

**SISTEMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE
MEDICIÓN DE VOLTAJE HALL EN DEPENDENCIA
DE LA TEMPERATURA, USANDO
INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL**

**SYSTEMATIZATION OF A MEASURING SYSTEM
FOR HALL VOLTAGE AS A FUNCTION OF
TEMPERATURE, USING VIRTUAL
INSTRUMENTATION**

**Asdrúbal A. Ramírez¹, Johana S. Oyola², Francisco Guzmán²,
Edwin A. Ramírez³, Gerardo Gordillo²**

¹ Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional, Bogotá.

² Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

³ Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional, Bogotá.

(Recibido: Noviembre/2015. Aceptado: Junio/2016)

Resumen

Este trabajo presenta detalles del diseño e implementación de un sistema de medición de voltaje Hall en dependencia de la temperatura, desarrollado usando el concepto de Instrumentación Virtual. Para tal efecto se usó hardware de la National Instruments y el paquete LabVIEW como software. El sistema es controlado a través de un instrumento virtual (IV) que incluye facilidades para realizar control PID de temperatura de la muestra en el rango 80 K - 700 K, medición de voltaje Hall (V_H) usando el método de cuatro contactos y visualización en tiempo real de la curva de V_H vs T . El sistema fue probado realizando medidas de voltaje Hall vs T a películas delgadas de CuInS_2 usadas como capa absorbente en celdas solares, con el propósito de obtener información de sus propiedades de transporte eléctrico.

Palabras clave: Instrumentación virtual, LabVIEW, Voltaje Hall vs T , transporte eléctrico.

Abstract

This paper presents details of the design and implementation of a system for measuring Hall voltage in dependence of the temperature, developed using the Virtual Instrumentation concept. For that we have used National Instrument hardware and the LabVIEW package as software. The system is controlled by a virtual instrument (VI) which includes facilities to perform PID control of sample temperature in the range of 80 K - 700 K, Hall voltage measurement (V_H) using the method of four contacts and real time display of the V_H vs T curve. The system was tested by performing Hall voltage measurements vs T on CuInS_2 (CIS) thin films used as the absorber layer in solar cells, for the purpose of obtaining information from its transport properties.

Keywords: Virtual instrumentation, LabVIEW, Hall voltage vs T , electric transport.

Introducción

El control de procesos y la adquisición y monitoreo de datos en sistemas automáticos que incluyen variables analógicas y digitales, en general siguen una arquitectura tradicional que emplea Dataloggers o microcontroladores [1, 2], con funciones como establecer el tiempo en que se debe tomar una muestra de los sensores, transformar señales análogas de los sensores en señales digitales y almacenarlas en la memoria y finalmente, controlar un módulo de comunicaciones para transmitir la información a través del puerto serial RS-232 del PC y USB; para esto, una amplia variedad de tarjetas de adquisición de datos (DAQ) han sido usadas. En este trabajo se desarrolló e implementó un sistema de control, medición y monitoreo de voltaje Hall en dependencia de la temperatura usando Instrumentación Virtual [2–4], que se basa en un concepto novedoso, donde el software es el elemento principal del sistema, a diferencia de la instrumentación tradicional, donde lo principal es el hardware. El sistema desarrollado permite medir voltaje Hall en forma automática y visualizar en tiempo real curvas

de V_H vs T ; adicionalmente tiene facilidades para monitorear en tiempo real y controlar las variables que afectan el funcionamiento del sistema de medición de V_H y de la variación de la temperatura en el rango de 80 K - 700 K.

Unos sistemas de medida de efecto Hall con similares características al presentado en este trabajo fueron desarrollados por [5, 6] sin embargo estos sistemas no permiten desarrollar curvas de voltaje hall vs temperatura, que es uno de los aportes más interesantes en este trabajo, esta facilidad también se puede encontrar en el equipo comercial HL 5500 nanometrics [7] que tiene un rango de temperatura de 77 K a 550 K. Por otro lado, al igual que en este trabajo el sistema desarrollado por [5] implementó un software en LabVIEW para la operación del sistema y la adquisición de datos [8, 9].

