

INFLUENCIA DE LOS CONTACTOS ELÉCTRICOS EN DISPOSITIVOS BASADOS EN EL EFECTO HALL CUÁNTICO.

Z. Rivera-Alvarez^{1,4*}, F. Hernández^{2*}, L. Zamora-Peredo³, A. Guillén-Cervantes¹,
J. Huerta⁴, V. H. Méndez-García³, y M. López-López¹

¹⁾ Departamento de Física, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Apdo. Postal 14-740, México DF, México 07000.

²⁾ Centro Nacional de Metrología, km 4.5 Carretera a los Cués, Municipio El Marqués. C.P. 76900, Querétaro, México. Apdo. Postal 1-100 Centro, C.P. 76000.

³⁾ Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Álvaro Obregón 64, San Luis Potosí, S.L.P, México 78000.

⁴⁾ Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN. Av. Legaria # 694, Col. Irrigación. C.P. 11500, Del. Miguel Hidalgo. México, DF.

Teléfono: +52 55 57 47 38 28, Fax: +52 55 57 47 70 96

* Estudiante de postgrado en CICATA ⁴⁾

Correo electrónico: zrivera@fis.cinvestav.mx

Resumen: Se desarrollaron una serie de dispositivos que manifiestan el efecto Hall cuántico con el fin de obtener el patrón de resistencia eléctrica mediante este efecto. El diseño, la fabricación de la pastilla semiconductor y el procesamiento para obtener el dispositivo fueron desarrollados totalmente en México. Se presentan estos resultados y se hace un análisis de los dispositivos donde se manifiesta la influencia de los contactos en la degradación de la cuantización de la resistencia. Se proponen modificaciones en la fabricación con el objetivo de obtener dispositivos para aplicaciones en Metrología.

1. INTRODUCCIÓN

Desde enero de 1990, la resistencia Hall cuantizada de un gas bidimensional de electrones (GBE) es usada como referencia de la unidad de resistencia eléctrica [1]. De tal manera que los institutos nacionales de metrología más importantes del mundo han logrado obtener una incertidumbre relativa a la medición de unas cuantas partes en 10⁹ [2]. De hecho existen esfuerzos por contar con sistemas comparables para la reproducción de la unidad de resistencia a nivel industrial [3].

El comercio mundial, en el cual México participa activamente, establece la necesidad de emplear patrones reconocidos internacionalmente para efectuar transacciones económicas. En este contexto tres instituciones mexicanas (CINVESTAV, IICO y CICATA), en colaboración con el Centro Nacional de Metrología (CENAM), han diseñado un proyecto cuyo objetivo principal es el desarrollo de dispositivos de efecto Hall cuántico (EHC) que puedan ser utilizados como referencias de resistencia eléctrica.

El EHC se presenta en un GBE a bajas temperaturas (~1 K) en presencia de campos magnéticos intensos (~10 T). En estas condiciones

la resistencia Hall (R_H) de un dispositivo de EHC asume valores cuantizados [4], según la ecuación (1).

$$R_H = R_{xy} = h/ie^2, \quad (1)$$

Donde i es un número entero, h es la constante de Planck y e la carga del electrón.

Dado que el valor de R_H depende de constantes físicas bien establecidas se puede obtener una referencia de resistencia eléctrica invariable de parámetros externos como: presión, humedad, estabilidad temporal, entre otros [5]. Los patrones basados en el EHC ofrecen enormes ventajas sobre los patrones de alambre: son más estables y precisos, además, la menor incertidumbre en la reproducción del Ohm ha sido alcanzada con estos dispositivos [2].

