

平成30年6月25日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17537

研究課題名（和文）量子効果に基づく世界最高水準の高抵抗精密測定技術の開発

研究課題名（英文）Development of accurate high-resistance measurement system using quantum effect

研究代表者

大江 武彦 (Oe, Takehiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：30443170

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：高抵抗の測定技術の高度化を目的として、量子化高抵抗素子の開発を行った。直流抵抗の国家標準に用いられる量子ホール素子を直並列に組み合わせ、 $1\text{ M}\Omega$ の量子化抵抗値を示す量子ホールアレー素子を開発し、その精密評価を行った。集積化される個々の量子ホール素子は、二次元電子系へ良質なコンタクトを形成している必要があるため、アレー素子の開発に先立ち、個々のホール素子の歩留まり向上に取り組んだ。その結果を用いて $1\text{ M}\Omega$ 量子ホールアレー素子を作製し、その量子化抵抗値が高い精度で設計値に一致していることを確認した。またその素子を用いて従来の測定システムの評価を行い、高い測定能力を維持できていることを確認した。

研究成果の概要（英文）：In order to improve the measurement capability of high resistance, quantized high resistance device was developed. A quantum Hall array device which quantum resistance value of $1\text{ M}\Omega$ is developed by combining quantum Hall devices in series and parallel and precise evaluation was carried out. Since individual quantum Hall devices to be integrated need to form good Ohmic contacts to the two-dimensional electron system, we have worked on improving the yield of individual Hall elements prior to the development of the array device. Using the result, $1\text{ M}\Omega$ quantum Hall array device was fabricated, and it was confirmed that the measured resistance value agrees with the designed value with high accuracy. We also evaluated the conventional measuring system using that array device and confirmed that we can maintain high measurement capability.

研究分野：計量標準

キーワード：量子ホール効果 化合物半導体 二次元電子系 抵抗標準 高抵抗精密測定 量子ホールアレー素子 GaAs/AlGaAsヘテロ接合素子 コンタクト抵抗

1. 研究開始当初の背景

電子機器の小型化、低消費電力化に伴い、より小型で絶縁性能に優れた電子部品の開発が進められるようになり、微小電流・高抵抗精密測定技術の重要性が増してきた。また、国際単位系の改訂に伴い、電気量の基本単位はアンペアから電荷素量 e に 2019 年 5 月に置き換わる予定であり、量子化電流の高精度な評価技術の開発が活発に行われている。ジョセフソン効果を用いた量子化電圧、単一電子トンネリング効果を用いた量子化電圧、量子ホール効果を用いた量子化抵抗の 3 つの異なる量子効果を組み合わせ、オームの法則からこれらの量子効果の正しさを検証する量子メトロロジートライアングル検証も各国で進められており、微小電流評価・高抵抗測定技術の重要性が産業界においても学術的にも増している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、量子ホール素子を直並列に組み合わせ、量子化高抵抗素子を作製、評価することである。単一の量子ホール素子により得られる量子化抵抗値は約 12.9 k Ω であり、それを 77 個直列に接続することにより約 1 M Ω の量子化抵抗値を得ることができる。このような素子により得られる量子化抵抗値は、理想的には経年変化が無く、量子崩壊電流未満では電流依存性が無いことにより、このように値が既知の量子化抵抗値を用いることによってさらに高い抵抗値をより小さい不確かさで測定することが可能になると期待できる。これにより微小電流・高抵抗の測定技術を向上することが本研究の主目的である。

量子化高抵抗ホール素子内部に集積化されたすべての量子ホール素子は、二次元電子系に小さい接触抵抗でコンタクトを形成している必要があり、その歩留まり向上が問題である。より高抵抗な素子を開発するためには多くの素子を集積化する必要があり、コンタクト面積が小さくなり、歩留まりの低下を招くほか、二次現電子系キャリア濃度の均一性の影響を大きく受けることとなる。本研究では 1 M Ω 量子ホールアレー素子を開発し、その精密評価を行うことによりその実現可能性について検討した。

3. 研究の方法

GaAs/AlGaAs ヘテロ接合界面に生じる二次元電子系に、AuGe/Ni を用いてコンタクトを形成した。まずは集積化素子と同じ形状を有する単一のホール素子を作製し、そのコンタクト抵抗の歩留まりや低温での特性を測定した。良い歩留まりを確認したため集積化素子を作製し、1 M Ω の平坦な量子化抵抗値が得られることを確認した。集積化素子と同じ形状の配線の抵抗や、コンタクト抵抗の実測値の分布から、集積化素子の示す 1 M Ω の量子化抵抗値の不確かさをイタリアのグル

