

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01885

研究課題名(和文) 完全な高抵抗量子化ホール抵抗による世界最高精度の微小電流測定技術の確立

研究課題名(英文) Improvements of the small current measurement uncertainty using high resistance quantized Hall resistance array device

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) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：直流抵抗の一次標準に用いられる量子ホール素子を直列に775個接続し、公称値がほぼ $10\text{ M}\Omega$ となる量子ホールアレー素子や、88個の素子を直並列に組み合わせた $1\text{ M}\Omega$ 素子、10個のホールバーを直列に接続した $129\text{ k}\Omega$ 素子などを作製し評価した。米国の標準研究所であるNISTと共同で、極低温電流比較器ブリッジを用いてそれらの素子精密評価を行い、 $129\text{ k}\Omega$ 素子や $1\text{ M}\Omega$ 素子が8桁の精度でその設計値に一致する量子化抵抗値を示すことを確認した。 $1\text{ M}\Omega$ の素子に関しては、量子化抵抗値の磁場依存性を評価し、約2 Tの磁場範囲で、量子化抵抗値が設計値に $30\text{ n}\Omega$ 未満で一致することを世界で初めて確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

標準抵抗器は、マンガニンやニクロムといった金属材料の線や箔をコイル状やミアンダー状に加工して作られている。こうした標準抵抗器は安定であるものの、経年変化したり温度や湿度、気圧などに対して抵抗値が変化する。それに対して量子ホール効果により得られた量子化抵抗値は常に普遍的であるため、国際的に直流抵抗の一次標準として用いられている。この量子ホール素子を組み合わせて作られた高抵抗素子も同じく安定であり、既存の高抵抗測定系の信頼性の評価や、微小電流の精密測定に寄与できる。ジョセフソン電圧標準、単一電子トンネリング電流標準と共に量子効果の確認を行う量子メトロロジートライアングル検証に用いる予定である。

研究成果の概要(英文)：Quantum Hall effect have been used as a DC resistance standard in the world since 1990. Quantized Hall resistance devices can be combined in series and parallel to realize arbitrary quantized resistance value. But in fact, the wiring resistance of the wires which connect the Hall devices and the contact resistance to the 2-dimensional electron gas of the Hall devices affect to the final quantized value, so it's not easy to realize these integrated quantized resistance devices. We tried to fabricated  $129\text{ k}\Omega$  (10 Hall bars in series),  $1\text{ M}\Omega$  (88 Hall bars in series and parallel),  $10\text{ M}\Omega$  (775 Hall bars in series) integrated quantized Hall resistance devices. We evaluated those devices with NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) and we obtained good results for  $129\text{ k}\Omega$  and  $1\text{ M}\Omega$  devices. A  $1\text{ M}\Omega$  device showed wide and precise quantized Hall plateau against applied magnetic field for about 2 T, and the quantized value agreed to its nominal value within  $30\text{ n}\Omega$ .