El sistema desarrollado es de gran utilidad para caracterizar eléctricamente películas delgadas de materiales semiconductores que es una técnica ampliamente utilizada para determinar las propiedades de transporte eléctrico. En este trabajo el sistema fue probado realizando medidas de voltaje Hall en dependencia de la temperatura a películas delgadas de CuInS_2 usadas como capa absorbente en celdas solares por parte grupo de investigación de Materiales Semiconductores y Energía Solar de la Universidad Nacional de Colombia; estas medidas permitieron obtener información de la movilidad Hall, concentración de portadores libres y propiedades de transporte eléctrico.

1. Descripción del sistema de medición de voltaje Hall

La fig. 1 muestra un diagrama de bloques del sistema desarrollado para realizar medidas de voltaje Hall en dependencia de la temperatura el cual está constituido por: cámara de medición con sistema de prevacío en cuyo interior se encuentra el sistema de calentamiento y enfriamiento de la muestra y sistema de contactos para medición del voltaje Hall y suministro de corriente a la muestra, sistema de control electrónico de la temperatura de calentamiento y enfriamiento, sistema de medición de voltaje Hall y sistema de adquisición, procesamiento y monitoreo de datos.

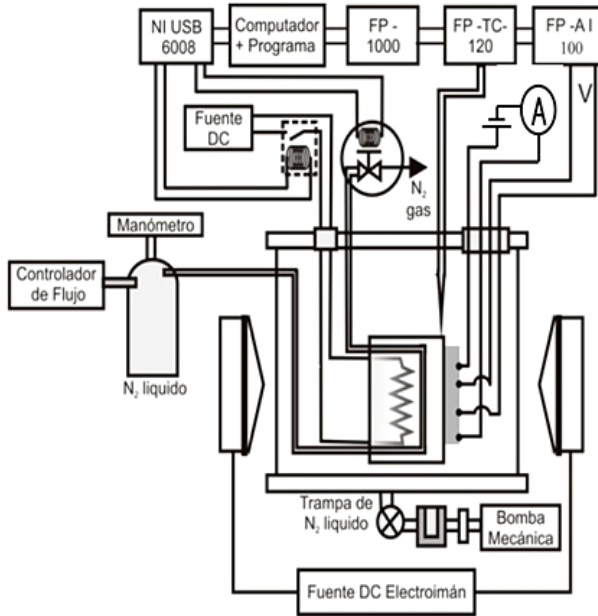


FIGURA 1. Diagrama de bloques del sistema de medición de voltaje Hall en dependencia de temperatura, mostrando las unidades de medición, control y monitoreo.

Las funciones de control, medición, adquisición, procesamiento y visualización de datos son realizados a través de un Instrumento Virtual desarrollado con LabVIEW 7.1, cuyo panel frontal se muestra en la fig. 2. En este se visualiza: la temperatura actual, el Set Point de temperatura, los led's indicando el estado de la señal de control (si están activados o desactivados los relés), el estado del PWM (Pulse Width Modulation), los parámetros del control PID (Proporcional, Integral, Diferencial), la magnitud de las señales de control, y la gráfica de variación de V_H en función de la temperatura.

El hardware usado para el desarrollo del sistema incluye un módulo de comunicación FieldPoint-1000 (FP-1000), un módulo de entrada análoga FP-TC-120 para adquirir la señal de voltaje (proporcional a la temperatura) proveniente de la termocupla tipo K usada como sensor de temperatura, un módulo de entrada análoga FP-AI-100 para adquirir la señal de voltaje hall y una tarjeta NI USB 6008.

