

永久磁石を用いた半導体2次元電子系のホール測定

鈴木 恭一 (工学部電気工学科)

Hall Measurements with a Permanent Magnet for Semiconductor Two-Dimensional Electron Systems

Kyoichi SUZUKI (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering)

Abstract: Hall measurement is useful to investigate basic electronic properties of semiconductor wafers. Since the invention of the strong permanent magnets, Hall measurement systems using permanent magnets have been commercially available. However, these systems include too many functions and therefore are too expensive for single laboratory use. We propose here a very simple Hall measurement system with a neodymium permanent magnet at low cost. Using this system, electron density and mobility in a Si-doped AlGaAs/GaAs single heterostructure were measured. Obtained results are comparable to those found by using the commercially available system.

Keywords: Hall Measurement, Semiconductor Heterostructure, Two-Dimensional Electron System, Neodymium

1. はじめに

半導体デバイスは、高度な集積化・微細化がなされ現代の情報化社会を支えている。報道等では、集積したトランジスタ数や、ゲートおよび配線の微細化などプロセス技術に注目が集まっているが、その性能を決定づける根源は、半導体ウエハ自体の特性である。このウエハの特性を評価する手法の一つがホール測定である。ホール測定では、磁場中に試料を置き、電流と磁場の両方に垂直方向の電圧(ホール電圧)を測定することで、キャリア(電子または正孔)濃度を同定する。さらに、これにより求めたキャリア濃度と、磁場がない状態の測定により求めた抵抗率より、半導体デバイスの性能を大きく左右するキャリア移動度が求まる。

ホール電圧は磁場に比例するため、高精度の測定を行うためには0.1 T程度以上の強い磁場が必要となる。従来、このような強磁場を発生させるには、水冷式の電磁石や極低温に冷却した超伝導磁石を使う必要があり、非常に大掛かりな実験装置が必要であった。近年、ネオジム磁石の発明により0.1 T程度の磁場が容易に実現できるようになり、装置の小型化が進み、現在では、永久磁石を用いたホール測定装置がいくつか市販されている。

しかしながら、市販のホール測定装置は安価なもので

も50万円以上と、大学の一研究室で導入することを考えるとまだまだ高価である。この高価になる理由は、(1) 試料に垂直方向のみの磁場成分を持つ、広く均一な磁場領域を実現するために、直径5 cm以上の大口径磁石を試料を挟むように2個配置していることと、(2) 測定を自動化させることで付加価値を付けているためである。これらはいずれも産業的に、大口径ウエハを高速で評価するために必要な機能であり、実験室レベルで、ましてや大学において教育目的で使用する上では過剰な機能である。特に上記理由(1)については、半導体デバイス1個の切り出しサイズは1 mm²程度であり、均一な磁場領域はこれより広ければ十分である。また、Si-Metal-Oxide-Semiconductor (Si-MOSFET) や半導体ヘテロ接合構造(後述)を研究対象にする場合、2次元電子(または正孔)系となるので、試料に対して水平方向の磁場成分が存在しても測定値には影響しない。

今回我々は、半導体ヘテロ構造をテーマの一つとする研究室の立ち上げに際して、今後の半導体ウエハおよびデバイス評価のため、永久磁石1個を用いた単純でかつ永続的に使用可能なホール効果測定装置の作製を行った。本装置を用いてSi変調ドープAlGaAs/GaAs単一ヘテロ構造試料のホール測定を行った結果、電子濃度、移動度ともに市販のホール測定装置を用いた測定結果とほぼ一致し、本装置が市販の高価な装置による測定と何ら遜

色のないことが示された。ちなみに、材料費は一万円未満である。

2. 装置の概要

2.1 構造

図1に作製した装置の外観を示す。電気測定には16ピンICソケットの中央部分の8ピンを使用し、これらは側面のバナナ端子に接続されている。磁石はソケットの下部に配置される。磁石の径に合わせた穴が開いており、磁石の位置が固定される。磁石上面とチップキャリアに装着された試料との距離は10.0 mmである。磁石の向きを手動で変えることでN極とS極を切り替える。抵抗率の測定時には磁石を取り外す。



