



El patrón de efecto Josephson del CENAM ; experiencias en 15 años de uso

David Avilés ¹, Dionisio Hernández ², Enrique Navarrete ³

¹ CENAM, Querétaro, México, caviles@cenam.mx

² CENAM, Querétaro, México, dhernand@cenam.mx

³ CENAM, Querétaro, México, enavarre@cenam.mx

Resumen: Este trabajo sintetiza algunas de las experiencias en el uso del patrón de efecto Josephson del CENAM, así como algunas modificaciones hechas al mismo con el propósito de disminuir su susceptibilidad al ruido electromagnético.

Palabras clave: Patrón de efecto Josephson.

1. INTRODUCTION

En 1994 el CENAM adquirió un sistema de efecto Josephson de la compañía Research Manufacturing Company que comercializaba el desarrollo del NIST. El sistema se adquirió con dos chips que permitían generar niveles de tensión cuánticos en el intervalo de -1 V a +1 V y en el intervalo de -10 V y +10 V.

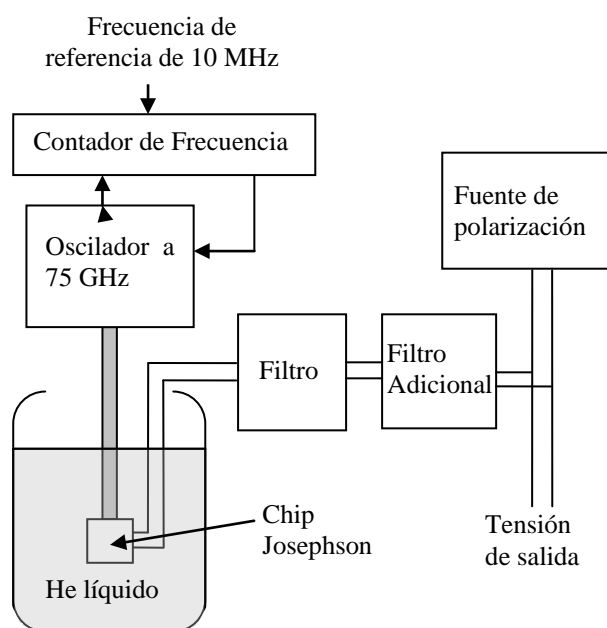


Fig. 1. Diagrama a bloques del patrón de efecto Josephson

Los principales elementos del patrón de efecto Josephson son: dos chips de 3660 uniones (± 1 V) y de 20208 uniones (± 10 V) con tecnología SNS.

El sistema de microondas que genera una señal del orden de 75 GHz está basado en un oscilador a diodo Gunn, cuya frecuencia se estabiliza y se mide por medio de un contador de frecuencia EIP 578B, que tiene como referencia de frecuencia externa de 10MHz un reloj atómico de Cesio. La señal de microondas se conduce por medio de una guía de ondas dieléctrica, al chip colocado dentro de un criostato que contiene helio líquido.

Una fuente de polarización permite ajustar el patrón a un cierto nivel de tensión cuántico deseado. La fuente de polarización incluye también un sistema de barrido y conexiones a un osciloscopio que permiten visualizar las formas de onda tensión-corriente para fines de diagnóstico [1].

2. CAMBIO DE CHIP

El chip de 10 V presentó un problema conocido como "offset" inducido por microondas, se trata de un problema en los contactos eléctricos entre las terminales del chip y el conector de los cables de entrada-salida. El contacto se hace usando un conector en forma de pequeño peine hecho de BeCu recubierto de oro, que hace los contactos a presión con las terminales del chip. Cuando la conexión no es buena el contacto actúa como un diodo que rectifica la señal de microondas y produce un "Offset" sumado a la tensión de salida que puede verse como una fem térmica. Sin embargo, a diferencia de una fem térmica el "offset" inducido por microondas desaparece al apagar las microondas. El "offset" medido fue de 2.5 μ V. Este "offset" puede ser cancelado con la técnica de cambio de polaridad utilizada en este tipo de mediciones, pero si no es estable en el tiempo, la cancelación no es buena ocasionándose un incremento en la incertidumbre del patrón. La manera usual de corregir este problema es mover ligeramente el peine para mejorar los contactos, al hacerlo se dañaron las pistas del chip y éste quedó inservible.

Decidimos sustituir el chip por uno con tecnología del PTB marca PREMA, el cual resultó totalmente compatible con el sistema desarrollado en el NIST, la única diferencia que observamos fue que con el chip PREMA tuvimos mayores problemas de flujo atrapado al enfriarlo, este problema se resolvió cambiando la técnica de enfriamiento del chip como se describe en la sección 6.