El EHC fue observado por primera vez en transistores de efecto de campo de metal-óxido-semiconductor basados en silicio. Sin embargo, en la actualidad las heteroestructuras de AlGaAs/GaAs que contienen un GBE son las más empleadas en Metrología debido a que operan con menores

intensidades de campo magnético, no requieren de aislamiento de compuerta y tienen corrientes críticas de operación mucho mayores [6,7]. Las estructuras de EHC son fabricadas con técnicas de crecimiento sofisticadas como Epitaxia por Haces Moleculares (EHM) ó Epitaxia en Fase Vapor de Compuestos Metalorgánicos, donde los parámetros de crecimiento son cuidadosamente controlados [2,5]. Uno de los aspectos importantes en el diseño de las estructuras de EHC es la concentración de portadores (n_s) en el GBE. Tal como se desprende de la ecuación 2, n_s define la intensidad de campo magnético (B) necesario para obtener un determinado valor de la resistencia cuantizada,

$$n_s = ieB/h \quad (2).$$

Es conveniente hacer notar que se recomiendan intensidades de campo menores a 10 T para el nivel $i = 2$ [2,3,8].

Algunas características adicionales que deben cumplir los dispositivos para ser utilizados en metrología, son las siguientes:

- 1) La resistencia longitudinal debe ser $< 10^{-5} \Omega$ para las corrientes y temperaturas de operación [2,6,7].
- 2) Se deben buscar corrientes de operación relativamente altas, del orden de 100 μA [6].
- 3) Deben presentar el efecto de cuantización a temperaturas relativamente altas, 4K sería lo ideal [2,3,8].
- 4) Los contactos deben ser óhmicos a las corrientes de operación, estables bajo ciclos criogénicos y a la exposición de campos magnéticos [7].
- 5) La dependencia de la movilidad electrónica abarca un amplio intervalo, desde 10 hasta 120 T^{-1} [6].

Las características 1), 3) y 4) están ligadas a las propiedades de los contactos metal-semiconductor, las condiciones de alambrado del dispositivo y del cableado del sistema de medición.

En este trabajo se presentan los primeros dispositivos diseñados y fabricados en México que presentan el EHC. Se analizan sus propiedades en términos de las características arriba mencionadas con el fin de evaluar su rendimiento para obtener patrones de resistencia eléctrica.

2. DETALLES EXPERIMENTALES

En la figura 1 se describe la estructura de los dispositivos de EHC que hemos fabricado [9]. Se fabricaron heteroestructuras de AlGaAs/GaAs que contienen un GBE por la técnica de EHM sobre substratos de GaAs semi-aislantes a una temperatura de crecimiento de 650 °C en un sistema Riber 32P con una presión base menor a 10^{-10} Torr. Se utilizaron celdas tipo Knudsen convencionales de Si, Al y Ga en el depósito de los materiales. Las estructuras fabricadas consisten en una capa suavizante de GaAs de 3.5 μm de espesor, 60 Å de AlGaAs, seguida por 900 Å de AlGaAs tipo n impurificado con Si en el orden de $10^{18} cm^{-3}$, finalmente se depositaron 100 Å de GaAs como capa protectora.

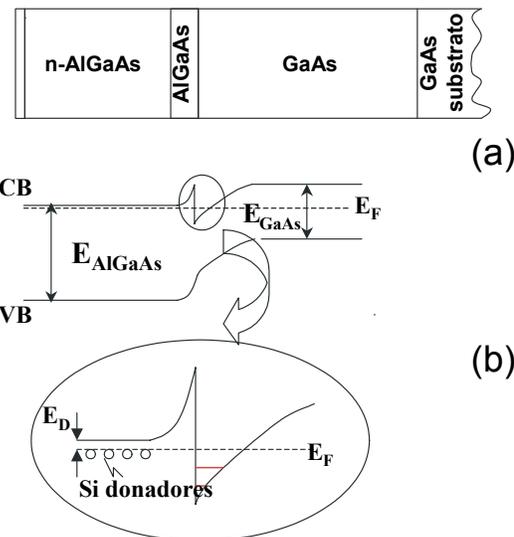


Fig. 1. Estructura de los dispositivos estudiados en el presente trabajo. En (a) se muestra un dibujo del dispositivo. En (b) un esquema del diagrama de bandas de energía. El gas de electrones en dos dimensiones se forma en el pozo de potencial triangular entre el AlGaAs y el GaAs.

