

## Efectos de los contactos eléctricos en dispositivos de efecto hall cuántico basados en heteroestructuras AlGaAs/GaAs

Z. Rivera-Alvarez<sup>#\*</sup>, A. Guillén-Cervantes<sup>#</sup> y M. López-López  
 Departamento de Física, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN  
 Apdo. Postal 14-740, México DF, México 07000

F. Hernández  
 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

L. Zamora-Peredo, V. H. Méndez-García  
 Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
 Álvaro Obregón 64, San Luis Potosí, S.L.P, México 78000

J. Huerta  
<sup>#</sup>Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN  
 Av. Legaria # 694, Col. Irrigación. C.P. 11500, Del. Miguel Hidalgo. México, DF

Con el fin de obtener el patrón de resistencia eléctrica mediante el efecto Hall cuántico se desarrollaron una serie de dispositivos basados en heteroestructuras AlGaAs/GaAs. El diseño, la fabricación de las heteroestructuras semiconductoras y el procesamiento para obtener los dispositivos fueron desarrollados totalmente en México. Se presentan los resultados de la caracterización de los dispositivos y se hace un análisis de la influencia de los contactos en la degradación de la cuantización de la resistencia. Se discuten modificaciones en la fabricación con el objetivo de obtener dispositivos para aplicaciones en Metrología.

*Palabras clave:* Dispositivos semiconductores; GaAs/AlGaAs; Contactos óhmicos; Efecto Hall cuántico; metrología

In order to obtain the standard electrical resistance a set of quantum Hall effect devices based on AlGaAs/GaAs heterostructures were fabricated. The design, heterostructures fabrication and the overall process involved in the device fabrication were completely carried out in Mexico. The electrical measurements are presented, and the influence of the contacts on the degradation of resistance quantization is discussed. Several modifications are proposed in order to obtain Metrology quality devices.

*Keywords:* Semiconductor devices; GaAs/AlGaAs; Ohmic contacts; Quantum Hall effect; Metrology

### 1. Introducción

La resistencia Hall cuantizada de un gas bidimensional de electrones (GBE) es usada como referencia de la unidad de resistencia eléctrica desde 1990 [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  $10^9$  [2]. De hecho existen esfuerzos por contar con sistemas comparables para la reproducción de la unidad de resistencia a nivel industrial [3].

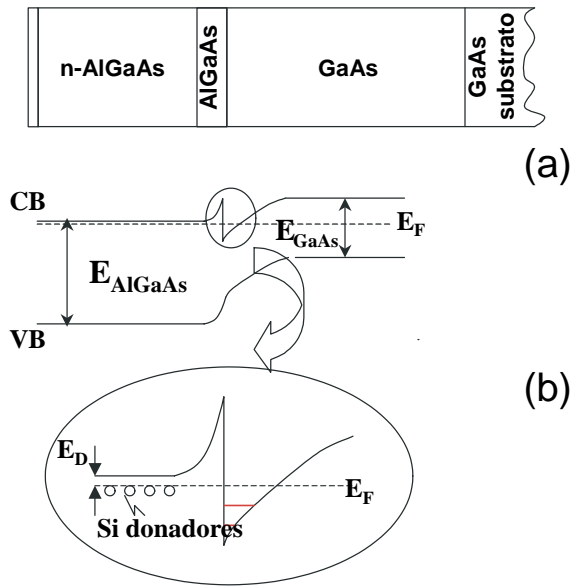
El comercio mundial, en el cual México participa activamente, establece la necesidad de emplear patrones reconocidos internacionalmente para efectuar transacciones económicas. En este contexto tres instituciones mexicanas (CINVESTAV, IICO y CICATA), en colaboración con el Centro Nacional de Metrología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

El EHC se presenta en un GBE a bajas temperaturas ( $\sim 1$  K) en presencia de campos magnéticos intensos ( $\sim 10$  T). En estas condiciones la resistencia Hall ( $R_H$ ) de un dispositivo de EHC considera valores cuantizados [4], según la ecuación (1).