3. MODIFICACIONES A LA FUENTE DE POLARIZACIÓN

Cuando se usa el patrón para calibrar una fuente de tensión, el patrón genera una tensión cercana a la de la fuente y se mide la diferencia con un detector de nulos. Para eliminar las fms térmicas del circuito de medición y el “offset” del detector de nulos se utiliza la técnica de cambio de polaridad. Para que esta técnica funcione de manera óptima se requiere tener nulos muy pequeños en ambas polaridades, en la fuente comercial era necesario ajustar la tensión de polarización cada vez que se cambiaba la polaridad para tener el mismo nivel cuántico en ambas polaridades, ya que la tensión de polarización era un poco diferente en una polaridad en relación con la otra. Para evitar este ajuste que hace lenta la operación del patrón e incrementa las incertidumbres por fms térmicas no compensadas, se modificó el circuito introduciendo la posibilidad de añadir un “offset” ajustable en una de las polaridades tal que permite que cuando se cambia la polaridad del patrón, automáticamente se tiene el mismo nivel de tensión que en la polaridad contraria.

En algunas aplicaciones como la comparación directa de patrones Josephson es importante poder seleccionar un escalón cuántico en particular, con la fuente original era muy difícil seleccionar un escalón en particular, por lo que se modificó el circuito añadiendo un potenciómetro que facilita el ajuste fino de la tensión de polarización para ajustarla a un nivel cuántico deseado.

4. MEJORANDO LA ESTABILIDAD DEL PATRÓN

Los patrones de efecto Josephson basados en chips con tecnología SNS tienen uniones Josephson histeréticas de alta capacitancia y son intrínsecamente inestables ya que tienen anchos de escalón del orden de 20 μA , es decir que ruidos producidos por el sistema de medición o generados en el laboratorio pueden hacer cambiar el nivel cuántico del patrón con gran facilidad.

Es usual que durante una medición utilizando este tipo de patrones se tengan varios “saltos de escalón” espontáneos, es decir cambios en el nivel cuántico. Cuando estos saltos de escalón ocurren es posible detectarlos, desechar algunas lecturas y recalcular el valor de la tensión del patrón o nivel cuántico y seguir la medición. En la calibración de referencias electrónicas en base a diodos Zener, si estos cambios son menores a 1 mV los errores producidos por la ganancia del detector de nulos son despreciables. Sin embargo, en otras aplicaciones como en la calibración de

pilas patrón estos cambios de nivel de la tensión de salida son indeseables.

Para incrementar la estabilidad e inmunidad del patrón a ruido electromagnético se construyó un filtro pasa bajas, adicional al que incluye el sistema comercial, con una frecuencia de corte de alrededor de 1 kHz, filtrando el ruido en modo común y en modo diferencial, ver figura 2.

El filtro se diseñó en base a inductores y capacitores para minimizar el error en la tensión de salida debido al efecto de divisor de tensión producido por el filtro.

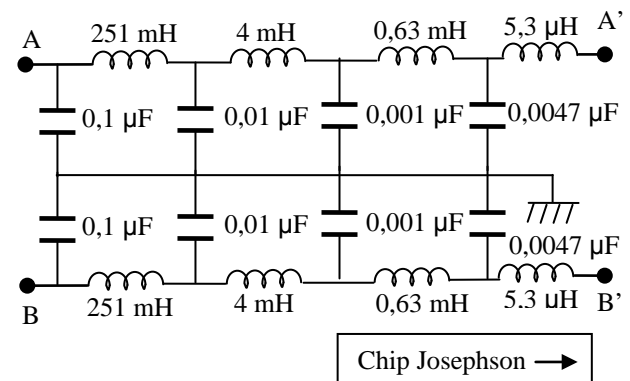


Fig. 2.- Circuito eléctrico del filtro adicional.

El filtro fue diseñado para filtrar el ruido en modo diferencial y en modo común. Cada etapa del filtro se aloja en blindajes independientes para disminuir la interferencia electromagnética de alta frecuencia.

La figura 3 muestra la respuesta en frecuencia del filtro adicional descrito.