研究分野：計測標準

キーワード：量子ホールアレー素子 量子ホール効果 GaAs/AlGaAs 直流電気抵抗標準 高抵抗測定 極低温電流比較ブリッジ 微小電流測定 量子メトロロジートライアングル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2019年5月20日に、SI(国際単位系)基本単位の定義改定が行われ、プランク定数  $h$  や電荷素量  $e$  などの基礎物理定数が不確かさを持たない定義値となった。改定前、電気量は電流の単位 A(アンペア)を用いて定義されており、1 A は、真空中に1メートルの間隔で平行に配置された無限に小さい円形断面積を有する無限に長い二本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ1 mにつき  $2 \times 10^{-7}$  Nの力を及ぼし合う一定の電流、と定義されていた。無限に細長い導体は実現不可能であり、これは真空中の透磁率  $\mu_0$  を定義したにすぎない。量子ホール効果やジョセフソン効果は、その高い普遍性や再現性から1990年1月1日より世界中で直流抵抗標準や電圧標準に用いられてきたものの、国際単位系の定義とは直接的にリンクしていなかった。2019年のSI定義改定により、量子化抵抗値が  $h/ie^2$  ( $i$  は整数)で表される量子ホール効果などは厳密にSIに定義された定義値となった。近年では量子ホール効果による抵抗標準や、ジョセフソン効果による電圧標準の他に単一電子トンネリング効果等を用いた量子電流標準も盛んに研究されており、精度向上に向けた取り組みが行われており、またこれら3つの独立した量子効果を用いてオームの法則がどれほど厳密に成り立つかを検証するメトロロジートライアングル検証が各国研究機関により進められている。量子電流源は、その性質上大電流化が難しく、精度の良いものはサブ nA オーダーにとどまる。この微小電流をもちいてトライアングル検証を行うには、高抵抗、低電圧の量子標準が必要となるため、量子ホール素子を直列に組み合わせた量子ホールアレー素子の開発を進めている。しかしながら、量子ホールアレー素子内部に集積化されたすべて量子ホール素子は望ましいオーミックコンタクトを備えている必要があり、量子ホール状態での縦抵抗が十分小さいことが求められる。集積化されたすべての量子ホール素子すべてに関して個別に特性を測定することが望ましいものの、多数集積化された素子に関しては現実的ではない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、望ましいコンタクト抵抗を備えた量子ホール素子を歩留まり良く作製するプロセス技術をもって、1 M $\Omega$  などの高抵抗の量子ホールアレー素子を作製し、それらの量子化抵抗値を評価することである。極低温電流比較器を用いて量子ホールアレー素子の性能評価を行うとともに、極低温電流比較器以外の評価方法を検討した。

### 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を用い、SiO<sub>2</sub> 薄膜により表面を保護しつつ AuGe/Ni を蒸着・アニールして二次元電子系へのコンタクトを形成した。10個直列に量子ホール素子を集積化した129 k $\Omega$ の素子を作製し、単一の量子ホール素子と正確な10:1抵抗比を作り、1 M $\Omega$ の素子と組み合わせることで10 M $\Omega$ を測定可能なホイートストンブリッジを組むことが可能である。本研究ではこれらの要素となる素子の作製・評価を行った。

### 4. 研究成果

129 k、1 M、10 Mの量子ホールアレー素子を作製し、その評価を米国の標準研究所であるNISTと共同で極低温電流比較器ブリッジ(Cryogenic current comparator: CCC)を用いて行った。図1a,bに129 k $\Omega$ 素子の外観と対磁場特性を示す。単一素子の場合、 $\nu = 2$ の量子化抵抗値  $R_H$ は12.9 kとなり、この10個直接素子においてはその10倍の129 kが1 T以上の磁場範囲