図1: 装置の外観/Photograph of the Hall measurement system

2.2 磁石の選別

磁石は市販の、直径20 mm、高さ20 mmの円柱状ネオジウム磁石を使用した。これらは円柱の高さ方向に磁化されており、仕様書では表面磁束密度が最大で0.54 Tとなっている。実際には、磁束密度やその空間分布には個体差があるため、いくつかの磁石について、表面磁束密度の高さ方向成分の空間分布を測定し(図2)、磁束密度が円の中心部にピークを持ち、かつ空間分布の偏りがなくなるべく少ない磁石を選んでホール測定に使用した(図3)。

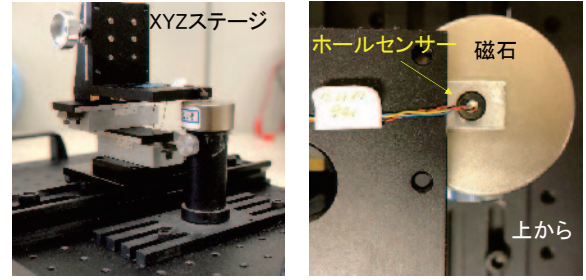


図2: 磁束密度の空間分布測定/ Measurement apparatus for the spatial variation of the magnetic field

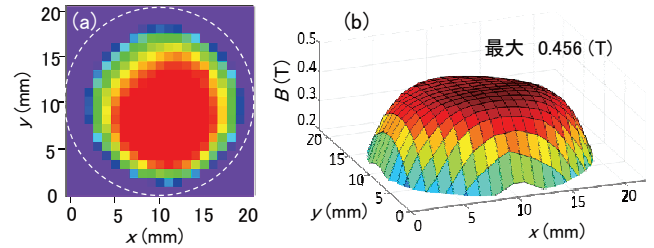


図3: 磁束密度の空間分布測定結果の例/Spatial variation of the magnetic field on a magnet

3. 実験方法

3.1 ホール測定

一般に、精密なホール測定には、図4に示すホールバーという形状に成型した試料が使われる。6個の電極を持ち、電極1-4(x方向)に電流 I_{14} を流し電極2-3(x方向)の電圧 V_{23} を測定したとき、 $R_{1423} = R_{xx} = V_{23}/I_{14}$ を縦抵抗と呼ぶ。磁場(磁束密度 B)をz方向(ホールバーの面直方向)に印加し、電流 I_{14} を流し電極2-6(y方向)の電圧 V_{26} を測定したときの $R_{1426} = R_{xy} = V_{26}/I_{14}$ をホール抵抗と呼ぶ。単位は両方ともオーム $[\Omega]$ である。3次元系の場合、ホールバーの幅を w 、電極2-3の間隔を l 、厚さを t とすると、電子濃度とホール抵抗の関係は

$$R_{xy} = \frac{B}{net} \quad (1)$$

となる[1]。2次元系の場合、厚さの次元が消えて、

$$R_{xy} = \frac{B}{ne} \quad (2)$$

となる。ここで e は電気素量である。電子濃度の単位は、3次元系の場合は $[m^{-3}]$ 、2次元系の場合は $[m^{-2}]$ である。2次元系ではホール抵抗と電子濃度の関係に、大きさや材質に関するパラメータを含まないという大きな特徴がある。

縦抵抗と移動度(μ)の関係は3次元系、2次元系共に

$$R_{xx} = \rho \cdot \frac{l}{w} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = ne\mu \quad (4)$$

と導出される。ここで ρ は抵抗率、 σ は導電率である。移動度の単位は $[\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}]$ である。

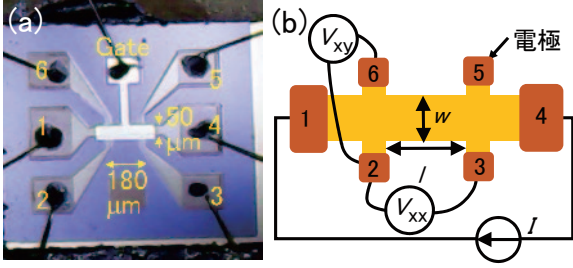


図 4: ホールバー構造/Hall bar structure

3.2 van der Pauw 法

ホールバーの測定では、試料形状の精密な加工と最低でも 5 個の電極が必要であるが、任意形状の試料について周囲に 4 個の電極があれば、解析的に電子濃度、移動度を求められることが van der Pauw により証明され、van der Pauw 法として広く普及している [2]。以下、van der Pauw 法による測定手順を簡単に述べる。