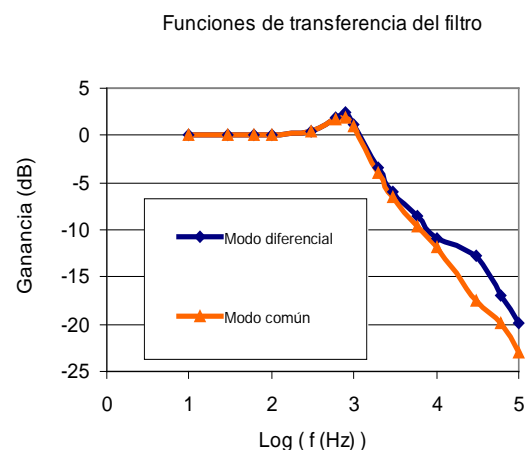


Fig. 3. Respuesta en frecuencia del filtro adicional, medida en modo común, es decir, tomando la entrada en A-tierra y la salida en A'-tierra, así como en modo diferencial, es decir, tomando la entrada en A-B y la salida en A'-B'.

5. EL SISTEMA DE MICROONDAS

El sistema funciona a una frecuencia de alrededor de 75 GHz. Como referencia de frecuencia se utiliza un reloj atómico de Cesio del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del CENAM, ubicado en otro edificio. La conexión se hace mediante un cable coaxial de aproximadamente 100 m de largo que atenúa considerablemente la señal. Para amplificar la señal de 10 MHz proveniente del reloj atómico, se diseñó un amplificador (ver figura 4) ubicado a la entrada del contador de frecuencia. Con una ganancia en tensión de 4, se produce una tensión en la carga de 2 V pico.

Debido a que la impedancia de entrada del contador de frecuencia es de 300Ω se diseñó un transformador para ser colocado a la entrada de frecuencia de referencia externa del contador, el cual permitió acoplar las impedancias y también tener un aislamiento eléctrico respecto al reloj atómico con lo que mejoró el amarre y la estabilidad en frecuencia del contador.

Se midió la estabilidad en frecuencia de la señal de referencia de 10 MHz a la salida del transformador, usando la desviación de Allan y se encontró que es menor a 1×10^{-11} para tiempos de muestreo de 10 s a 82 000 s.

6. CAMBIO DE TECNICA PARA EL ENFRIAMIENTO DEL CHIP

Para obtener el efecto superconductor es necesario enfriar el chip Josephson a 4.2 K introduciéndolo en un tanque que contiene helio líquido. Esta inmersión debe ser hecha lentamente para evitar cambios bruscos de temperatura que dañen al chip, el proceso de enfriamiento toma aproximadamente 1/2 hora.

Con el chip PREMA se presentaron muchos problemas de flujo atrapado, este problema normalmente se presenta cuando al enfriar el chip se tiene la influencia de un campo magnético externo que provoca que en el superconductor circulen pequeñas corrientes que mantienen el flujo magnético y que evitan el correcto funcionamiento del patrón. Para evitar este problema el chip está blindado con un material de muy alta permeabilidad que requiere ser desmagnetizado con cierta frecuencia.

Es común tener problemas de flujo atrapado en los chips de efecto Josephson, usualmente el problema se resuelve cuando se saca el chip del helio líquido, se deja calentar un poco hasta que las uniones Josephson salen del estado superconductor y se enfría nuevamente. Sin embargo, cuando esto se hace en repetidas ocasiones y no se elimina el flujo atrapado no se puede operar el patrón debido a que no se puede asegurar el valor de la tensión Josephson.

En el Laboratorio de Tensión Eléctrica Continua del CENAM tuvimos el problema de flujo atrapado en repetidas ocasiones, intentamos varias soluciones y la que mejor nos funcionó fue cambiar la técnica de enfriamiento.

Usualmente al enfriar se recomienda poner un corto circuito en los cables que se conectan al chip Josephson, lo que

probamos fue enfriar el chip manteniendo la fuente de polarización conectada y haciendo un barrido de tensión en el chip, con esto disminuyeron considerablemente los problemas de flujo atrapado.

7. INCERTIDUMBRE DEL PATRÓN DE TENSIÓN JOSEPHSON DEL CENAM

Tabla 1. Fuentes de incertidumbres del Patrón

Fuentes de incertidumbre	Incertidumbre
Frecuencia	1,2 nV
Corrientes de fuga	0,3 nV
Fems térmicas no compensadas + error del detector de nulos	6,9 nV
Incertidumbre estándar combinada	7,0 nV

La principal fuente de incertidumbre del patrón es la proveniente de las fems térmicas no compensadas que ocurren cuando la operación del patrón es lenta y las fems térmicas no son bien compensadas debido a que cambian durante las mediciones por cambios de temperatura en el sistema de medición. La estimación de la incertidumbre del patrón Josephson se describe en detalle en la referencia [2].