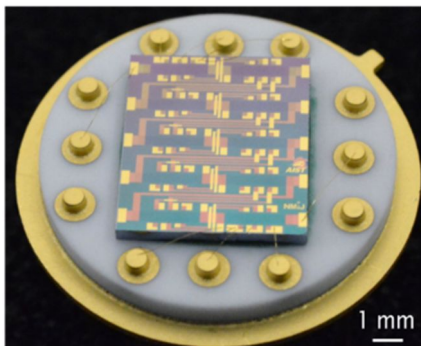


図 1a. 129 k 素子外観

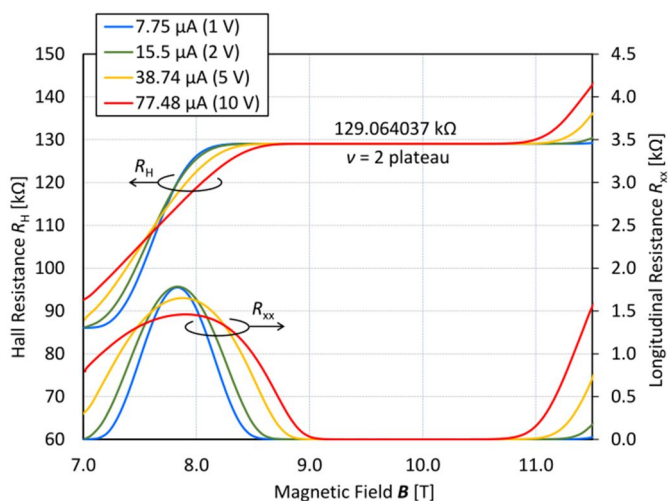


図 1b. 129 k 素子対磁場特性

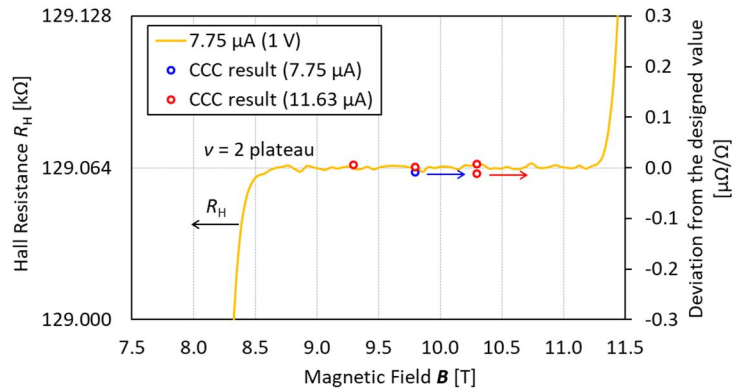


図 1c. 129 k 素子の  $\nu = 2$  量子化抵抗値の精密測定結果

にわたって得られていることがわかる。また縦抵抗  $R_{xx}$  は 10 T 前後でゼロに落ちており、良質な素子が作製できたことが確認された。図 1c は対磁場特性と極低温電流比較器を用いた精密測定結果であり、9.3 T から 10.3 T の磁場範囲で 10 n / 未満で設計値に整合することを確認した。

図 2 は、1 M 量子ホールアレー素子の外観、対磁場特性及び精密測定結果である。77 個のホールバーを直列に接続したものに 2 個のホールバーを並列に接続したものを直列に接続しており、その抵抗値は、 $12906.40373 \times 77.5 = 1000246.289$  ( $+246.289 \mu /$ ) となる。図 2b より、9 T から 10 T あたりで 1 M の  $\nu = 2$  プラトーが得られており、縦抵抗  $R_{xx}$  がゼロに落ちており、良好である。図 3b は極低温電流比較器を用いた精密測定結果であり、9.3 T にて繰り返し行った精密測定結果は  $-18 \text{ n} /$  から  $+17 \text{ n} /$  の間でばらつき、その平均値は  $+4 \text{ n} /$  となった。これほど公称値に一致した高抵抗の量子ホールアレー素子の報告はこれまでになく、世界初の成果である。