Basados en la caracterización hecha por técnicas ópticas y mediciones eléctricas a temperatura ambiente y 77 K [9], se eligieron las muestras M5 y M6 que presentaron los valores de movilidad más altos e intensidades de campos eléctricos internos más bajas.

Las muestras fueron procesadas de la manera siguiente:

1. Corte en rectángulos de proporciones de 6 x 2 mm.

2. Elaboración de los contactos metal-semiconductor usando In aleado a 440 °C durante 2 minutos bajo un flujo de nitrógeno.

3. Alambrado al soporte del dispositivo usando hilos de Au de 25 μm de espesor y soldados con In.

Se utilizó un porta-muestras de alúmina libre de plomo con terminales de oro.

Como punto de referencia se empleó la muestra PTB 143 que se ha usado para obtener el patrón de resistencia eléctrica en el CENAM y cuyas características [2] y detalles de la estructura son similares a M5 y M6.

En la figura 2 se presenta un dispositivo fabricado en este proyecto (a), y el dispositivo de referencia PTB 143 (b).

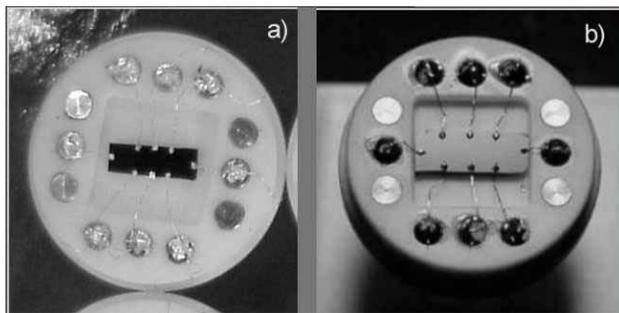


Fig 2. Dispositivo de efecto Hall cuántico instalado en su soporte. En a) M6 y en b) PTB 143.

Para analizar la cuantización de la resistencia se empleó la infraestructura desarrollada en el CENAM, la cual es descrita detalladamente en [10]. Las mediciones del EHC se realizaron con un sistema de bobina superconductor de operación automática sobre los parámetros de temperatura de muestra y campo magnético aplicado (hasta 1.3 K y hasta 12T, respectivamente). Haciendo uso de multímetros de alta resolución, se mide la tensión Hall (V_{xy}) y la tensión longitudinal (V_{xx}) de manera simultánea, mientras se hace un barrido de la densidad de flujo magnético. La adquisición de los datos se hace de manera automática para obtener las curvas de ambas tensiones contra campo magnético. Como fuente de corriente (47 μA) se utilizan tres patrones de referencia de tensión de 10 V en serie con una resistencia de 600 kΩ.

Se realizaron mediciones de cuantización de la resistencia a 1.3K y 4K. Complementariamente, mediante el efecto Hall clásico a temperaturas

superiores, se estudió la variación de la movilidad electrónica.

3. RESULTADOS

En las figuras 3-7 se presentan las curvas de resistencia longitudinal (R_{xx}) y transversal ($R_{xy} = R_H$) a baja temperatura en función de la intensidad del campo magnético de las muestras M6, PTB143, M6B y M5. En la figura 5 se muestran las curvas correspondientes a la muestra M6 para una temperatura de 4 K. Se pueden apreciar diferencias sustanciales en el comportamiento de R_{xx} y R_{xy} entre los diferentes dispositivos. Adicionalmente se determinó la movilidad electrónica a campos bajos a diferentes temperaturas. En la figura 8 se ilustra la dependencia de la movilidad con la temperatura y la aproximación a campo cero para la muestra M6.

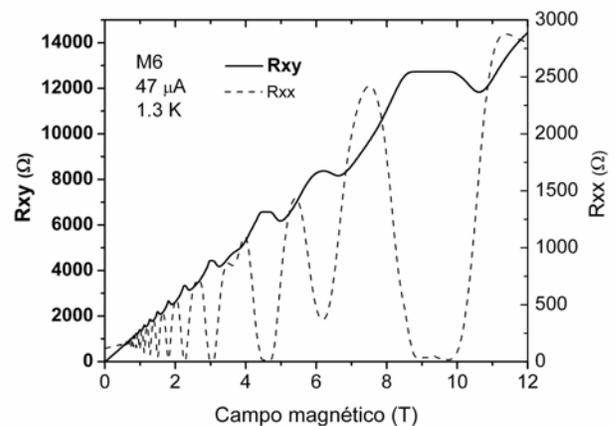


Fig. 3. Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo M6.