8. COMPARACIONES INTERNACIONALES

Tabla 2. Resultados en comparaciones internacionales a nivel de 10 V

	Diferencia	Incertidumbre expandida ($k=2$)
NIST – CENAM (ILC – NCSL 1996)	26 nV	100 nV
NIST – CENAM (ILC – NCSL 1999)	67 nV	216 nV
NIST-CENAM Bilateral 2006	-35 nV	43 nV

En 1996 se participó en una comparación bilateral de patrones de efecto Josephson a nivel de 10 V entre NIST y CENAM, dentro del marco de la International Laboratory Comparison (ILC) organizada por el NCSL. Los patrones viajeros fueron 4 referencias Zener, en esta comparación se hicieron correcciones por altitud y por deriva [3].

En 1999 se participó nuevamente en la ILC-NCSL en la cual se utilizaron 4 referencias Zener como patrones viajeros, se hicieron correcciones por presión atmosférica y por deriva. Se presentan los resultados respecto al NIST [4].

En 2006 se participó en una comparación bilateral con NIST, la comparación se hizo en el CENAM midiendo 4 referencias Zener con el patrón Josephson de CENAM y el patrón Josephson transportable de NIST, con esto se

eliminaron los efectos de deriva y las correcciones por presión atmosférica con lo que fue posible reducir la incertidumbre de la comparación a 43 nV (k=2), [5].

AGRADECIMEINTOS

Los autores agradecen a nuestros compañeros M. en C. Jorge Blancas y al Ing. Mario Alatorre por el diseño y construcción del amplificador de 10 MHz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] C.A. Hamilton, C.J. Burroughs, and C. Kao, *Operation of NIST Josephson Array Voltage Standard*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol, Vol. 95, pp. 219-235, 1990.

[2] E. Navarrete, D. Hernández, D. Avilés, *Estimación de la Incertidumbre del Patrón Nacional de Tensión Eléctrica en Corriente Continua Basado en el Efecto Josephson*, Simposio de Metrología 25-27 de Octubre de 2005.

[3] C.M. Wang and C.A. Hamilton, *The Fourth Interlaboratory comparison of 10 V Josephson Voltage Standards in North America*, Metrologia, Vol. 35, pp 33-40, 1998.

[4] D. Deaver, W. B. Miller, L. Pardo, K. Jaeger, D. Plowman and C.A. Hamilton, *Interlaboratory Comparison of Voltage Standards*, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 2 April 2001.

[5] D. Hernández, E. Navarrete, D. Avilés, Y. Tang, *Final Report. Bilateral Comparison of DC Voltage References between CENAM and NIST (SIM.EM.BIPM-K11.b)*, Metrologia 44 Technical Supplement (Technical Supplement 2007) 01011

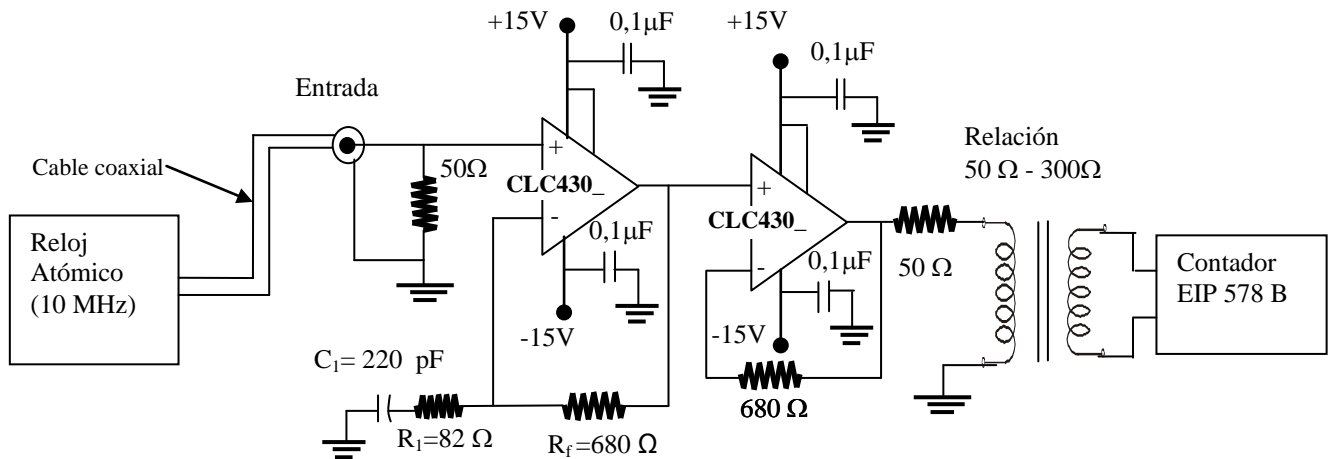


Fig. 4. Amplificador para la referencia de frecuencia de 10 MHz