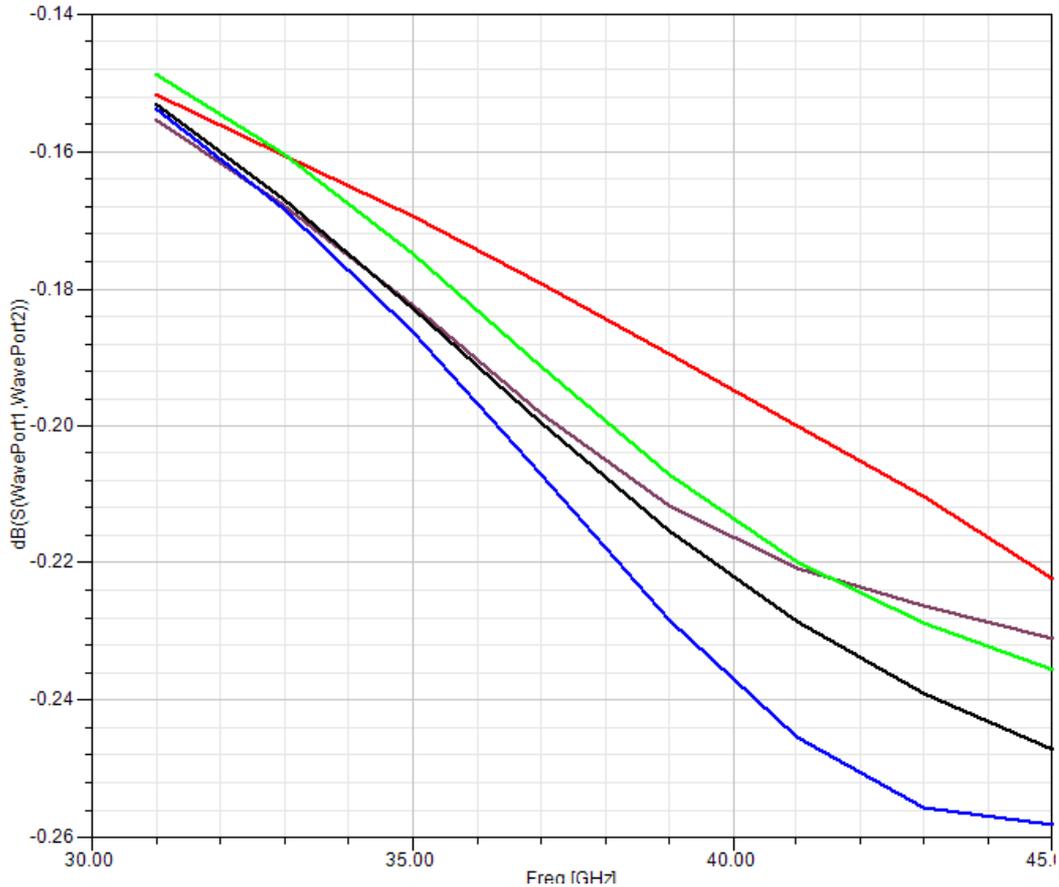


Fig. 7.2: Resultado de la simulación estudiando el efecto de la forma del bonding

En la figura 7.2 el color rojo corresponde a 3 puntos, el color morado a 4 puntos, el color verde a 5 puntos el color negro a 15 puntos y el color azul a 8 puntos. Se puede observar que el bonding con 3 puntos es que el que posee menos transmisión, pero la diferencia no es tan relevante $\sim 0.2\text{dB}$.