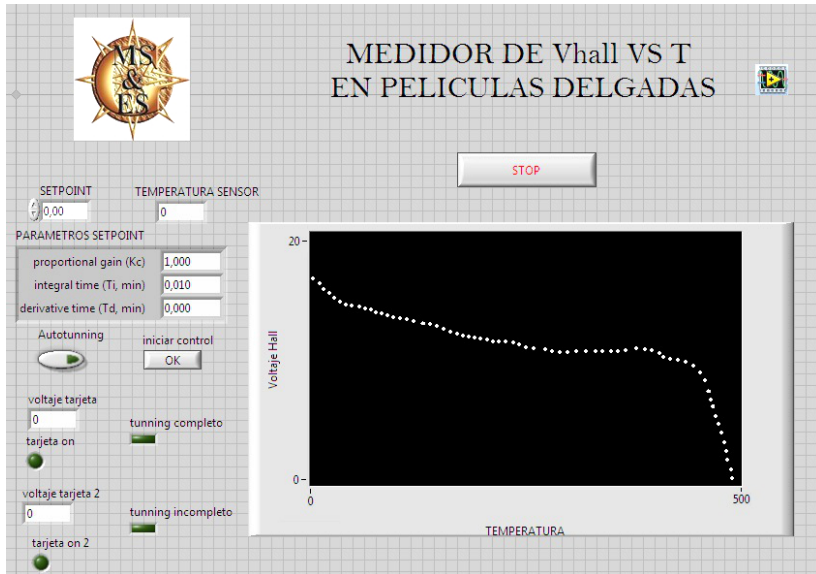


FIGURA 2. Panel frontal del Instrumento Virtual.

La arquitectura del sistema de medición de voltaje Hall está conformada por las siguientes unidades, cuyas características técnicas se describen a continuación.

1.1. Cámara de medición con sistema de prevacío

La cámara de medición cuenta con una bomba mecánica de vacío y una trampa de nitrógeno líquido, con la cual se obtienen presiones del orden de 6×10^{-3} mBar. En el interior de la cámara se encuentra el sistema de calentamiento y enfriamiento, el portamuestra y el sistema de contactos usados para suministrar corriente a la muestra y para medir el voltaje Hall.

1.2. Sistema de calentamiento y enfriamiento de la muestra

La conductividad en materiales semiconductores exhibe una dependencia característica con la temperatura (ver fig. 3). En general se distinguen tres rangos de temperatura: (i) A temperaturas bajas se tiene *conducción extrínseca*. En esta etapa,

con el aumento proporcionalmente con la temperatura el número de portadores por activación térmica de las impurezas. (ii) A temperaturas moderadas se tiene una zona de *deplexión de las impurezas*, en la que dado a que todas las impurezas están activadas, no se produce un cambio apreciable en el número de portadores por el aumento de temperatura e. (iii) A altas temperaturas se presenta la *conducción intrínseca*, debido a una transferencia de portadores desde la banda de valencia a la de conducción mediante excitación térmica [5]. Características que pueden ser evaluadas gracias a la implementación de las medidas de voltaje Hall en función de la temperatura que se presenta en este trabajo.

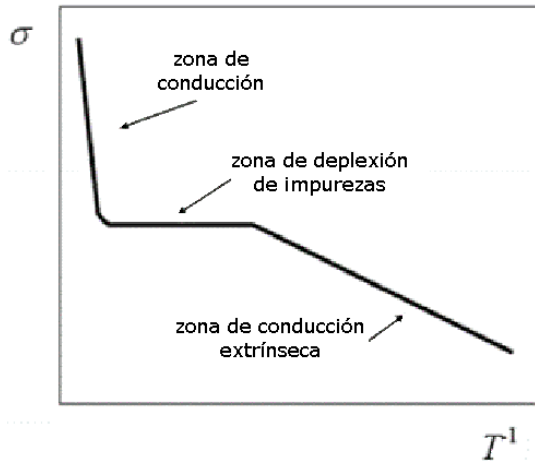


FIGURA 3. Conductividad en función del inverso de la temperatura para semiconductores [5].