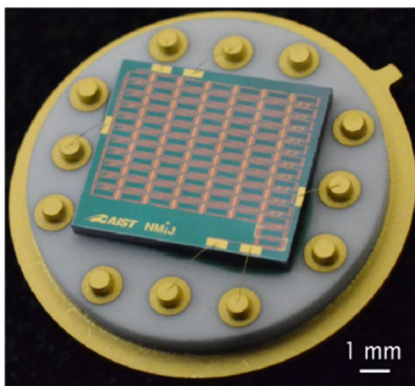


図 2a. 1 M 素子外観

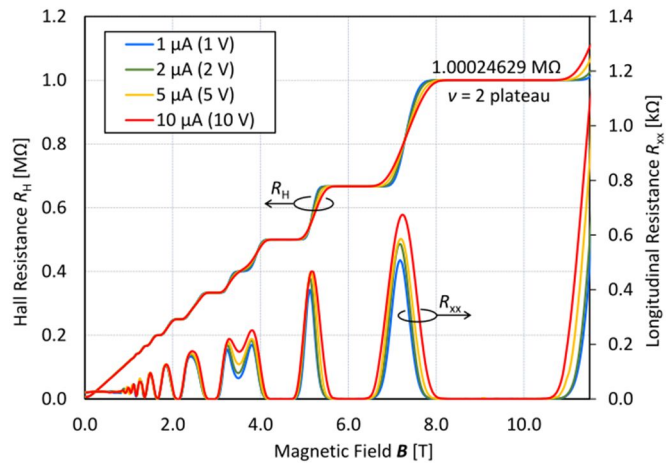


図 2b. 1 M 素子対磁場特性

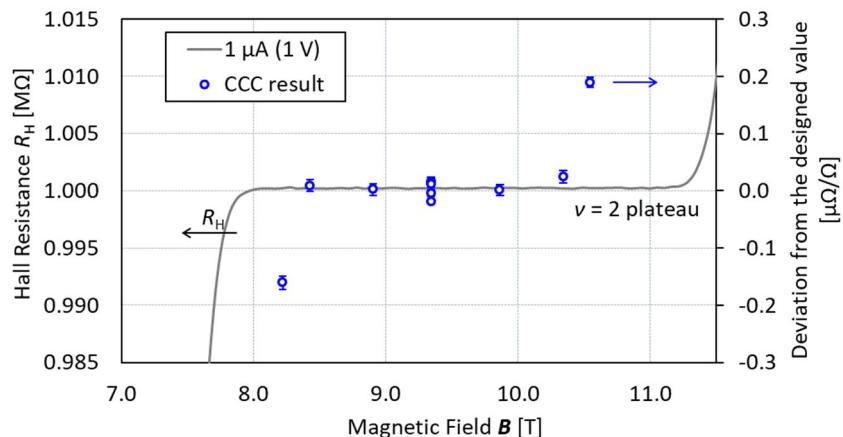


図 2c. 1 M 素子の  $\nu = 2$  量子化抵抗値の精密測定結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takehiko Oe, Taro Itatani, Gorwadkar Sucheta, Nobu-Hisa Kaneko	4. 巻 1
2. 論文標題 10 M Quantum Hall Array Device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Digest of 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)	6. 最初と最後の頁 1,2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CPEM.2018.8501182	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Dong-Hun Chae, Wan-Seop Kim, Takehiko Oe, Nobu-Hisa Kaneko	4. 巻 1
2. 論文標題 Precision Measurement of 1 M Quantum Hall Resistance Array	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)	6. 最初と最後の頁 1,2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CPEM.2018.8500946	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Dong-Hun Chae, Wan-Seop Kim, Takehiko Oe, Nobu-Hisa Kaneko	4. 巻 55
2. 論文標題 Direct comparison of 1 M quantized Hall array resistance and quantum Hall resistance standard	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Metrologia	6. 最初と最後の頁 645,653
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1681-7575/aad070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Chae Dong-Hun, Kim Mun-Seog, Kim Wan-Seop, Oe Takehiko, Kaneko Nobu-Hisa	4. 巻 1
2. 論文標題 Current-to-Voltage Conversion with Integrated Quantum Hall Resistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Digest of 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)	6. 最初と最後の頁 1,2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CPEM49742.2020.9191697	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Oe, A. R. Panna, R. E. Elmquist, D. G. Jarrett, Y. Fukuyama, N.-H. Kaneko	4. 巻 1
2. 論文標題 Precise evaluation of GaAs/AlGaAs 129 k and 1 M quantum Hall array devices for a quantum Wheatstone bridge	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Digest of 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)	6. 最初と最後の頁 1,2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CPEM49742.2020.9191735	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 大江武彦	4. 巻 70
2. 論文標題 直流抵抗標準の高度化に向けた取り組み	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測標準と計量管理	6. 最初と最後の頁 38, 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Takehiko Oe, Taro Itatani, Gorwadkar Sucheta, Nobu-Hisa Kaneko
2. 発表標題 10 M Quantum Hall Array Device
3. 学会等名 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Dong-Hun Chae, Wan-Seop Kim, Takehiko Oe, Nobu-Hisa Kaneko
2. 発表標題 Precision Measurement of 1 M Quantum Hall Resistance Array
3. 学会等名 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chae Dong-Hun、Kim Mun-Seog、Kim Wan-Seop、Oe Takehiko、Kaneko Nobu-Hisa
2. 発表標題 Current-to-Voltage Conversion with Integrated Quantum Hall Resistors
3. 学会等名 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Oe, A. R. Panna, R. E. Elmquist, D. G. Jarrett, Y. Fukuyama, N.-H. Kaneko
2. 発表標題 Precise evaluation of GaAs/AlGaAs 129 k and 1 M quantum Hall array devices for a quantum Wheatstone bridge
3. 学会等名 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Takehiko Oe ' s Web Page <a href="https://staff.aist.go.jp/t.oe/index.html">https://staff.aist.go.jp/t.oe/index.html</a>
---

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------