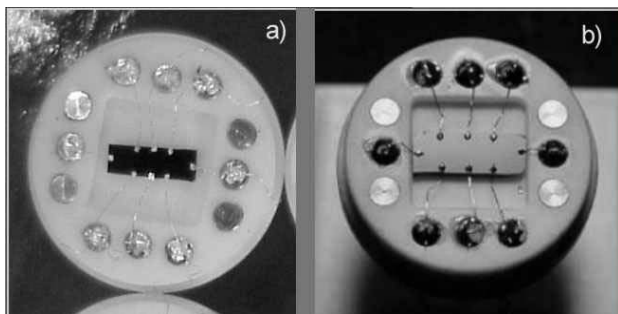
$$R_H = R_{xy} = h/ie^2, \quad (1)$$

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

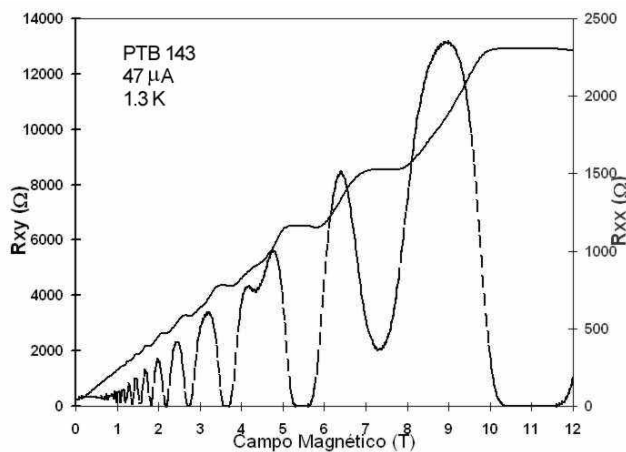
Dado que el valor de  $R_H$  depende de constantes físicas bien establecidas se puede obtener una referencia de resistencia eléctrica invariable de parámetros externos como: presión, humedad, estabilidad temporal, entre otros [5]. Los patrones basados en el EHC ofrecen enormes ventajas sobre los patrones de alambre: son más estables y



**Figura 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.



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



**Figura 3.** Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo PTB143.

precisos, además, la menor incertidumbre en la producción 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,

$$n_s = ieB/h \tag{2}$$

Es conveniente hacer notar que se recomiendan campos 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  $\mu A$  [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.

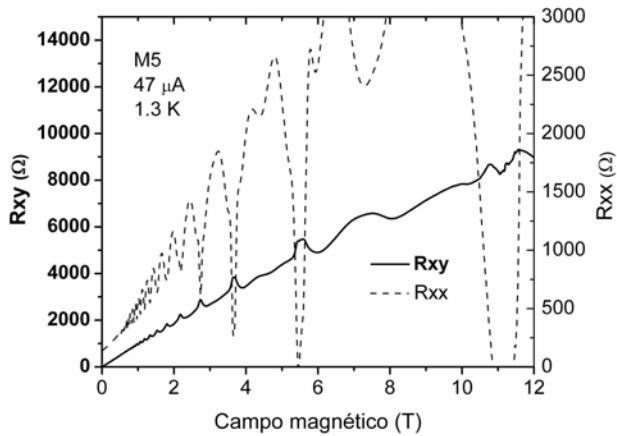


Figura 4. Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo M5.

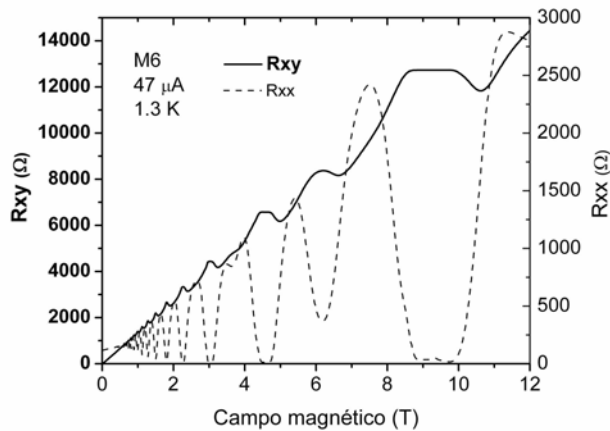


Figura 5. Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo M6.

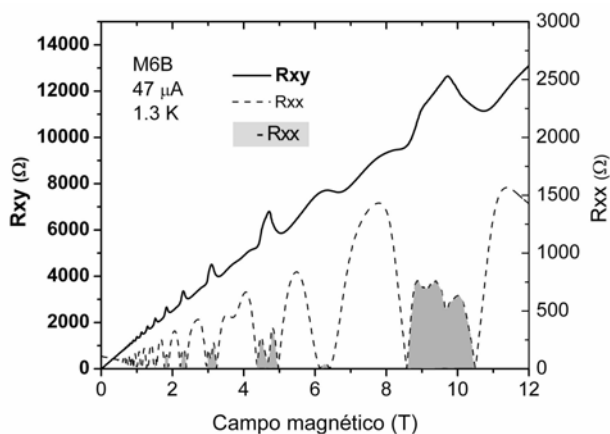


Figura 6. Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo M6B.