Este sistema está compuesto por un bloque de cobre al cual se calienta a través de una resistencia calefactora conectada a una fuente de poder y el enfriamiento se realiza haciendo fluir nitrógeno líquido (N₂-L) a través del bloque de cobre. La temperatura de calentamiento y enfriamiento se controla mediante un algoritmo implementado en un Instrumento Virtual desarrollado con LabVIEW 7.1, en el cual se desarrolló un algoritmo de control PID-PWM para controlar la variación de la temperatura en los rangos deseados, donde la señal de realimentación se obtiene a partir de una termocupla tipo K y es adquirida por medio

de un módulo de comunicación Field Point-1000 (FP-1000) que tiene instalado un sub-módulo especial para termocuplas llamado FP-TC-120, como lo muestra la fig. 1. Las señales generadas por el algoritmo de control actúan sobre 2 relés de estado sólido que actúan a su vez en una electroválvula solenoide (EVS) y una válvula hidráulica (HV) respectivamente.

El instrumento virtual cuenta con una función llamada “autotuning” que permite obtener de manera automática los parámetros de control del algoritmo PID (K_p , K_i y K_d); la señal de control generada por el algoritmo PID antes de salir del Instrumento virtual es transformada por medio de un PWM que permite activar y desactivar por medio de amplitud de pulsos los relés y de esta forma poder modificar la potencia que suministra la fuente al actuador (resistencia calefactora). El relé RL1 controla la corriente que la fuente suministra a la resistencia calefactora y RL2 controla el flujo de nitrógeno que fluye a través del bloque de cobre mediante la electroválvula solenoide (EVS) quien es la que recibe directamente la señal eléctrica de control proveniente de RL2. La señal de control 1 generada en el instrumento virtual sale a través del canal digital (DO) 0.1 de la tarjeta NI USB-6008 hacia RL1 y la señal de control 2 sale a través del canal digital (DO) 0.2 de la tarjeta NI USB-6008 hacia RL2.

Este sistema de control de temperatura implementado a través de un instrumento virtual, presenta una gran ventaja frente a métodos convencionales de control tales como controladores PID comerciales puesto que permite controlar la temperatura con una variación de ± 2 K, mientras en otros sistemas es de ± 10 K (se hizo una comparación con un controlador PID Herothermref 3208) y se puede hacer un barrido muy preciso de temperatura en el rango 80 K - 700 K. El lazo de control de temperatura se muestra en la fig. 4.

1.3. Sistema de medición de voltaje Hall

La medición del voltaje Hall se realiza por el método de cuatro contactos distribuidos en cruz (dos para hacer fluir la corriente a través de la muestra y dos para medir el voltaje Hall generado por acción de un campo magnético de 1 Tesla que se obtiene haciendo

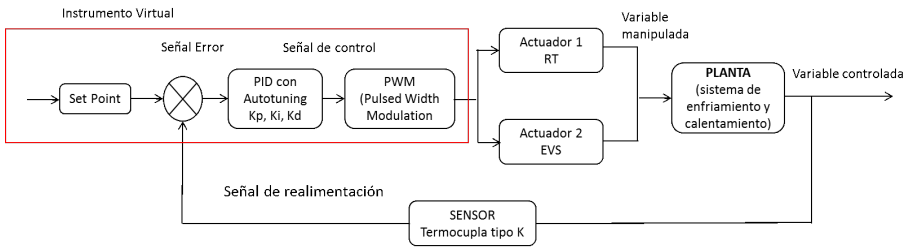


FIGURA 4. Lazo de control de temperatura.

fluir una corriente de 10 A por la bobina del electroimán (ver fig. 5). Se usan electrodos de oro que hacen contacto eléctrico sobre la muestra, la cual se pone mecánicamente en contacto con el bloque de cobre que se calienta y enfría como se describió previamente.