図 5 のような A~D の 4 個の電極を持つ試料を考える。まず、対角線方向 AC に電流 (I_{AC}) を流し、BD の電圧 (V_{BD}) を測定し、抵抗 $R_{ACBD}(= V_{BD}/I_{AC})$ を求める。磁場を印加したときと磁場がないときの差を ΔR_{ACBD} とすると

$$\Delta R_{ACBD} = \frac{B}{net} \quad (5)$$

となり、式 x と同様に電子濃度が求まる。

次に AB に電流 (I_{AB}) を流し DC の電圧 (V_{DC}) を測定し、 $R_{ABDC}(= V_{DC}/I_{AB})$ を求める。同様に BC に電流 (I_{BC}) を流し AD の電圧 (V_{AD}) を測定し、 $R_{BCAD}(= V_{AD}/I_{BC})$ を求める。ここで $R_{BCAD}/R_{ABDC} < 1$ となるように電極を選定する。この測定結果を次式

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \cdot \frac{R_{ABDC} + R_{BCAD}}{2} \cdot f \quad (6)$$

に代入すると抵抗率が求まり、その逆数である移動度が求まる。ここで f は、 R_{BCAD} と R_{ABDC} の関数で、以下の式

$$\frac{R_{ABDC} - R_{BCAD}}{R_{ABDC} + R_{BCAD}} = \frac{f}{\ln 2} \cosh^{-1} \left(\frac{\exp(\ln 2/f)}{2} \right) \quad (7)$$

を満たす。

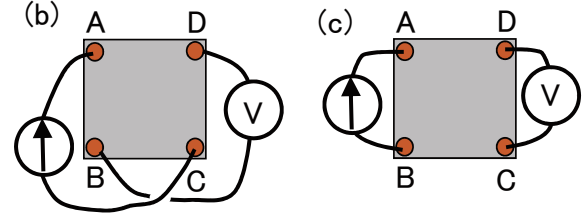
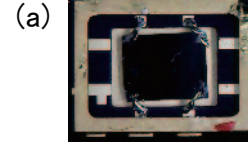


図 5: van der Pauw 測定/van der Pauw measurement (a) 試料/Sample. (b) 電子濃度測定時/For electron density measurement. (c) 抵抗率測定時/For resistivity measurement.

3.3 試料

今回用いた試料は Si 変調ドーピング $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ 単一ヘテロ構造と呼ばれるもので、NTT 物性科学基礎研究所にて、GaAs 基板上に分子線エピタキシー法で作製された [3]。図 6 は構造断面とポテンシャルプロファイルである。AlGaAs 層にドーピングされた Si が、ドナーつまり電子の供給源となり、AlGaAs/GaAs 界面においてポテンシャルの低い GaAs 層側に電子が蓄積し、キャリアとなり電気伝導を担う。電気伝導層 (チャンネル) と異なる場所にドーピングを施すことを変調ドーピングと呼び、キャリア (この場合電子) の不純物散乱が低減される。また、分子線エピタキシー法は、原子層レベルの膜厚制御の下で結晶成長が可能で、組成揺らぎのない、面方向に均一で成長軸方向に急峻なヘテロ (異種半導体) 界面の形成が可能である。このため、ポテンシャル揺らぎが少なく、伝導電子の合金散乱や界面荒さによる散乱が低減される。NTT 物性科学基礎研究所にて市販のホール効果測定装置を用いて測定した結果、室温での電子濃度は $2.5 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ 、移動度は $0.70 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であった。

この構造上に、ゲートとなる金属を蒸着すると、AlGaAs 層が絶縁層となり、Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) 構造が構成できる。チャンネルに繋がる電極を作製することで電界効果トランジスタの一種である MISFET となる。半導体ヘテロ構造を用いた MISFET は、Si-MOSFET よりも 2 桁程度高い移動度が実現されることから、一般に高電子移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor, HEMT) と呼ばれ、高移動度が必要となる高周波デバイスとして利用されている。