ープと共同で検討すると共に、韓国のグループと共同で、単一の量子ホール素子を基準として極低温電流比較ブリッジを用いて集積化素子の精密評価を行った。

4. 研究成果

作製した 1 M Ω 量子ホールアレー素子を図 1 に示す。88 個のホール素子が集積化されており、その量子化抵抗値は 999999.966 Ω である。77 個のホール素子を直列に接続して約 994 k Ω とし、残る 11 個のホール素子を組み合わせることで上記のほぼ 1 M Ω の公称値を実現している。(図等は雑誌論文より)

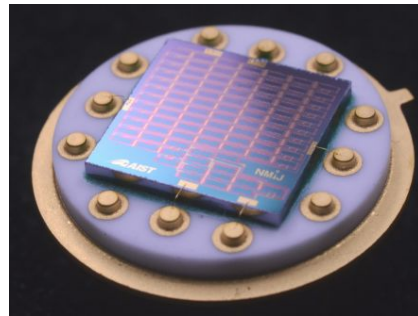


図 1. 1 M Ω 量子ホールアレー素子

図 2 は上に示した 1 M Ω 量子ホールアレー素子の対磁場特性の電流依存性である。30 μ A (30 V 印加) 電流を流した際も(赤色)縦抵抗 R_{xx} はゼロに落ちており、良質な量子化状態が得られていることがわかる。1 T (テスラ) 以上の広い磁場範囲にわたって 1 M Ω の量子化抵抗値が得られているほか、500 k Ω の平坦なプラトーも 4.8 T 付近で得られた。1 M Ω の標準抵抗器は通常 10 V を印加して校正しており、冷凍機の冷却能力の範囲内であれば、それよりも十分大きな電圧を許容可能であることを確認した。

配線抵抗や二次元電子系へのコンタクト抵抗、配線間等の絶縁抵抗の実測値から、

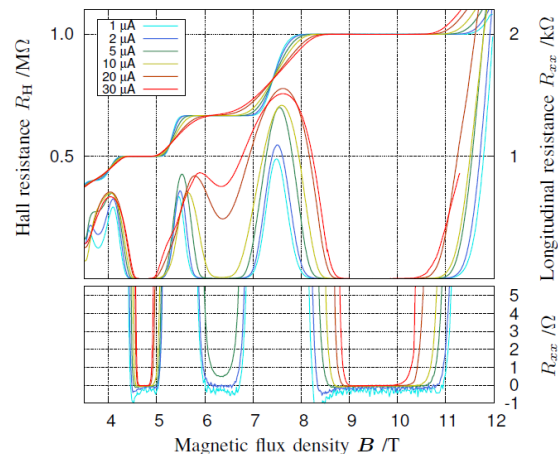


図 2. 1 M Ω 量子ホールアレー素子の対磁場特性の電流依存性

得られた量子化抵抗値が高い信頼性を有することを実証した。量子ホール素子の回路モデルを提案したイタリアのグループと共同で量子化抵抗値の数値計算を行い、11桁もの高い精度でその量子化抵抗値が設計値に整合することを確認した。数値計算をする上で材料にした測定値はテストサンプルのものであるため、作製した集積化素子そのものの性能を実証するものではないが、高い歩留まりでホール素子を作製することができていることから、数値計算で得られた結果と同等の性能を得られていると期待できる。

また韓国のグループと共同で極低温電流比較ブリッジを用い、量子ホール素子を基準として作製した1 M Ω 量子ホールアレー素子の評価を行った。結果、測定の不確かさ約30 ppb 以内で測定値が設計値に一致し、本集積化素子の高い信頼性を確認した。

研究代表者は、直流抵抗の校正業務を主務として行っており、高抵抗の校正は改造型のホイートストンブリッジを用いている。量子ホール効果を基準として1 抵抗器群を校正し、その平均値を普通の基準として測定を行っている。1 から順次ブリッジを用いて抵抗値を上げ、高抵抗の校正を行うため、高抵抗の測定は不確かさが大きくなる。1 M量子ホールアレー素子を用いて、従来のシス