La corriente que se usa varía dependiendo de la resistividad de la muestra en un rango comprendido entre 10^{-8} A y 10^{-2} A; sin embargo para el caso particular de este trabajo donde se estudiaron películas delgadas de CIS con resistividades del orden de $100 \Omega\text{cm}$, se usaron corrientes entre 0,1 mA y 1 mA. El rango de voltajes que permite medir el sistema desarrollado es amplio (10^{-4} V - 1 V) y en el presente trabajo se midieron voltajes entre 1 mV y 30 mV con una resolución de 0,1 mV.

1.4. Sistema de visualización de la variación del voltaje Hall en dependencia de la temperatura

La señal de voltaje generada por la termocupla que es proporcional a la temperatura de la muestra y la de voltaje Hall generada cuando se aplica el campo magnético son adquirida por medio de los módulos de entrada analógica FP-TC-120 y FP-AI-110 respectivamente; estas señales son procesadas a través de el instrumento virtual desarrollado en LabVIEW, que permite su visualización en tiempo real por medio de una curva de V_H vs Temperatura y su almacenamiento. Estos resultados son usados posteriormente para determinar la variación de la concentración de portadores y de la movilidad en dependencia de la temperatura.

2. Resultados y discusión

Para calibrar el sistema desarrollado se aplicó al electroimán una corriente variable (I_o) y se midió el campo magnético en el centro un teslámetro Hall para distintos valores de I_o , la curva de calibración se puede ver en la fig. 5. Por otro lado se hicieron medidas de una muestra patrón de Cu(InGa)S_2 que fue solicitada al Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) en Alemania, de la cual la concentración de portadores, voltaje Hall y movilidad reportada por ZSW y los medida por nuestro equipo presentan errores inferiores al 10%.

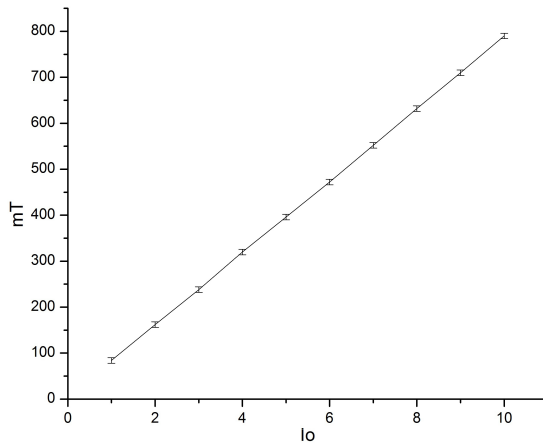


FIGURA 5. Curva de calibración del electroimán.

Después de evaluar las respectivas rutinas de reproducibilidad y calibración, el sistema fue probado realizando medidas de voltaje Hall vs T a películas delgadas de CuInS_2 depositadas sobre sustratos de vidrio soda lime y espesores de $1.5 \mu\text{m}$ aproximadamente, estas películas son normalmente usadas como capa absorbente en celdas solares. El voltaje Hall en dependencia de la temperatura se midió con el sistema desarrollado, usando muestras y contactos con una geometría como la mostrada en la fig. 6; posteriormente se determinó la concentración de portadores p de la muestra semiconductor a través de la relación $p = IB/e\delta V_H$ [10]. Donde V_H es el voltaje Hall, δ el espesor de la muestra, I la corriente aplicada a la muestra y B el campo magnético.