## 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. 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<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>, finalmente se depositaron 100 Å de GaAs como capa protectora.

Basados en la caracterización hecha por técnicas ópticas y mediciones eléctricas a temperatura ambiente y 77 K [9], se eligieron las muestras M5, M6 y LT900 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:
  - a) In aleado.
  - b) AuGeNi evaporado térmicamente
 Se tratan térmicamente 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 diámetro 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. Este dispositivo fue hecho en los laboratorios PTB de Alemania con contactos de Sn [2].

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

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 en un Tesladrón 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 patrones de referencia de tensión a 3V en serie con una resistencia de 600 Ω.

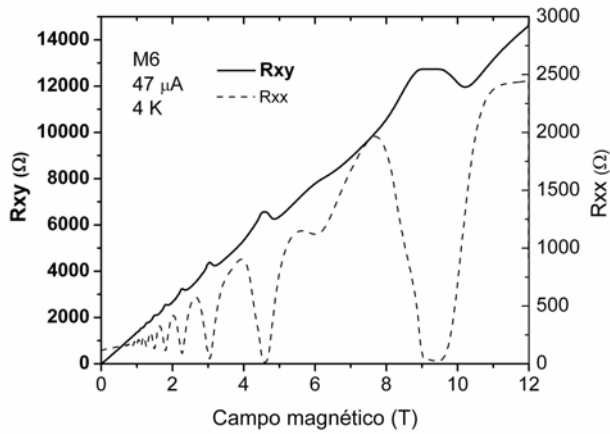


Figura 7. Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo M6 a 4K.

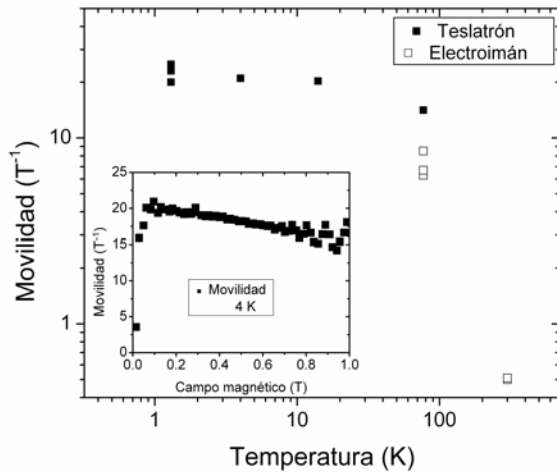


Figura 8. Dependencia de la movilidad con la temperatura para M6. En el inserto se presenta la aproximación de movilidad a campo cero.

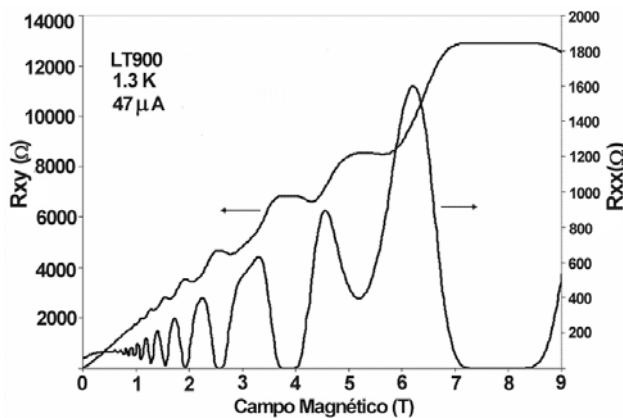


Figura 9. Cuantización de la resistencia eléctrica del dispositivo LT900.

Se realizaron mediciones de cuantización de la resistencia a 1.3 y 4K. Complementariamente, mediante el efecto Hall clásico a temperaturas superiores, se estudió la variación de la movilidad electrónica.