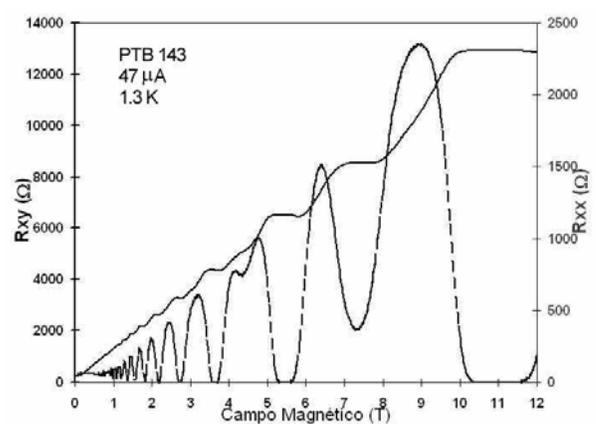


Fig. 4. Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo PTB 143.

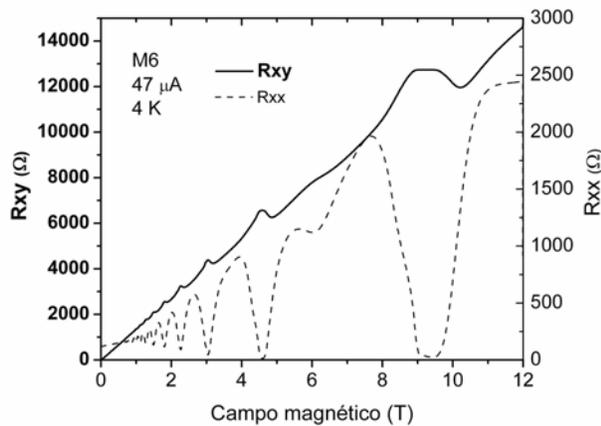


Fig. 5. Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo M6 a 4K.

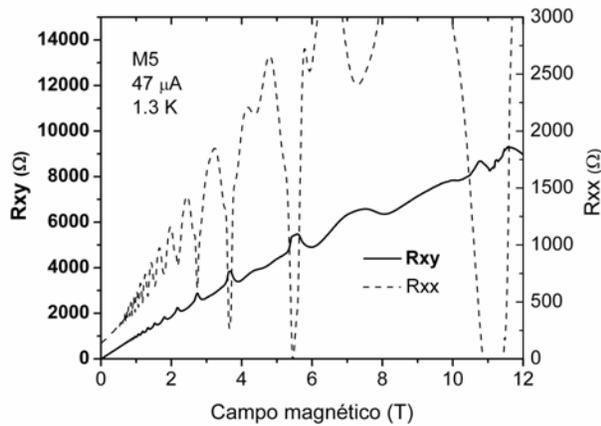


Fig. 6. Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo M5.

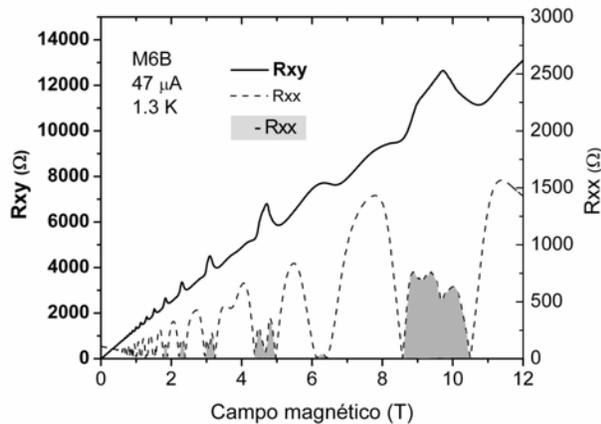


Fig. 7. Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo M6B.