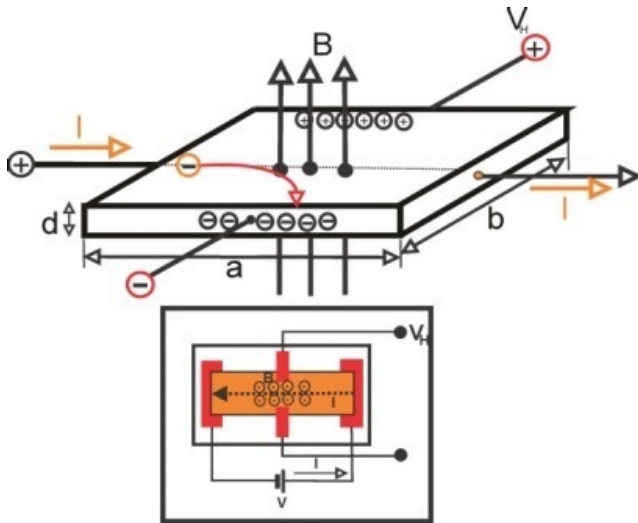


FIGURA 6. Geometría para medición del voltaje Hall.

Midiendo adicionalmente la conductividad eléctrica σ en dependencia de la temperatura usando el método de Van Der Pauwy la norma ASTM F 76 [11], se calculó la movilidad Hall μ empleando la relación: $\mu = \sigma/ep$, los valores de conductividad de las películas utilizadas son de $4 \times 10^{-3} (\Omega\text{cm})^{-1}$ aproximadamente. Teniendo en cuenta que por este método se hace necesario tomar varias medidas de corriente y de voltaje para diferentes conmutaciones de los contactos, el sistema de adquisición de datos cuenta con un sistema de filtros y con un análisis estadístico que permite minimizar la propagación de error en las medidas, además las conmutaciones de corriente y medidas de voltaje permiten la eliminación de efectos termoeléctricos, voltajes debidos a la dispersión de la corriente, entre otras posibles fuentes de error. Las curvas presentadas en la figura 7 muestran resultados de V_H vs T , σ vs T , p vs T y μ vs T obtenidos con películas delgadas de CuInS_2 durante este trabajo.

El cálculo de la movilidad Hall μ y de la concentración de portadores p , realizados a partir de medidas experimentales de σ vs T y voltaje Hall vs T muestran que la movilidad de las películas delgadas de CIS disminuye al aumentar la temperatura

de la muestra (ver fig. 7-a), como consecuencia de un aumento en la dispersión de portadores con fonones asociado al aumento en la temperatura. La disminución rápida de la movilidad a temperaturas mayores de 400 K podría ser atribuida a dispersión de portadores con impurezas ionizadas cuya densidad aumenta abruptamente a temperaturas mayores que 400 K. Se observa adicionalmente en la figura 8 que la concentración de portadores crece al aumentar la temperatura de la muestra, teniendo un incremento abrupto a temperaturas alrededor de 450 K. Estos resultados revelan de un lado que el aumento de la conductividad al incrementar la temperatura de la muestra es causado principalmente por un aumento de la concentración de portadores, y que el aumento de estos a su vez se debe a la activación de las impurezas donadoras que se da para valores de temperatura superiores a 400 K.

Se observa que la curva de σ vs T presenta dos regiones con pendientes muy diferentes. Para verificar si las diferentes pendientes se deben a diferentes mecanismos de transporte, cada uno predominando en una región de temperatura diferente o a otro efecto, se hizo una gráfica de $\ln(\sigma)$ vs $1000/T$ con los datos de la fig. 7. Estos resultados se muestran en la figura 9. El comportamiento lineal de la curva de $\ln(\sigma)$ vs $1000/T$ indica que la conductividad puede ser expresada por la relación: $\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E/kT)$, indicando que la conductividad eléctrica en películas delgadas de CuInS_2 es predominantemente dominada por transporte de huecos en estados extendidos de la banda de valencia.

La energía de activación ΔE calculada de la pendiente de la curva $\ln(\sigma)$ vs $1000/T$ para la región de temperaturas mayores de 400 K es 0,85 eV mientras que en la región de temperaturas menores que 350 K el valor de $\Delta E = 0,006$ eV. Este resultado indica que la conductividad de las películas de CIS es afectada por transporte de portadores libres generados por dos tipos diferentes de impurezas aceptoras. Una de estas impurezas genera estados profundos y la segunda estados cerca de la banda de valencia, siendo la contribución de los estados profundos mucho mayor que la de los estados cerca de la banda de valencia.