### 3. Resultados

La figura 3 presenta las curvas de resistencia longitudinal ( $R_{xx}$ ) y transversal ( $R_{xy} = R_H$ ) a 1.3 K en función de la intensidad del campo magnético para la muestra de referencia PTB143. En esta muestra se observan claramente “las plateas” en  $R_{xy}$  características del efecto Hall cuántico. En las figuras 4-6 se muestran las curvas correspondientes para los dispositivos M5, M6, y M6B, procesadas usando In como contacto óhmico. En la figura 7 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 el comportamiento de 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. En la figura 9, se presentan las curvas  $R_{xx}$  y  $R_{xy}$  para la muestra LT900, en la cual se empleó AuGeNi como contacto óhmico.

### 4. Discusión

Las curvas de cuantización de la resistencia eléctrica muestran que ésta solo se pudo generar plenamente en el dispositivo M6, tanto a 1.3 K (Fig. 5) como a 4 K (Fig. 7). Observamos 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), obtenemos que la concentración de portadores en el GBE es de  $4.5 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ . Para este dispositivo encontramos que la movilidad a 1.3K es de  $22.7 \text{ T}^{-1}$ .

Haciendo una revisión cuidadosa de las curvas en la figura 5, en  $R_{xy}$ , la platea  $i = 2$  es plana dentro de un intervalo de  $2 \text{ } \Omega$ , lo que limita su aplicación con fines de metrología. En el mismo nivel de cuantización,  $R_{xx}$ , esta contenida en una banda de  $15 \text{ } \Omega$  y presenta un mínimo en  $16 \text{ } \Omega$ , tomando este valor como dependiente de la resistencia de contacto, establecemos una resistencia de  $8 \text{ } \Omega$  por contacto.

Para el dispositivo PTB, (Fig. 3) para  $R_{xx}$  en  $i = 2$ , es plana dentro de  $0.4 \text{ } \Omega$ , 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 7 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 4 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 6) 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  $0.5\text{T}^{-1}$  para 300 K hasta  $25 \text{ T}^{-1}$  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 ésta propiedad a baja temperatura en el arreglo instrumental usado en el CENAM.

Para el caso del dispositivo LT900 en  $R_{xy}$ , la platea  $i = 2$  es plana dentro de un intervalo de 30 m $\Omega$ . En el mismo nivel de cuantización,  $R_{xx}$ , esta contenida en una banda de 10 m $\Omega$  de donde se deduce una resistencia menor a 5 m $\Omega$  por contacto. De la ecuación (2) se tiene un valor de  $n_s=3.98 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ .

El origen de la diferencia con la última muestra radica en un refinamiento en el proceso de los contactos que incluye un tratamiento de la superficie del semiconductor, el cambio del metal de contacto por el material AuGeNi en lugar de In, el incremento de la superficie de contacto, y un contacto más homogéneo facilitado por la evaporación térmica.

## 5. Conclusiones

Se fabricaron dispositivos basados en heteroestructuras AlGaAs/GaAs que presentan el fenómeno de cuantización de la resistencia eléctrica. En el caso de los dispositivos

con contactos de In, 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. A pesar de esta circunstancia se pudo realizar la caracterización de los dispositivos en varios de sus parámetros principales. Empleando un proceso más refinado, logramos que los dispositivos fabricados con contactos de la aleación de AuGeNi alcancen la resistencia de contacto lo suficientemente baja como para su utilización en metrología.

## Referencias

- [1] B.N. Taylor y T.J. Witt, New international electrical references based on the Josephson and quantum Hall effect, *Metrologia*, **26**, 462 (1989).
- [2] K. Pierz y B. Schumacher, Fabrication of quantum Hall devices for low magnetic fields, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **48**, 293 (1999).
- [3] K. Jaeger, The need and use of intrinsic standards in U.S. industry, *Precision Electromagnetic Measurement Digest*, 1996 Conference on, 43 (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.* **40**, 256 (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**, 495 (1980).
- [5] T. J. Witt, *Rev. Sci. Inst.*, **69**, 2823 (1998).
- [6] A.D. Inglis e I. Minowa, Fabrication of precision quantised Hall devices, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **46**, 281 (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.* **48**, 289 (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, 414 (1998).
- [11] K.C. Lee, Dependence of contact resistance on current for ohmic contacts to quantized Hall resistors, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **48**, 319 (1999).
- [12] H. Sakarya y G. Rietveld, Quantum Hall sample characterization, *Precision Electromagnetic Measurement Digest*, 2000 Conference on, 562 (2000).