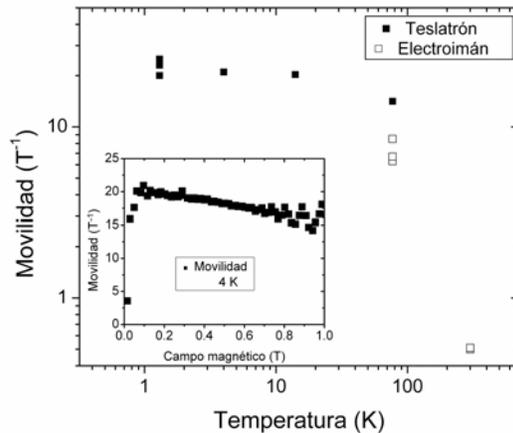


Fig 8. Dependencia de la movilidad con la temperatura para M6. En el inserto se presenta la aproximación de movilidad a campo cero.

4. DISCUSIÓN

Las curvas de cuantización de la resistencia eléctrica muestran que ésta solo se pudo generar en el dispositivo M6, tanto a 1.3 K (Fig. 3) como a 4 K (Fig.5). Se observa que en este dispositivo el nivel $i=2$ se presenta a campos magnéticos de 9.3 T. Este valor se encuentra dentro del intervalo recomendable para obtener el patrón de resistencia eléctrica [2, 8]. Usando la ec. (2), se obtiene que la concentración de portadores en el GBE es de $4.5 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$. Para este dispositivo se encuentra que la movilidad a 1.3K es de 22.7 T^{-1} .

Haciendo una revisión cuidadosa de las curvas se proporcionan, a continuación, diversos valores de R_{xx} y R_{xy} los cuales deben ser entendidos como preliminares. En la figura 3, en R_{xy} , la meseta para $i = 2$ es plana dentro de un intervalo de 2Ω , lo que limita su aplicación con fines de metrología. En el mismo nivel de cuantización, R_{xx} , esta contenida en una banda de 15Ω y presenta un mínimo en 16Ω , tomando este valor como dependiente de la resistencia de contacto, establecemos una resistencia de 8Ω por contacto.

Para el dispositivo PTB, (Fig. 4) para R_{xx} en $i=2$, es plana dentro de 0.4Ω , con un mínimo en $11 \text{ m}\Omega$, valor asociado la resistencia de contacto. Utilizando la ecuación (2), el valor de n_s es de $5.43 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$, por lo cual presenta efectos de cuantización a campos magnéticos más elevados que el dispositivo M6.

En la figura 5 notamos que M6 a 4 K, tiene una estrecha zona de cuantización para $i = 2$, lo cual limita su aplicación a esta temperatura.

En la figura 6 podemos apreciar que el dispositivo M5 no alcanza a concretar la cuantización. Los mínimos en R_{xx} que corresponderían a $i = 2$ e $i = 4$ presentan forma de vértices en vez de una zona plana de valor cercano a cero. Este tipo de comportamiento ha sido estudiado en las referencias [11, 12] y ha sido identificado como una pérdida del estado óhmico de los contactos para la intensidad de corriente aplicada. Hartland [7] sugiere explorar corrientes y temperaturas de medición menores para trabajar dispositivos con resistencia de contacto alta para aplicaciones de Metrología. Utilizando la ecuación 2 obtenemos una concentración, n_s , de $5.7 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$, similar al dispositivo PTB 143. La deficiencia en los contactos nos impide hacer una adecuada medición de movilidad.

En el caso del dispositivo M6B, (figura 7) si bien no se logra la cuantización, para R_{xx} se alcanzan a distinguir mínimos para $i=2$ y 4, de donde obtuvimos una concentración de portadores similar a M6. Los valores negativos son debidos a la superposición del potencial de medición de resistencia con el potencial interno de contacto. Basándose en esta información, M6 es homogénea en cuanto a concentración de portadores en el GBE, sin embargo el proceso de fabricación de contactos tiene aún deficiencias.