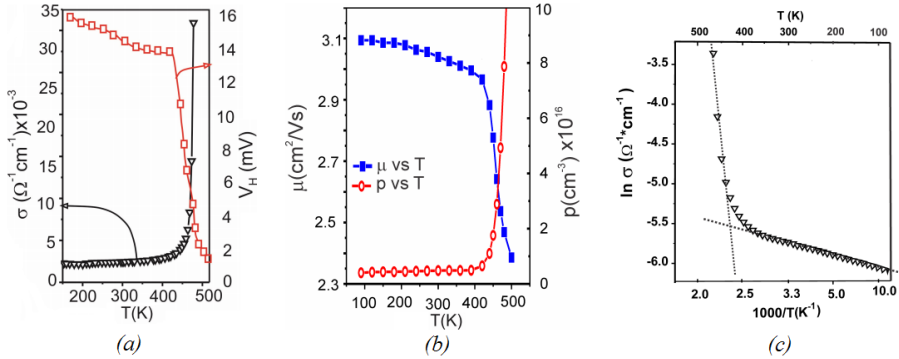


FIGURA 7. (a) Variación de V_H y σ en dependencia de la temperatura, obtenidos con una película delgada de CuInS_2 . (b) Variación de μ y p en dependencia de la temperatura, obtenidos con una película delgada de CuInS_2 . (c) Curva de $\ln(\sigma)$ vs $1000/T$, realizada con datos de la figura 5.

Conclusiones

Se diseñó e implementó un sistema de medición automática de voltaje Hall en dependencia de la temperatura usando hardware de la National Instrument y el paquete de programación gráfica LabVIEW. El sistema es controlado a través de un instrumento virtual (IV) que incluye facilidades para realizar control PID y PWM de temperatura de la muestra en el rango 80 K - 700 K, medición de voltaje Hall (V_H) usando el método de cuatro contactos y visualización en tiempo real de la curva de V_H vs T . El sistema fue probado con éxito realizando medidas de voltaje Hall vs T a películas delgadas de CuInS_2 . Los resultados obtenidos permitieron obtener información de la movilidad y concentración de portadores y de mecanismos de transporte eléctrico.

Reconocimientos

Este trabajo fue financiado por Colciencias contrato # 038/2013 y Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Ciencias, Grupo GMS&ES, Bogotá DC, Colombia (Proyecto 20287 financiado por la DIB).

Referencias

- [1] R. Mukaro, X. F. Carelse, and L. Olumekor, *Solar Energy* **63**, pp. 313 (1998).
- [2] R. Mukaro and X. F. Carelse, *IEEE Trans. Instrument. Meas.* **48**, pp. 1232 (1999).
- [3] G. W. Johnson and R. Jennings, *LabVIEW Graphical Programming*, Vol. 4 (McGraw Hill Professional, 2006).
- [4] R. H. Bishop, *Learning with LabVIEW 8* (Pearson Prentice Hall, 2007).
- [5] J. Jaither and M. Quintero, Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia (2011).
- [6] E. M. F. de la Torre, D. G. Dondo, G. N. Monardez, R. A. Ricón, and L. N. Alem, *Anales AFA* **18** (2007).
- [7] *HL5500 Hall Effect Measurement System*, Nanometrics.
- [8] *Data Acquisition and Signal Conditioning Course Manual*, National Instruments Corporation (2011).
- [9] *LabVIEW Core 3 Course Manual*, National Instrument Corporation (2014).
- [10] D. Neamen, *Semiconductor Physics And Devices* (McGraw-Hill Education, 1997).
- [11] A. S. for Testing and Materials, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 0 (American Society for Testing and Materials, 1991).