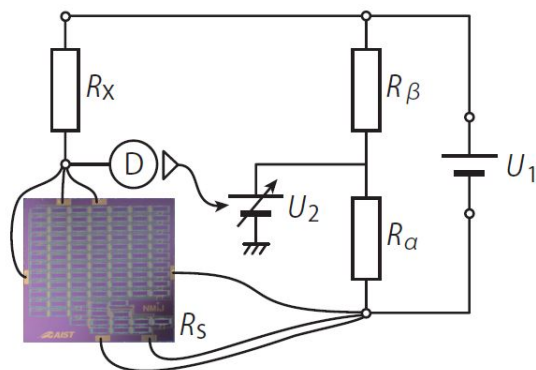


図 3. 1 M Ω 量子ホールアレー素子を用いた高抵抗校正用ブリッジの評価

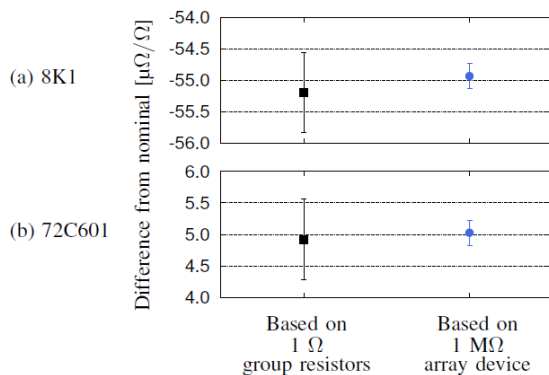


図 4 . 上図の測定の結果

テムを用いた校正結果との比較を行った。図 3 はその回路図、図 4 はその結果である。開発した量子化高抵抗素子を基準として図 3 の回路で R_x として 8K1 と 72C601 という 2 つの抵抗器を校正した。その結果が図 4 の青い点で示してあり、左側の黒い点は従来のシステムを用いた測定結果である。両者（黒点と青点）は不確かさの範囲内で良く一致しており、測定システムの信頼性を高い精度で確認した。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 3 件)

Martina Marzano, Takehiko Oe, Massimo Ortolano, Luca Callegaro, and Nobu-Hisa Kaneko, "Error modelling of quantum Hall array resistance standards", *Metrologia*, **55** (2018) 167-174. 査読有

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/aaa5c1>

M Marzano, T. Oe, M. Ortolano, L. Callegaro, and N. H. Kaneko, "MODELLAZIONE DI QUANTUM HALL ARRAY RESISTANCE STANDARDS PER LA REALIZZAZIONE DELL'OHM NEL NUOVO SISTEMA INTERNAZIONALE (Modeling Quantum Hall Array Resistance Standards for the realization of the ohm in the new Systeme Internationale)", *Atti del I Forum Nazionale delle misure*, **1** (2017) 661-668. 査読有

T. Oe, T. Itatani, S. Gorwadkar, and N. Kaneko, "Development of 1 M Quantum Hall Array", *IEEE Trans. Inst. Meas.*, **66** (6) (2017) 1475-1481. 査読有

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7745877/>

(学会発表)(計 4 件)

大江 武彦, Gorwadkar Sucheta, 板谷太郎, 金子 晋久, "量子化高抵抗素子の開発", 平成 30 年電気学会全国大会、九州大学伊都キャンパス、2018 年 3 月。

M. Marzano, T. Oe, M. Ortolano, L. Callegaro, and N. H. Kaneko, "Error modelling of quantum Hall array resistance standards", BIPM Workshop <The Quantum Revolution in Metrology>, France, September 2017.

<https://www.bipm.org/en/conference-centre/bipm-workshops/quantum-metrology/>

M. Marzano, T. Oe, M. Ortolano, L. Callegaro, and N. H. Kaneko, “MODELLAZIONE DI QUANTUM HALL ARRAY RESISTANCE STANDARDS PER LA REALIZZAZIONE DELL’OHM NEL NUOVO SISTEMA INTERNAZIONALE (Modeling Quantum Hall Array Resistance Standards for the realization of the ohm in the new Systeme Internationale)”, GMEE2017 Forum, Italy, September 2017.

<http://misure2017.ing.unimore.it/HOME.html>

T. Oe, T. Itatani, S. Gorwadkar, and N. Kaneko, “Development of 1 M Ω Quantum Hall Array Resistance Standards”, CPEM 2016, Ottawa, Canada, July 2016.

〔図書〕及び〔産業財産権〕
無し

〔その他〕
ホームページ等
大江 武彦 HP
<https://staff.aist.go.jp/t.oe/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

大江 武彦 (Oe, Takehiko)
産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員
研究者番号：30443170