En la figura 8 se presenta la curva de movilidad en función de la temperatura para la muestra M6, si bien existen fuertes diferencias entre las mediciones a 77 K, debidas principalmente a cuestiones instrumentales, la tendencia de evolución con la temperatura (de $0.5T^{-1}$ para 300 K hasta $25 T^{-1}$ para 1.3 K) indica la alta calidad de la estructura semiconductor del dispositivo. En la gráfica insertada se presenta la aproximación de movilidad a campo cero usada para determinar esta propiedad a baja temperatura en el arreglo instrumental usado en el CENAM.

Un refinamiento en el procesado de los contactos que incluya un tratamiento de la superficie del semiconductor y un posible cambio del metal de contacto con el semiconductor, Sn en lugar de In, serían las opciones más inmediatas. El empleo de fotograbado para tener un control pleno de las geometrías del dispositivo esta en marcha y dentro de éste se contempla la elaboración de contactos

empleando evaporación de metales para la fabricación de los contactos óhmicos.

5. CONCLUSIONES

Se fabricaron dispositivos de EHC que presentan el fenómeno de cuantización de la resistencia eléctrica. En todos ellos los valores de la resistencia de contacto aún no son los óptimos y más aún, en algunos casos, los efectos de los contactos tienden a enmascarar la curva de cuantización. Sin embargo, las características de movilidad, concentración de portadores en el GBE y calidad de las interfaces indica que estas estructuras cumplen con las características necesarias para ser utilizadas como referencias de resistencia eléctrica.

REFERENCIAS

- [1] B.N. Taylor y T.J. Witt, New international electrical references based on the Josephson and quantum Hall effect, *Metrologia*, vol. 26, pp.46-62, 1989.
- [2] K. Pierz y B. Schumacher, Fabrication of quantum Hall devices for low magnetic fields, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 48, pp 293-295, 1999.
- [3] K. Jaeger, The need and use of intrinsic standards in U.S. industry, *Precision Electromagnetic Measurement Digest*, 1996 Conference on, pp 43-44, 1996, S. G. Semenchinsky, Quantized Hall effect standard for industrial use, *ibidem*, p. 249, y en K.B. Jaeger, P.D. Levine y C.A. Zack, Industrial experience with a quantized Hall effect, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 40, pp 256-261, 1991.
- [4] K. von Klitzing, K. G. Dorda, y M. Pepper, New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance, *Phys. Rev. Lett.*, 45 (1980) 495.
- [5] T. J. Witt, *Rev. Sci. Inst.*, 69 (1998) 2823.
- [6] A.D. Inglis e I. Minowa, Fabrication of precision quantised Hall devices, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 46, pp 281-284, 1997.
- [7] A. Hartland, R.G. Jones y D.J. Legg, The quantum Hall effect and the Ohm, Changes in the Value of the UK National Reference standards for the Volt and the Ohm, *IEE Colloquium on*, pp iv/1-iv/4, 1989.
- [8] A.D. Inglis, A cheaper, simpler quantized Hall resistance standard, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol.48, pp 289-292, 1999.
- [9] A. Guillén-Cervantes, Z. Rivera-Alvarez, F. Hernández, J. Huerta-Ruelas, V. H. Méndez-

García, L. Zamora, R. Peña Sierra, M. Meléndez-Lira, y M. López-López, Desarrollo en México de estrándares de resistencia eléctrica basados en el efecto Hall cuántico, Memorias del simposio de Metrología 2002.

- [10] F. Hernández, M.A. Escobar, C. Sánchez y D. Avilés, Reproduction of the Ohm based on the quantum Hall effect at CENAM, Precision Electromagnetic Measurement Digest, 1998 Conference on, pp 414-415, 1998.
- [11] K.C. Lee, Dependence of contact resistance on current for ohmic contacts to quantized Hall resistors, IEEE Trans. Instrum. Meas. vol. 48, pp 319-323, 1999.
- [12] H. Sakarya y G. Rietveld, Quantum Hall sample characterization, Precision Electromagnetic Measurement Digest, 2000 Conference on, pp 562-563, 2000.