ちなみに、本試料は温度 0.3 K では移動度が 1.00×10^2

$\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ となり、磁束密度が 5 T 程度の磁場で分数量子ホール効果が観測される。

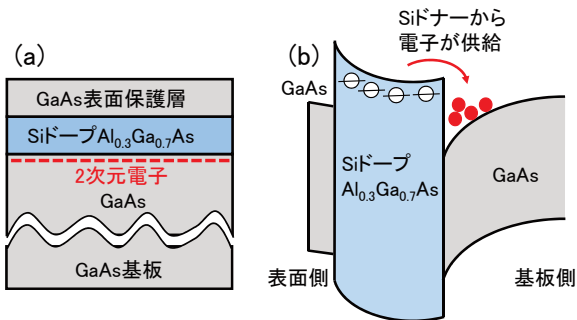


図 6: Si 変調ドープ単一ヘテロ構造/Si-modulation doped AlGaAs/GaAs single-heterostructure (a) 構造断面/Cross section of the layered structure. (b) ポテンシャルプロファイル/Potential profile.

4. 測定結果と考察

先に述べた Si 変調ドープ AlGaAs/GaAs 単一ヘテロ構造試料について、本装置を用い、室温にて van der Pauw 法により電子濃度、移動度を求めた結果について述べる。電圧測定には交流ロックイン法を用いた。この方法は、特定周波数の交流電流を流し、同期したその周波数のみの電圧成分を測定するもので、非常に S/N 比が高く精密測定に適していることが知られている。今回の測定では、13 Hz、 $1 \mu\text{A}$ の交流電流を用いた。試料位置において測定した磁束密度は、N 極で 0.106 T、S 極で 0.118 T であった。

まず電子濃度を求めるにあたり N 極、S 極を上に向けて磁石を配置し、対角方向の抵抗 R_{ACBD} を測定した結果、それぞれ $R_{ACBD} = 1.379 \text{ k}\Omega$ 、 $0.823 \text{ k}\Omega$ となり、磁石を配置しないときは $R_{ACBD} = 1.099 \text{ k}\Omega$ であった。これより、両方の極の測定を平均して求めた電子濃度は $2.51 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ となった。

次に、磁石なしで並行方向の抵抗を測定した結果 $R_{ABDC} = 1.608 \text{ k}\Omega$ 、 $R_{BCAD} = 0.506 \text{ k}\Omega$ となった。この比から $f = 0.90$ となり、式 (6) より抵抗率は 4.28×10^2

$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ と求まった。上記電子濃度、抵抗率から移動度は $0.58 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ と求まった。

以上のように、市販の装置を用いて測定した結果とやら遜色のない結果を得た。わずかな相違は、室温の違いや試料の経年変化によるものと考えている。

5. まとめ

半導体ヘテロ構造をテーマとする研究室の立ち上げに際し、半導体の特性として重要な項目であるキャリア濃度およびキャリア移動度を調べるため、永久磁石であるネオジム磁石を用いたホール効果測定装置を作製した。本装置を用いて半導体 2 次元電子系試料について測定した結果、市販の装置と何ら遜色のない高精度な測定ができていたことが示された。本装置は、低価格のみならず、単純な構造ゆえに堅牢であるので恒久的な使用が可能である。

謝辞

本論文は本研究室で行われた平成 29 年度の卒業研究をまとめたものである。卒業生の池田薫君、林口豪人君、有井有揮君、山内雄渡君に感謝する。試料を提供してくれた NTT 物性科学基礎研究所の秋保貴史博士に感謝する。本研究は本学エレクトロニクス研究所の平成 29 年度新任教員スタートアップ研究費の支援を受けた。また、科研費基盤 (B)16H03862 (代表赤坂哲也氏) の支援を受けた。

(平成 30 年 7 月 31 日受付)

参考文献

- [1] 御子柴宣夫著 半導体の物理 [改訂版](培風館), pp.117-118 (1991).
- [2] L. J. van der Pauw, Philips Res. Rep. **20**, 220-224 (1958).
- [3] T. Saku, Y. Hirayama and Y. Horikoshi, Jpn. J. Appl. Phys. **30**, 902-905 (1992).